

Tecnología de suelos: estudio de casos

Asunción Usón Murillo,
Jaume Boixadera Llobet, Ángela Bosch Serra
y Alberto Enrique Martín (editores)



TECNOLOGÍA DE SUELOS: ESTUDIO DE CASOS

TECNOLOGÍA DE SUELOS: ESTUDIO DE CASOS

*Asunción Usón Murillo, Jaume Boixadera Llobet,
Ángela Bosch Serra y Alberto Enrique Martín
(editores)*



Universitat de Lleida



Prensas Universitarias de Zaragoza

TECNOLOGÍA de suelos : estudio de casos / Asunción Usón Murillo... [et al.], editores. — Zaragoza : Prensas Universitarias de Zaragoza ; Lérida : Edicions de la Universitat de Lleida, 2010

515 p. : il. ; 23 cm. — (Textos docentes ; 179)

ISBN 978-84-92774-97-5 (PUZ). — 978-84-8409-311-4 (Edicions de la Universitat de Lleida)

Suelos—Conservación

USÓN MURILLO, Asunción

631.4

Colección de Textos Docentes, n.º 179.

Prensas Universitarias de Zaragoza. Edificio de Ciencias Geológicas, c/ Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza, España. Tel.: 976 761 330. Fax: 976 761 063

puz@unizar.es <http://puz.unizar.es>



Prólogo

Este libro recopila las experiencias que se han mostrado y discutido en los cursos impartidos bajo la red temática de docencia sobre «Manejo sostenible de suelos» que ha financiado la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) mediante ayudas de intercambio en el Programa de Cooperación Interuniversitaria en el ámbito iberoamericano para el establecimiento de redes temáticas de docencia entre universidades españolas e iberoamericanas (E.AL.2002, resolución 00530 y renovaciones).

La red se creó gracias a la colaboración de profesores de tres universidades españolas, cuyos ámbitos de trabajo han estado localizados en el Valle del Ebro (NE de España), y de profesores de tres universidades de América Latina que han trabajado en condiciones agroclimáticas distintas. Así, el libro, reúne trabajos de manejo de suelos en condiciones edafo-climáticas muy diferentes que enriquecen el enfoque docente del libro. Las universidades involucradas en el proyecto han sido:

- Universidad de Zaragoza. España
- Universidad de Lleida. España
- Universidad Pública de Navarra. España
- Universidad de Costa Rica. Costa Rica
- Universidad de Concepción. Chile
- Universidad Nacional de San Antonio Abad de Cusco. Perú

La red temática asumió el compromiso de impartir docencia sobre manejo sostenible de suelos en las seis universidades implicadas, a lo largo de tres años, y se organizó de manera que cada año se impartía, como mínimo, un curso en una universidad española y en otra latinoamericana.

Desde el primer momento se quiso enfocar esta publicación desde la práctica, por eso se presenta una parte dedicada a «Estudio de casos» en la que se plantean situaciones de manejo, se aportan datos para el desarrollo del objetivo de manejo y se presentan elementos de discusión y/o soluciones para situaciones concretas. El análisis de casos se apoya en las bases teóricas de manejo del suelo que también se presentan en el libro.

El resultado final ha sido una publicación con dos partes bien diferenciadas, la primera sobre aspectos teóricos y la segunda sobre estudio de casos.

El primer módulo teórico consta de ocho capítulos que desarrollan los procesos y factores formadores de los suelos en diferentes ambientes, el uso de la cartografía de suelos en el manejo del mismo, problemáticas específicas relacionadas con las propiedades físico-químicas de los suelos: compactación, fertilización y encalado, para finalizar con temas actuales del manejo de suelos

desde diferentes perspectivas en un enfoque holístico del sistema agrario y que incluye aspectos clave como los indicadores de calidad o las nuevas tecnologías de la información.

El segundo módulo engloba una recopilación de estudios de casos agrupados en cinco bloques, según las condiciones agro-edafoclimáticas: seis casos sobre agricultura en zonas semiáridas, tres casos de agricultura en zonas de montaña, tres casos de agricultura en zonas tropicales, tres casos de indicadores de calidad del suelo y de control de la degradación y un último caso sobre tecnologías de la información territorial en el manejo de cultivos. Este enfoque, con un peso importante del estudio de casos, puede servir para que los profesores dispongan de información que ayude en las metodologías activas que se aplican en las nuevas titulaciones.

Este trabajo ha contado con la colaboración de 22 autores de cuatro nacionalidades: española, costarricense, chilena y peruana; la mayor parte de ellos son profesores universitarios y han colaborado activamente en el red temática de docencia mencionada aunque también han aportado sus conocimientos investigadores o profesionales de otros centros de investigación.

Los autores agradecemos a los siguientes investigadores y profesionales de la edafología: Gerardo Besga, Rafael Espejo, Ramón Isla, José Antonio Martínez, Jaume Porta y Josep María Villar, quienes han revisado algunos de los manuscritos originales y han hecho aportaciones muy valiosas que han sido incorporadas siempre que ha resultado posible.

Así mismo, deseamos que esta publicación resulte útil para los estudiantes que se especialicen en el manejo de suelos, profesionales del sector y también para estudiantes de grado que estén interesados en esta temática.

Los editores

PARTE I:
ASPECTOS GENERALES EN
TECNOLOGÍA DE SUELOS

I.1. El origen de los suelos: implicaciones sobre su distribución y manejo

1. Introducción

La mayoría de las civilizaciones de una u otra manera han clasificado los suelos de las áreas por ellos colonizadas; bajo dichas condiciones el criterio para separar suelos siempre estuvo relacionado con su necesidad de producir alimentos y podría resumirse como la relación suelo-planta.

Es a partir de mediados del siglo XIX que algunos autores de la escuela de suelos rusa, notablemente Lomonosov y Dokuchaev, inician estudios conducentes a identificar los factores que determinan la formación de uno u otro tipo de suelo. Sus conceptos posteriormente son reconocidos en Europa y otras partes del mundo, de manera que a estos autores se les considera como padres de la edafología moderna.

Durante los siglos XIX y XX, diferentes grupos en varias regiones geográficas del mundo han trabajado en aspectos relacionados con el origen y la distribución de los suelos, ahora con diferentes objetivos. En regiones tropicales este tipo de trabajos se inician a mediados del siglo XX, como resultado de la expansión del conocimiento y de la necesidad de realizar operaciones productivas por parte de países poseedores de colonias en esta región. Los sistemas de clasificación de suelos podrían separarse en: 1) los que se basan en aspectos de medio ambiente, 2) los que definen el suelo de acuerdo al proceso de alteración y 3) los que consideran las características del suelo y las relaciones con su formación (en este grupo se incluyen sistemas numéricos y el uso de herramientas de posicionamiento geográfico).

El avance del conocimiento permite estudiar el origen de los suelos resumiéndolo en tres grandes apartados: 1) meteorización, 2) los factores formadores del suelo, 3) los procesos formadores del suelo. Ello se complementa con una reflexión final sobre cómo el conocimiento del origen de los suelos permite entender su distribución y, por tanto, cartografiarlos como una de las bases de su manejo. El presente artículo trata de describir a grandes rasgos estos cuatro apartados.

2. Meteorización

La meteorización es el proceso de desintegración y descomposición de los materiales formadores del suelo causado por agentes químicos, físicos y biológicos, cuando los materiales (rocas y sus minerales) no están en equilibrio con la temperatura, la presión y la humedad en la interfase atmósfera-litosfera. En general, los minerales formados bajo condiciones de alta temperatura y presión y baja concentración de oxígeno y agua (magma) no son estables en la litosfera, donde los primeros son bajos y los últimos abundantes.

Las rocas al quedar expuestas, se ven sometidas a procesos de congelación y descongelación, calentamiento y enfriamiento y mojado y secado, causados por cambios climáticos. Las modificaciones dominantes en zonas frías y secas son físicas (abrasión, expansión y contracción), mientras que en las regiones húmedas y calientes dominan las químicas (hidratación, hidrólisis, oxidación, reducción y solución), junto con las biológicas. La ocurrencia de cambios en los materiales de origen, puede ocurrir en la parte más externa de la corteza terrestre (pedoformación) o en los materiales subyacentes a la pedosfera (geoformación). Al proceso general que trata de equilibrar las diferentes tendencias se le llama epimorfismo: meteorización + pérdida o acumulación + neoformación.

La meteorización de los materiales iniciales precede a la formación del suelo, mientras que le acompaña en rocas blandas y en el material del suelo. Es una reacción continua a lo largo del desarrollo del suelo, hasta el momento en que no hay más reactantes disponibles. La meteorización tiene lugar tanto dentro del solum (horizontes A y B) (edaformación) como debajo (horizontes C y R) (geoformación) (Buol et ál., 1981).

La meteorización geoquímica incluye la hidrólisis (ataque del agua acidificada), la carbonatación (proceso de meteorización asociado a la presencia de CO₂ en la solución del suelo), la oxidación (proceso en el cual elementos como el Fe y el Mn aumentan de tamaño y carga), la reducción (proceso en el cual bajo condiciones de saturación de agua, bajo potencial de oxidación y baja concentración de bases los elementos pierden carga), la hidratación (asociación de moléculas de agua o grupos hidroxílicos sobre la superficie o bordes de los minerales) y la solución (proceso por el cual los elementos más solubles son separados del material original). Los conceptos de equilibrio entre productos de la meteorización pueden ampliarse en el libro de Thomas (1994) y, en cuanto a diagramas de equilibrio entre productos de la meteorización, en los trabajos de Marshall (1977) y Bohn et ál. (1985).

El concepto subyacente en todos estos esquemas conceptuales es que la meteorización procede en una determinada dirección (p.ej., el lavado de los

componentes, la pérdida de bases, la acidificación y la transformación de las arcillas hacia óxidos de hierro y aluminio). Esta situación se da en aquellos climas donde predomina un régimen percolante, es decir, donde la lluvia supera claramente a la evapotranspiración, pero en multitud de situaciones ello no sucede por cuanto dicho lavado no se produce y los componentes no se lavan y así los procesos de meteorización se detienen –o proceden a una velocidad muy lenta– tal y como ilustra la figura 1. Algunos autores hablan de meteorización inversa (Bolt et ál., 1978) que se produciría cuando, en vez de lavarse los componentes más solubles, estos se concentran en la solución del suelo.

La meteorización edafquímica, entendida como aquella que tiene lugar de forma predominante en el *solum*, incluye la carbonación, los ciclos de oxidación-reducción (formación de moteados y concreciones en suelos mal drenados), quelación, intercambio iónico, eliminación de aluminio en arcillas (destrucción de montmorillonitas en medios ácidos), remoción de potasio (generación de tipos de arcilla a partir de micas), formación de islas de aluminio (generación de minerales intergradados 2:1 - 2:2) y complexólisis (formación de quelatos orgánicos con Fe y Al). Buol et ál. (1981) resumen este tipo de meteorización en diferentes ambientes.

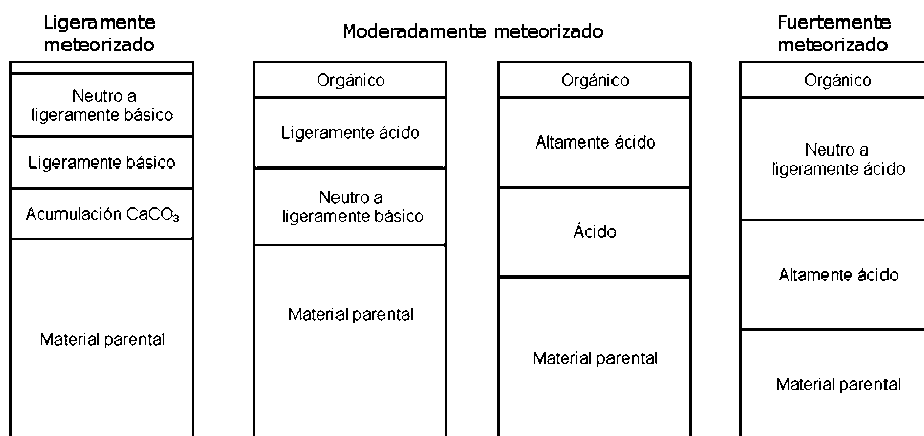


FIGURA 1. Esquema de avance de zonas ácidas y básicas en el suelo a través de su desarrollo. Esta secuencia representa también perfiles de suelos de regímenes áridos a tropicales (adaptado de Bohn et ál., 1985)

3. Factores formadores de suelos

Dokuchaev descubrió que los suelos se forman a partir de un sustrato mineral u orgánico (mp), influenciado por el clima (cl), los organismos (o), el relieve (r) y el tiempo (t). Estos factores fueron analizados posteriormente por Jenny (1941), quien lo relacionó de la siguiente manera: $S = f (cl, mp, r, t, o)$, donde S es el suelo; el mismo autor definió otras ecuaciones como variantes importantes, las cuales asoció con una terminología apropiada. Así, al considerar un factor como única variable y los otros constantes, se mencionan la climosecuencia $S = f cl (mp, r, t, o)$, la litosecuencia $S = f mp (cl, r, t, o)$, la toposecuencia $S = f r (cl, mp, t, o)$, la cronosecuencia $S = f t (cl, mp, r, o)$ y la biosecuencia $S = f o (cl, mp, r, t)$. El término *catena* (Milner, 1935) se utiliza para describir suelos asociados en el paisaje de la misma forma que las argollas se unen en una cadena, es decir, «una secuencia de suelos de aproximadamente la misma edad derivados de un mismo material parental que se presentan bajo condiciones climáticas parecidas pero con diferentes características debido a variaciones en relieve y drenaje»

3.1. Material parental

Desde el punto de vista geológico, las rocas se diferencian en ígneas, metamórficas o sedimentarias. Las rocas ígneas constituyen la mayor parte de la corteza terrestre y se llaman eruptivas (fuerza), endógenas (del interior de la tierra) o magmáticas (magma, lava). Las rocas metamórficas se originan a través de cambios metamórficos producidos por las altas temperaturas (termomorfismo) y presiones (dinamorfismo) que actúan sobre las rocas ígneas o sedimentarias. Las rocas sedimentarias, resultan de la erosión y redepositación de productos de meteorización de rocas ígneas o metamórficas, a través de la acumulación de residuos orgánicos o por precipitación de algunos elementos en condiciones apropiadas (evaporitas).

En la corteza terrestre se presentan 80 elementos químicos; la forma en que estos se agrupan para formar más de 2000 minerales hace que la corteza esté formada por materiales de sílice acompañado de otros elementos. A pesar de la gran cantidad de minerales existentes, son pocos los que afectan la formación del suelo tanto en regiones húmedas (Hardy, 1970) como áridas. Tanto por peso como por volumen los materiales más abundantes de la corteza terrestre contienen principalmente O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K y Mg (Berry y Masson, 1959; Schlesinger, 1997).

Según Crompton (1962) los principales elementos químicos que conforman la corteza terrestre pueden agruparse según su movilidad relativa, de manera que los más móviles se pierden rápidamente del sistema suelo, mientras que los menos móviles tienden a acumularse como resultado de la meteorización de los minerales (tabla 1).

Elemento mineral	Movilidad relativa	Fase de movilidad
Cl ⁻	100.00	I
SO ₄ ⁻²	57.00	
Ca ⁺²	3.00	II
Na ⁺¹	2.40	
Mg ⁺²	1.30	
K ⁺¹	1.25	
SiO ₂	0.20	III
Fe ₂ O ₃	0.04	IV
Al ₂ O ₃	0.02	

TABLA 1. Movilidad relativa de varios elementos minerales del suelo (tomado de Crompton 1962)

Debido a que la mayoría de los minerales contienen Si, la comprensión de la estructura de los silicatos es indispensable en el estudio de la génesis del suelo. Según Paton (1978) los silicatos más simples se conocen como nesosilicatos y consisten de un tetraedro formado por un átomo de sílice rodeado de cuatro átomos de oxígeno, de manera que los tetraedros se unen entre sí por otros elementos como el Fe y el Mg para formar algunos minerales (p.ej. olivino). La unión de dos tetraedros compartiendo un oxígeno da origen a los sorosilicatos y cuando forman anillos a los ciclosilicatos. La unión de silicatos en cadenas (inosilicatos) puede ocurrir de manera que se formen cadenas simples o dobles; la unión de cadenas simples a través de puentes de Fe y Mg da origen a los piroxenos mientras que la unión de cadenas dobles por los mismos elementos da origen a los anfíboles. Cuando las cadenas de silicatos comparten oxígenos para formar capas las estructuras minerales, se conocen como filosilicatos (p.ej. micas), mientras que la unión de filosilicatos compartiendo oxígenos da origen a los tectosilicatos (cuarzo).

Al compartir átomos de oxígeno la carga por Si disminuye en las estructuras desde los sorosilicatos hasta los tectosilicatos. Este fenómeno se asocia con la resistencia a la meteorización de los minerales ya que la carga por silicio en los tectosilicatos, con muchos oxígenos compartidos, son más estables que otros minerales. Este fenómeno fue observado por Goldich (1938) al describir la secuencia de meteorización para minerales del tamaño de la arena, modificada por Jackson y Sherman (1953) para considerar minerales del tamaño de las arcillas y en la que el yeso es el mineral menos estable mientras que los óxidos de Fe, Ti y Zi, son los más resistentes (figura 2).

En climas áridos y semiáridos (Nettleton, 1991) abundan los suelos donde predominan los carbonatos de calcio o el yeso, por cuanto no se han lavado del material originario, únicamente se han redistribuido en el *solum* o se acumulan en

el suelo procedentes de la deposición atmosférica o de las aguas; por el contrario, a medida que existe lavado a través del perfil del suelo, dichos elementos se eliminan, la meteorización prosigue su curso y otros minerales, situados en la parte media de la figura 2, se vuelven dominantes.



FIGURA 2. Secuencia de meteorización de minerales según Jackson y Sherman (1953)

En adición a las consideraciones anteriores, debe tenerse en cuenta que las rocas contienen minerales de diferente composición y que, además de las características químicas, su meteorización depende de su textura (el tamaño de sus constituyentes) y de la estructura o porosidad de la misma, lo que llevó a Rougerie (1960) a presentar la escala de estabilidad de las rocas (figura 3).

De ciertos materiales parentales se adquieren algunas características en el suelo. Los *loess* permiten la formación de suelos de textura limosa, mientras que las areniscas (cuarcitas), heredan texturas arenosas. Las rocas ígneas claras como el granito tienden a producir caolinita, mientras que las oscuras producen suelos de color rojo oscuro, con más bases y mayor pH que las rocas claras. Las cenizas volcánicas dan origen a suelos con baja densidad aparente y alta capacidad de retener humedad y aniones.

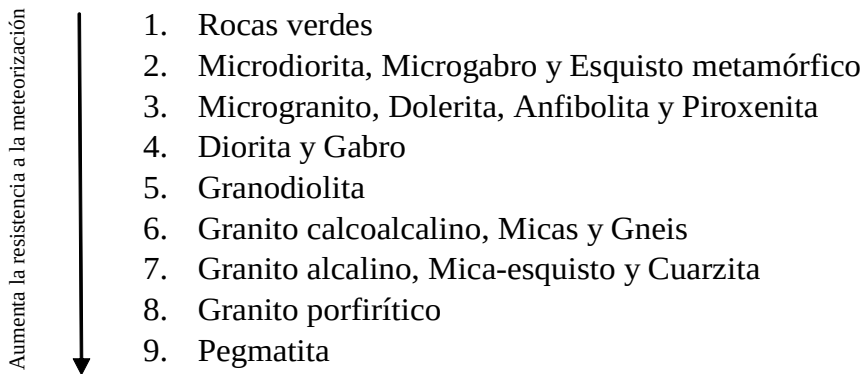


FIGURA 3. Secuencia de meteorización de las rocas según Rougerie (1960)

3.2. Clima

Es común reconocer varias capas alrededor de la Tierra. En general el macroclima describe las variaciones a nivel global (estratosfera y troposfera), y el microclima estudia las variaciones de origen local (biosfera y pedosfera), dependientes del primero (Elías y Castellví, 2001). Como las variaciones del microclima afectan regiones muy extensas, su interpretación edáfica fue la primera en considerarse; de esta manera en regiones de clima tropical se dijo que dominaba la laterización, en clima templado la podsolización y a los suelos de clima secos se les llamó desérticos (Marbut, 1927).

El clima afecta a la meteorización en forma directa e indirecta. Los efectos indirectos se observan por las variaciones que causa el clima sobre la distribución de las comunidades bióticas. Como ejemplo, en regiones con estación seca definida en América Latina ocurre la caída del follaje en especies deciduas, fenómeno similar al que ocurre en zonas templadas durante el otoño, por lo que la mineralización de la materia orgánica del suelo no es de la misma magnitud durante todo el año.

Efecto del macroclima: Como regulador del clima del mundo el microclima domina los procesos formadores del suelo en la misma escala, afectando principalmente a través de sus componentes la temperatura, la humedad y el viento.

Efecto de la temperatura: Dentro de cierto ámbito y en presencia de agua, aumentos en la temperatura causan un incremento en la velocidad de reacción que

pueden o no conducir a procesos de formación de suelos diferentes. En términos generales, se acepta que aumentos en la temperatura implican:

- Mayor profundidad del suelo.
- Mayor lavado de bases (al favorecer la desintegración de las rocas).
- Menor relación $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$, al acumularse el aluminio en regiones húmedas.
- Acumulación de sales en regiones áridas.
- Colores más rojos por acumulación de hierro en regiones más húmedas.
- Mayor mineralización de la materia orgánica, si la humedad no es limitante.
- Mayor cantidad de arcillas.

Efecto de la humedad: La humedad se relaciona directamente con la precipitación, la cual afecta a la formación del suelo en proporción a su intensidad, duración y frecuencia. En general los aumentos en cualquiera de las tres variables mencionadas causan un incremento en la infiltración y la escorrentía, afectando así la formación de los suelos. Se acepta que los aumentos en la humedad implican:

- Mayor cantidad de materia orgánica y nitrógeno.
- Mayor lavado de bases en climas húmedos.
- Menor concentración de sales en climas secos
- Mayor profundidad del horizonte petrocálcico o petrogípsico.
- Mayor concentración de cuarzo en regiones húmedas.
- Reducción de la capacidad de intercambio catiónico (presencia de caolinitas).
- Mayor acidez.
- Mayor cantidad de arcillas.

Efecto del viento: El viento influye en la formación de los suelos según sea su intensidad, frecuencia y duración. Además, su dirección (dominancia en un sentido) puede acentuar su efecto como ocurre con la deposición de materiales piroclásticos en regiones de vulcanismo activo (p.ej., Java y Centroamérica), tal como se muestra en la figura 4. El viento afecta a la formación del suelo ya que:

- Controla parcialmente la temperatura y la humedad.
- Puede causar erosión eólica.
- Controla la deposición de materiales como *loess* y cenizas volcánicas.

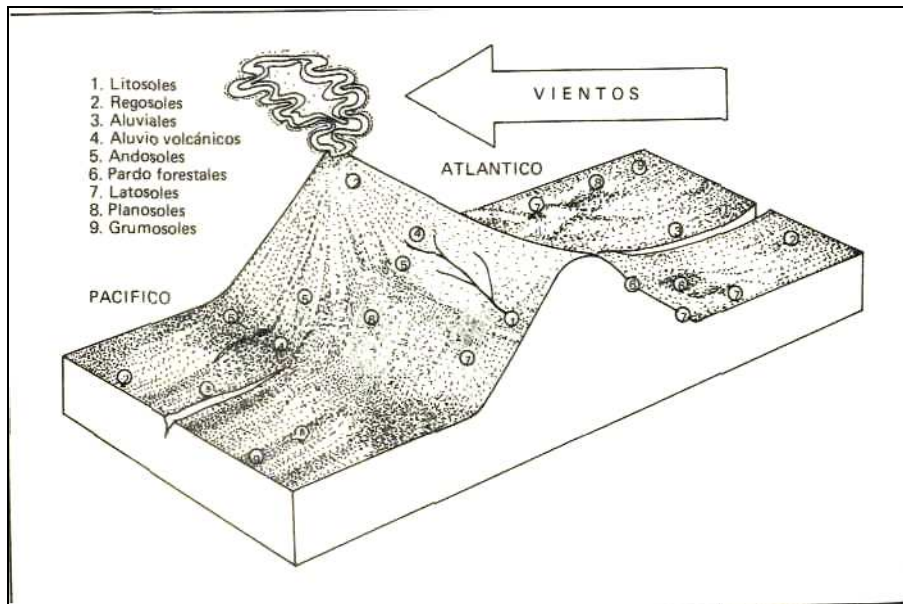


FIGURA 4. Disposición esquemática de los principales grandes grupos de suelos en Centroamérica (tomado de Martín, 1969)

Efecto del microclima: Dentro del suelo, los parámetros temperatura y humedad también afectan la formación del suelo en forma directa o indirecta. En forma indirecta, por su efecto sobre las comunidades vegetales, al determinar la germinación de algunas semillas, la elongación de raíces, etc.

Influencia de la temperatura: La temperatura del suelo presenta variaciones diurnas y estacionales. Ambas variaciones son sinusoidales y la diurna es muy notoria en la superficie del suelo, aunque tiende a desaparecer con la profundidad del mismo; a 50 cm de profundidad en regiones tropicales se considera constante (Soil Survey Staff, 1975). La diferencia en régimen de temperatura del suelo de regiones tropicales con otras del mundo se puede estimar empleando como criterio la variación estacional ya que en el trópico la variación estacional es $<5^{\circ}\text{C}$ y en otras regiones es $>5^{\circ}\text{C}$. De esta manera, se definen varios regímenes de temperatura del suelo, criterio empleado en sistemas de clasificación de suelos a nivel de familia (tabla 2). Los límites de los regímenes de temperatura del suelo así definidos, representan valores importantes para el cultivo de especies agrícolas en regiones templadas; así el límite inferior del hipertérmico representa el límite mínimo para el cultivo de los cítricos, el inferior de la clase térmica el del crecimiento del algodón y el de la clase mélica el del maíz de grano, por lo que podría redefinirse estos límites para regiones tropicales (Forsythe, 2002).

Tv – Ti > 5 °C	Ta	Tv – Ti < 5 °C	Altitud aprox. msnm
Frígido	< 8 °C	Isofrígido	>3000
Mésico	8-15 °C	Isomésico	1800-3000
Térmico	15-22 °C	Isotérmico	600-1800
Hipertérmico	>22 °C	Isohipertérmico	<600

TABLA 2. Regímenes de temperatura de suelos a 50 cm de profundidad (adaptado de Buring, 1970 y Sánchez, 1976).

Tv, Ti, Ta = temperaturas medias de verano, invierno y anual, respectivamente

Influencia de la humedad: El régimen de humedad del suelo define sus propias características. Para poder diferenciar los suelos de forma cuantitativa se han definido varios regímenes de humedad dentro del perfil del suelo, de acuerdo a la presencia o ausencia de agua retenida a una tensión > a 1500 kPa durante ciertos periodos del año, dentro de la sección control y su profundidad varía según la textura del suelo (figura 5). Empleando este criterio (SSS, 2006) se definen los regímenes ácuicos que implican condiciones de reducción por períodos prolongados, los regímenes arídico y tórrico que presentan las mismas características pero se emplean a niveles diferentes de clasificación, el régimen ústico típico en áreas con un período seco relativamente largo (>3 meses), el údico en áreas con período seco corto y el perúdico en regiones en las que el suelo nunca está seco pero tampoco anegado (Soil Survey Staff, 1975). La influencia de los regímenes de humedad en la mineralogía de los suelos derivados de cenizas volcánicas se puede observar en la figura 6.

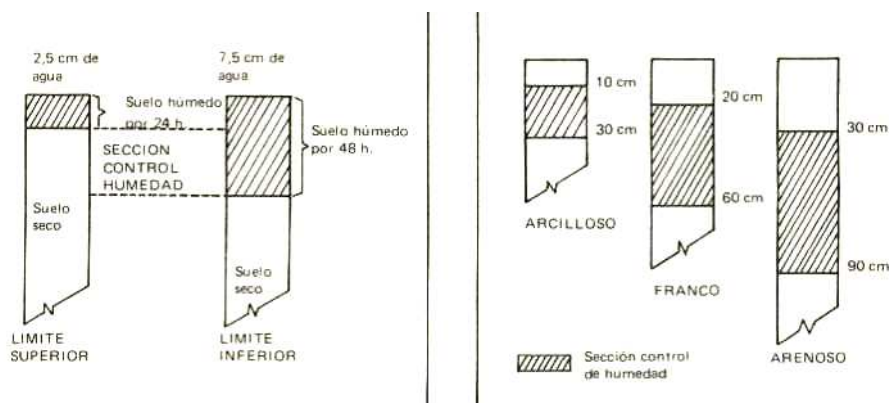


FIGURA 5. Determinación de los límites de la sección control de humedad en suelos de diferente textura (tomado de Ikawa, 1978)

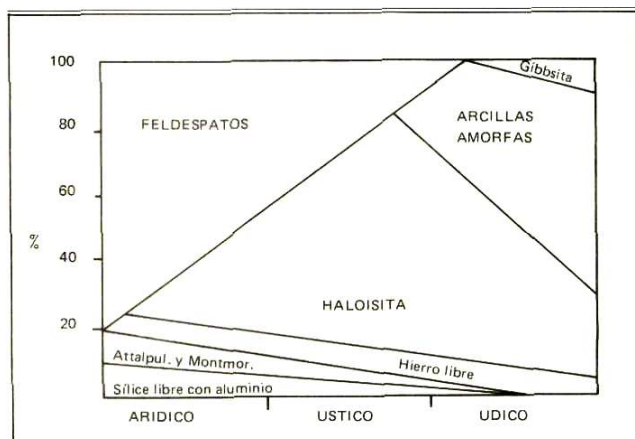


FIGURA 6. Variación de la mineralogía de arcillas en Andisoles de Ecuador, en función del régimen de humedad del suelo (tomado de Maldonado, 1973)

Efecto combinado de la humedad y la temperatura: El efecto sobre la acumulación de materia orgánica ejercido por las variables ambientales temperatura y precipitación, asociadas al relieve y combinadas en el concepto de zona de vida, se observa en la tabla 3. El efecto de la temperatura ambiente se observa al comparar los datos del piso tropical (nivel del mar) con los del piso montano a más 2500 msnm, mientras que el efecto de la humedad, al comparar los valores del bosque seco con los del bosque pluvial. En ambos casos ocurre un aumento significativo del contenido de materia orgánica tanto del suelo como del subsuelo asociado a una disminución de la temperatura y a un aumento de la cantidad de precipitación pluvial. Sin embargo, a mayor elevación se alcanza un piso altitudinal sobre la zona de condensación, por lo que el aire es seco y frío, en el que ocurren con frecuencia heladas y caída de granizo, dando paso a la formación de ecosistemas desérticos en los cuales la adición de residuos es mínima, como ocurre en los altiplanos y picos nevados de la región andina de Sudamérica (Alvarado et ál., 2006).

Zona de Vida	Seco	Húmedo	Lluvioso	Pluvial	PROMEDIO
	Mat. Org. %				
Tropical	3.3/1.0 (7)	3.3/0.9 (7)	4.3/1.3 (13)		3.6/1.1 (27)
Premontano		6.3/2.8 (2)	6.9/2.2 0(6)	6.6/2.0 (5)	6.6/2.3 (13)
Montano Bajo		4.9/1.6 (1)	19.1/4.9 (1)	20.4/6.7 (3)	14.8/4.4 (5)
Montano				19.8/-- (1)	19.8/R (1)
PROMEDIO	3.3/1.0 (7)	4.8/1.8 (10)	10.1/2.8 (20)	15.62/4.31 (9)	

TABLA 3. Variación del contenido de materia orgánica del suelo y del subsuelo en función de la zona de vida (confeccionado con datos de Holdridge et ál. 1971)

*Los valores en cada casilla representan el contenido promedio de materia orgánica en el horizonte superficial y subsuperficial. El valor en paréntesis es el número de sitios considerados para calcular el promedio.

En relación a lo anterior, se debe señalar que muchos suelos se formaron en condiciones climáticas (muy) distintas a las actuales y que no se hallan en equilibrio con los climas actuales. Siguiendo a Ruhe (1975) deberíamos hablar de paleosuelos, donde los calificativos relictos se reservan para aquellos suelos que empezaron a formarse en condiciones (clima y vegetación) distintas de las actuales, pero que todavía se hallan próximos a la superficie como para continuar desarrollándose y los de fósil o enterrados así como exhumados para aquellos que han vuelto a ser expuestos. Algunos autores sugieren que solo aquellos suelos desarrollados en el Holoceno deberían considerarse paleosuelos, pero aún así dicho límite es insuficiente por cuanto se conoce que muchos suelos han experimentado, dentro del Holoceno, importantes cambios con lo cual ni siquiera este límite sería válido (Bronger et ál., 1989).

La presencia de suelos que presentan un número muy elevado de características ligadas a climas del pasado es especialmente notable en aquellas regiones que estuvieron libres de hielos durante las últimas glaciaciones como son las regiones mediterráneas o las tropicales bajas y en aquellas superficies geomorfológicamente más antiguas, como por ejemplo las rañas (Espejo, 1985) del Plioceno en el Centro de España.

Los regímenes de humedad y temperatura utilizados en Soil Taxonomy (SSS, 2006) describen el clima actual y proporcionan una idea precisa sobre el edafoclima en que se han desarrollado los suelos en superficies actuales. En aquellas superficies geomorfológicamente antiguas son pobres predictores del edafoclima en que se desarrollaron dichos suelos.

3.3. Organismos

La relación íntima que existe entre clima-organismo-suelo hace difícil analizar cada uno de ellos como variable independiente. Los organismos (plantas y animales, incluido el hombre), se desarrollan bajo determinadas condiciones de clima y suelo pero al mismo tiempo influyen sobre ellos modificándolos de manera que les favorezca. De manera general, y como una ley de la biología del suelo, cuanto más pequeños son los organismos mayor es su número, más específica su función y mayor su influencia sobre las propiedades del suelo (Wilde, 1958).

Efecto de la vegetación: Las plantas reducen el poder erosivo de las lluvias al interceptarlas con su follaje y al reducir la velocidad del agua de escorrentía por la trama de las raíces. En este sentido, las plantas favorecen la formación del suelo al reducir su pérdida y favorecer el ataque del agua a las rocas, las cuales también se

ven reducidas en tamaño por efecto del crecimiento de las raíces entre las mismas; Birot (1962) menciona que una raíz de 10 cm de diámetro y 1 m de longitud es capaz de elevar un bloque de 4 toneladas creando tensión entre las rocas, las cuales acaban por desintegrarse. Este efecto es notorio en el deterioro de estructuras arqueológicas, en el que las raíces no penetran los materiales sino que aprovechan espacios entre ellos para ejercer presiones que acaban por reducirlos de tamaño.

Formas vegetales como hongos, algas y líquenes, crecen sobre la roca desnuda y extraen de ellas, mediante procesos bioquímicos, elementos que otras plantas no pueden absorber (Schlesinger, 1997); las diatómeas, por ejemplo, requieren sílica para su esqueleto y son capaces de alterar los silicatos (Jacks, 1953). De esta manera las plantas más simples meteorizan los primeros centímetros de suelo preparando el terreno para las plantas superiores. Las plantas inferiores juegan un papel preponderante en la descomposición de los tejidos de plantas superiores, lo mismo que sus relaciones simbióticas o de otro tipo, lo que afecta a la formación del suelo.

En general, las plantas afectan la evolución del suelo porque:

- Producen un microclima especial.
- En general, incrementan la infiltración.
- Aportan materia orgánica.
- Ayudan a reducir la erosión.
- Reciclan (fijan) nutrientes.
- Producen quelatos.
- Producen CO₂.

Efecto de los animales: La importancia de los animales en la formación del suelo puede notarse en su efecto en el control de la cobertura vegetal y en su efecto sobre el suelo en sí mismo. En general, los animales grandes reducen de tamaño los desechos vegetales para que los pequeños puedan ejercer su acción en forma más eficiente. Sin embargo, tanto animales grandes como pequeños ejercen los dos tipos de efecto.

El sobrepastoreo reduce la cubierta vegetal, lo cual facilita la remoción de material edáfico, hecho reconocido desde antaño por el sobrepastoreo de caprinos, ovinos y vacunos. Las termitas y las hormigas remueven enormes cantidades de follaje causando problemas sobre todo en formas semiáridas, donde la vegetación arbustiva crece en parches sobre termiteros y hormigueros, animales que controlan su dispersión.

La acción de animales como los artrópodos es importante dentro del suelo y en la descomposición de los residuos vegetales que caen sobre el mismo. Los efectos de los arácnidos, lombrices e insectos son muy importantes en la parte superior del suelo ya que su población normalmente disminuye con la profundidad del mismo. Uno de los principales efectos sobre el suelo, consiste en la mezcla de horizontes al acarrear partículas del suelo al subsuelo y viceversa; en el caso de las lombrices es reconocido su efecto sobre la estructuración del suelo. Otros animales como roedores (ratas, topos y taltuzas) o cangrejos en suelos de manglar juegan un papel importantísimo en cuanto al drenaje y la aireación del suelo.

3.4. El hombre

Convencionalmente el hombre es incluido dentro del factor formador «organismos vivos» por más que algunos autores insisten en que debería ser tratado de manera separada como un sexto factor, lista que destacados cultivadores de la Ciencia del Suelo amplían considerablemente (Langhor, com. pers.). El papel del hombre en la formación del suelo no ha recibido hasta ahora la necesaria atención habiéndose estereotipado su papel, con énfasis ya en la degradación ya en la creación de nuevo suelo.

Estudios de polen y quemas indican que desde el mesolítico y neolítico y hasta el presente, el hombre ha alterado la cubierta vegetal y por ende la formación del suelo (Curtis, Courtney y Trudgill, 1976; League y Horn, 2000). La capacidad de modificación del hombre iniciada primero a la acción del fuego sobre la vegetación se ha ido ampliando considerablemente con el desarrollo tecnológico: pastoreo, laboreo del suelo, drenaje, riego, prácticas de fertilización, sistematización de terrenos, polders, encalado, fertilización química, movimientos de tierra, pesticidas, desinfección del suelo, roza y quema, introducción de organismos, etc.

En general se han adoptado posturas contrapuestas entre aquellos que han destacado el papel del hombre en la degradación del suelo en base a sólidas evidencias de casos de estudio (ver, por ejemplo, Buringh, 1970 o Hillel, 1991), frente a aquellos que han enfatizado, en general desde una óptica economicista, que los avances tecnológicos eran capaces de contrarrestar esta degradación. Otros autores se han centrado más en aquellos casos de creación de suelo: chiampas, camellones, bancales, *polders*, etc.

Como algunos ejemplos de degradación a gran escala, se estima que una de las causas de la desaparición de la cultura maya en América Central fue la erosión del suelo causada por labores de labranza, la quema y la roza, las terrazas, los

drenajes y los canales de irrigación (Olson, 1978). Otros ejemplos serían el colapso de las civilizaciones mesopotámicas debidos a la salinización y sedimentación (colmatación) de los sistemas de riego.

Como ejemplo de la magnitud de algunas prácticas con profunda influencia en las propiedades del suelo hay que citar las quemas. Así, por ejemplo, de los 4000 incendios forestales ocurridos en Centroamérica donde de 1990 a 1995 se quemaron más de 500 000 ha de bosque y, debido a la sequía provocada por el fenómeno de El Niño, el fuego destruyó más de 2,5 millones de hectáreas en 1998 (Observatorio del Desarrollo, 2002). En promedio, durante el período 1996-2001, para toda la región ocurren 17 484 incendios/año con una mayor incidencia de eventos en Nicaragua, Honduras y Guatemala, los países más secos y extensos de la región (Asociación Conservación de la Naturaleza, 2005).

El estudio de la génesis de los suelos desde la óptica de la acción del hombre ha ido ganando terreno (Burghardt et ál., 2000) y ello se ha ido reflejando en la cartografía y clasificación de los suelos (Wilding et ál., 2002; Kimble et ál, 1999; Dudal et ál., 1998; WRB, 2006).

Inicialmente la taxonomía americana consideró los horizontes superiores de *plaggen* y antrópico y dentro del subsuelo el horizonte agrícola (Soil Survey Staff, 1975). Además ya Fanning et ál. (1978) propusieron la necesidad de crear otros subgrupos de suelos para reconocer superficies cortadas con tractor (*Scalpic*), con influencia de desechos sanitarios (*Urbic*), formados de desechos de basura (*Garbic*) y derivados de residuos de minas (*Spolic*).

Hoy estas y otras propuestas han encontrado amplio reflejo en los sistemas taxonómicos, especialmente la denominada World Referente Base (IUSS Working Group WRB, 2006) donde se han creado los grupos de referencia de los Tecnosoles (suelos con predominio de materiales tecnológicos) y los Anthrosoles (suelos con marcados caracteres antrópicos) y dentro de estos los horizontes Irragrico, Anárquico, Anthric, Hortico, etc. También se han introducido calificadores como «scalic» por bancales cuyo interés es mayor por el concepto que por la precisión.

Los bancales o terrazas constituyen uno de los ejemplos más claros de la capacidad del hombre para, en un medio potencialmente adverso como son las áreas en pendiente, desarrollar una tecnología que permite el uso continuado del territorio. La extensión en el tiempo [en Perú 1700 años BP (Sandor et ál., 1995), siglo II Galicia (Macias, com. pers.); Norte Cataluña siglos XI (A. Serra, com. pers.)], en el espacio [desde Yemen, África Subsahariana, Oriente Medio, Mediterráneo, América (Donkin, 1979), etc.], así como las grandes superficies afectadas obligan a considerar en su debida importancia este tipo de suelo.

3.5. Relieve

El relieve lo forman las diferencias de nivel en la superficie terrestre, consideradas colectivamente. Este factor afecta a la formación del suelo a través de su aspecto u orientación respecto al norte, que influye en cuanto a la recepción de energía solar (congelamiento, descongelamiento), su pendiente o grado de inclinación, que afecta su forma y longitud, y su elevación o altura sobre el nivel del mar.

Cada tipo de relieve, afecta a la génesis del suelo de manera diferente, dependiendo no solo de su forma, sino también de la escala que se le considere. La mayoría de las leyendas fisiográficas de los mapas de suelos frecuentemente describen formas de relieve en un espacio definido, como una expresión de variaciones en macro y microrrelieve del terreno.

Desde el punto de vista edáfico, el relieve afecta en forma directa la formación del suelo, al hacer variar el clima y la hidrología, e indirecta cuando interfiere con las propiedades del suelo por sí mismas.

Efecto directo del relieve: El movimiento lateral del agua afecta a varias propiedades edáficas como la profundidad del suelo y el movimiento y deposición de iones solubles, fenómeno relacionado en muchos casos con la posición que ocupan las lateritas (Thomas, 1974) o determinados horizontes petrocálcicos (Porta et ál., 1998). El relieve produce también variaciones en el pH del suelo debido a la migración de sales, que tienden a acumularse en las depresiones y es responsable de los suelos mal drenados con los colores grises de zonas depresionales. Todos estos efectos de una u otra manera a su vez determinan el tipo de arcillas que se forme en cada posición fisiográfica.

Los gradientes altitudinales ligados a los relieves montañosos reproducen los efectos latitudinales sobre cortas distancias horizontales.

Efecto indirecto del relieve: Al variar la elevación del terreno, cambian las condiciones climáticas y con ellas los tipos de vegetación; debido a esto se producen suelos disímiles a partir de un mismo material parental. La mayoría de los cambios en tipo de suelo se deben a diferencias en temperatura, humedad, cantidad y tipo de residuos adicionados y a diferencias en poblaciones de micro y mesorganismos.

El relieve afecta la hidrología y, por tanto, las propiedades del suelo, por ejemplo el hidromorfismo se asocia a áreas con nivel freático elevado en áreas de poco relieve, así como por su efecto en el movimiento lateral del agua (solución del suelo) en el paisaje. En este sentido, el relieve también determina la capacidad de arrastre de materiales en las corrientes de agua o el de masas considerables de

materiales (deslizamientos) cuando las partículas transportadas se encuentran sobre su límite plástico.

3.6. Tiempo

El concepto tiempo, intangible como es, llevó varios siglos de evolución para consolidarse, internalizarse, perfeccionarse y cuantificarse apropiadamente. El pensamiento relacionado con el concepto tiempo se inicia con la necesidad del ser humano por conocer su posición en el cosmos, lo cual lleva a crear el concepto medieval de la Tierra como centro del Universo, finito y no más antiguo que la edad de los escritos hebreos (6 000 años). A partir de esta forma de entender el mundo, y en él al hombre, nacen otras ideas como el uniformitarismo (Hutton, Werner y Lyell), el catastrofismo y la teoría de la evolución orgánica (Lamarck y Darwin), dentro de las cuales se fundamenta la mayor parte de la estratigrafía geológica, la paleozoología y, por último, la evolución de las especies, incluyendo al hombre (Eiker, 1976). Más recientemente, renace el concepto de deriva de los continentes, el cual permite explicar con mayor precisión las razones de los cambios sufridos por la corteza terrestre a través del tiempo (Wilson, 1976).

Como resultado del proceso evolutivo así descrito, se reconocen las Eras Geológicas (p.ej., Paleozoico, Mesozoico, etc.) y dentro de ellas los Períodos Geológicos (p.ej., Cretácico, Terciario, Cuaternario, Holoceno, etc.), los cuales se miden en términos de millones de años. Las Formaciones Geológicas representan unidades litológicas descritas para cada región o país y representan una litología y edad y que necesariamente calzan en alguna Era y Período geológico de formación.

La edad de un suelo se refiere al momento en que los materiales parentales de una determinada superficie geomorfológica fueron puestos en superficie. Este simple concepto encuentra considerables dificultades de aplicación en campo por cuanto muchas de estas superficies reciben de manera más o menos regular continuadas aportaciones de materiales (eólicos, fluviales, coluviales,...) o procesos erosivos que las rejuvenecen constantemente.

Es muy importante no confundir la edad del suelo con la del material parental, ni tampoco con la del material subyacente con frecuencia poco meteorizado. Así en muchos estudios se mencionan materiales del Cámbrico, del Jurásico o del Terciario, con edades de varios millones de años, sobre los cuales se encuentran sedimentos del Holoceno, de los cuales se forma el suelo.

La intensidad con que uno o varios agentes formadores de suelo actúan sobre un determinado material, depende del factor tiempo. Bajo el clima más severo no se forma suelo a partir de una roca si no después de cierto periodo de tiempo. Por

ejemplo, las lavas recientes no tienen un suelo desarrollado, mientras que las lavas viejas sí lo tienen.

Las diferencias en tiempo de exposición del material parental no necesariamente conducen a tener suelos mal evolucionados, pues el desarrollo del perfil del suelo obedece a su velocidad de formación y de denudación. Sin embargo, los suelos más desarrollados de Sudamérica se encuentran sobre los escudos brasileño y guayanés (Yaalon, 1971), que son del Precámbrico.

Son varias las formas de estimar suelo-tiempo, entre ellas: a) alteración de estructuras de edad conocida (construcciones, tumbas, etc.), b) investigaciones de laboratorio (C^{14} , K/Ar, SiO_2 , R_2O_3), c) el grado relativo del desarrollo del perfil (Horizontes $C \rightarrow AC \rightarrow A(B)C \rightarrow ABC$) y d) estimaciones de formación a partir de eventos catastróficos (cenizas volcánicas, inundaciones, etc.).

Edad ecológica de un suelo

Buol et ál. (1982) introducen el concepto de edad ecológica de un suelo partiendo de una idea de Jenny (Jenny, 1941) de edad ecológica del suelo definida como aquella correspondiente al período durante el cual un proceso evolutivo se desarrolla (Gobat et ál., 2003). Así un suelo evoluciona en diferentes fases, desde su inicio hasta aquella en que las condiciones ambientales ya no lo modifican más; ejemplos serían la acumulación de materia orgánica en un suelo que a partir de un cierto momento ya no se incrementa o la iluviación de arcilla que avanza hasta un punto determinado y se detiene.

Ello entronca con conceptos más modernos de génesis de suelos como los modelos de Johnson et ál (1987) que explican por qué determinados suelos evolucionan de forma distinta a la prevista por los modelos unidireccionales.

Velocidad de formación de un suelo

La velocidad de formación del suelo es muy relativa aceptándose que hay suelos en los que se requieren 1,7 años y otros hasta 750 años para formar un centímetro de suelo. Los valores son entendibles si se considera la gran fluctuación de materiales parentales y la gama de condiciones ambientales de meteorización. En el caso de cenizas volcánicas (material no consolidado) en zonas tropicales (alta temperatura y humedad) es factible encontrar suelos totalmente desarrollados en menos de 2000 años, mientras que a partir de granitos en regiones templadas (baja temperatura), la formación del suelo requerirá de períodos de tiempo más largos.

Duchaufour (1977) menciona que la formación del horizonte A es mucho más rápida que la de los horizontes B y C, factor a considerar al estimar la edad del suelo. Sin embargo, en suelos orgánicos de origen aluvial o derivados de cenizas volcánicas, los horizontes subyacentes suelen ser más viejos y evolucionados que el horizonte A, debido a la continua deposición de materiales recientes.

Existen suelos formados hace mucho tiempo en condiciones quizás diferentes a las actuales, conocidos como paleosoles, los que se diferencian como: fósiles o enterrados, relictos o nunca enterrados y exhumados o desenterrados (Yaalon, 1971). En áreas de vulcanismo activo se encuentran perfiles policíclicos con varios suelos enterrados que bien podrían considerarse como paleosoles.

Las velocidades de formación de los suelos son muy variables, generalmente mucho más bajas de las admitidas sobre rocas duras, pero considerablemente superiores en materiales finos, no consolidados, con frecuencia ya preedafizados. No debe olvidarse que según Targulian (com. pers.) solo un 10% de la tierra fina se ha formado en el Holoceno.

4. Procesos formadores

El resultado de la meteorización y en función de los factores de formación de suelos, puede resumirse en situaciones particulares a lo que se conoce como procesos de formación, los cuales se dan en función de las pérdidas, las adiciones, las translocaciones y las transformaciones de materiales en el suelo considerado como un sistema abierto. Las pérdidas y adiciones ocurren tanto en solución como en suspensión y se refieren a los movimientos que producen dos tipos de suelo, uno que pierde y otro que gana el material que se transporta. Las translocaciones son movimientos de material restringidos dentro del mismo perfil y pueden ocurrir en suspensión o en solución. Las transformaciones suceden en un mismo horizonte del perfil y se refieren a los cambios de forma de una sustancia.

4.1. Pérdidas y adiciones

La lixiviación es el proceso por el cual se lavan los materiales solubles del perfil suelo, causando el enriquecimiento o adición con estos materiales, por lo general de aquellos suelos situados en las posiciones geomórficas más bajas o depresionales. Cuando el proceso de pérdida y adición ocurre en forma de suspensión, este se conoce como de erosión y acumulación, mecanismo responsable de que en algunas ocasiones la velocidad de formación del suelo sea menor que la de la denudación de la roca.

Ello conduce también a la formación de suelos con una gran potencia en sus horizontes: cumulic, pachic, fluventic. Un caso particular muy interesante lo constituye la adición de materiales eólicos (Busacka, 1998).

La adición de residuos orgánicos es otro caso particular de adición especialmente en bosques; como casos especiales podrían mencionarse los «suelos colgantes», los cuales se forman entre las copas de los árboles por residuos retenidos entre las ramas (Wilde, 1958), y por efecto del ser humano las adiciones de ceniza cuando se queman dichos residuos. Si la deposición de residuos en el piso del bosque es mucha y estos se acumulan debido a condiciones de reducción, el proceso se conoce como paludización y conduce a la formación de suelos orgánicos.

4.2. Translocaciones

Los procesos más conocidos son la eluviación y la iluviación, fenómenos que consisten en el paso de sustancias de un horizonte (eluviado) a otro subyacente (iluviado). Así se forman los horizontes eluviales A y E y los horizontes iluviales Bk, Bt y By (SSSA, 2001).

Cuando la precipitación es menor que la evapotranspiración dominan procesos como la calcificación o la gypsificación (Herrero et ál., 2000), mientras que el fenómeno contrario se conoce como decalcificación; una situación similar ocurre cuando se translocan sales más solubles que el yeso (salinización y desalinización) como sulfatos y cloruros de calcio, magnesio y potasio o la alcalización (solonización) y desalcalización (desolonización), si se translocan sales solubles de sodio (Knapp, 1979).

Cuando la precipitación domina sobre la evapotranspiración y los carbonatos son eliminados del solum, a menudo se presenta la migración en suspensión de arcilla, fenómeno conocido como lesivage. En algunas zonas depresionales, este mecanismo no funciona debido a la mezcla biológica y física de materiales de los horizontes superiores e inferiores, fenómeno llamado pedoturbación, el cual es importante cuando domina la montmorillonita.

Si la precipitación es mucho mayor que la evapotranspiración otras series de procesos son dominantes. La laterización (desilicación, ferralización, ferritización y alitización) es el proceso más común en los trópicos húmedos y consiste en la translocación de la sílice con la acumulación residual de hierro y aluminio.

Otro proceso se conoce como podsolización (silicación), en el cual ocurre una translocación de hierro y aluminio a través de la complexólisis, con acumulación de sílice.

4.3. Transformaciones

El proceso más general puede describirse como la descomposición de materiales, minerales u orgánicos y la síntesis o formación de nuevas partículas. En el caso de las partículas minerales se transforman partículas del tamaño de las arenas y del limo a arcillas. Con compuestos orgánicos ocurre la mineralización o descomposición de la materia orgánica y la humificación (transformación de desechos orgánicos a humus).

Con los residuos orgánicos puede ocurrir la maduración (*ripening*), o cambios biológicos, químicos y físicos que experimentan los suelos orgánicos cuando se drenan. El proceso de la humificación a menudo favorece la formación de sustancias oscuras en el horizonte A y al resultado se le conoce como melanización, fenómeno opuesto a la leucinización, causada por la desaparición de dichas sustancias.

Las variaciones en las formas de óxidos de hierro conducen a la rubefacción, o formación de colores pardos o rojos en el suelo, por liberación de hierro de minerales primarios, mientras que bajo condiciones anaeróbicas se produce una matriz gris azulada, con o sin motas amarillas, rojas o negras, fenómeno conocido como gleización.

4.4. Formación de coloides

La parte sólida coloidal del suelo está formada por compuestos cristalinos y amorfos de tres tipos: orgánicos, óxidos e hidróxidos y arcillas. La división es arbitraria, pues la interacción entre estas fases es más común que las fases por sí mismas. En algunos casos los sistemas coloidales se separan de acuerdo al tipo de carga dominante en (Theng, 1980): los de carga predominante permanente (esmetíticos) y los de carga variable (alofánico-haloisíticos, oxídico-caoliníticos y orgánicos).

Las características de los coloides modifican el sistema en que se encuentran ya que cuanto más pequeñas sean las partículas mayor es su influencia en las propiedades del suelo, tales como su plasticidad, la capacidad de intercambio de cationes, la superficie específica, la densidad aparente, etc.

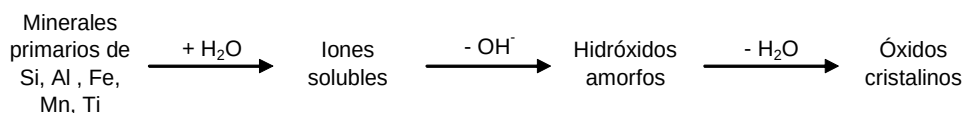
Arcillas: Los requerimientos para la formación de diferentes arcillas son específicos para cada una de ellas. Las arcillas tipo 2:1 requieren para su formación una concentración relativamente alta de sílice y por lo general magnesio. Las esmetitas son inestables bajo condiciones de alta concentración de iones hidronio (H_3O^+) y se autoprotegen al impedir un drenaje libre cuando se

expanden (época lluviosa), con lo que tienden a producir acumulación de sales en el sistema. Es frecuente encontrar concentraciones de calcio (concreciones y nódulos) en condiciones que favorecen la síntesis de montmorillonita. Las arcillas 1:1, requieren para su formación concentraciones relativamente iguales de sílice y aluminio, y un pH bajo. La síntesis de caolinita se facilita si el material es un filosilicato; a partir de feldespatos se favorece la formación de haloisita. Las arcillas amorfas, a menudo conocidas como alofana, se forman a partir de cenizas volcánicas en soluciones de pH neutro a básico y con condiciones de adecuada humedad; si el ecosistema es ústico los materiales amorfos se transforman rápidamente en haloisita y en condiciones depresionales donde se acumula sílice y magnesio en montmorillonitas. En la tabla 4 se incluye información referente a los principales tipos de arcilla y el ambiente (tipo de suelo).

Orden de suelo	Minerales de arcilla dominantes (elementos constitutivos)
Entisoles	Variable y mixta
Vertisoles	Montmorillonita (O, Si, Al), Ilita (O, Si, Al, K)
Andisoles	Alofán, Imogolita y Gibsita (O, Al, Si)
Inceptisoles	Variable y mixta
Aridisoles	Clorita (O, Si, Al, K, Mg, Fe), Mica, Ilita (O, Si, Al, K), Vermiculita (O, Si, Al, Mg), Interestratificados
Mollisoles	Ilita, Montmorillonita, Vermiculita, Clorita, Mica
Espodosoles	Ilita, caolinita (O, Si, Al), minerales interestratificados e integrantes 2:1-2:2, sesquióxidos
Alfisolos	Ilita, montmorillonita, caolinita, integrantes 2:1-2:2, clorita
Ultisoles	Caolinita, vermiculita, clorita, montmorillonita, integrantes 2:1-2:2, gibbsita, sesquióxidos
Oxisoles	Óxidos de hierro, aluminio (gibbsita), titanio, caolinita, oxialofán, integrantes 2:1-2:2

TABLA 4. Arcillas más importantes del suelo, su capacidad de expansión en agua y el medioambiente en que predominan (Besoain, 1985)

Óxidos e hidróxidos: Los principales óxidos e hidróxidos del suelo son de sílice, hierro y aluminio, aunque el titanio y el manganeso pueden ser de importancia en algunos casos. El siguiente esquema muestra el paso de minerales primarios a óxidos amorfos para producir óxidos cristalinos.



Sistemas coloidales orgánicos: El complejo orgánico del suelo es importante no solo desde el punto de vista del suelo sino también de fertilidad. Además de

los coloides existen residuos orgánicos y una biomasa activa que determina su formación de acuerdo a la siguiente reacción:



La acumulación de residuos orgánicos no coloidales, se logra al disminuir la velocidad de mineralización, la cual ocurre cuando hay baja temperatura, exceso de agua (falta de oxígeno) y los compuestos son resistentes a la descomposición. De otra manera estos materiales se transforman en coloides orgánicos del suelo (humus), que se pueden separar por su solubilidad en ácidos, bases o alcohol, en fracciones conocidas como huminas, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y ácidos himatomelánicos (Stevenson, 1965).

Otra clasificación de sustancias orgánicas coloidales se basa en su condición nutritiva y en el régimen hídrico de su formación. (tabla 5). En condiciones terrestres, se pueden acumular residuos ácidos como sucede en los bosques de coníferas donde se forma humus tipo mor. Al mejorar las condiciones nutritivas aumenta la actividad biológica y con ella la formación del humus tipo moder; el humus tipo mull se forma en suelos ricos en bases y con buena aireación.

Condición nutritiva	Regimen hídrico		
	Subhídrico	Semiterrestre	Terrestre
Distrofia	Dy	Turbera baja	Humus bruto (Mor)
Oligotrofia	Gytja	Turbera alta	Moder
Eutrofia	Sapropel	Anmoor	Mull

TABLA 5. Clasificación morfogenética del humus (Fassbender, 1975)

4.5. Zonas de neoformación

La neoformación, entendida como la formación de minerales secundarios, depende en último grado de la velocidad de meteorización, tal como se aprecia en la figura 7 y que algunos autores la zonifican a nivel mundial, lo que recuerda el concepto de tonalidad establecido en los primeros sistemas de clasificación (Marbut, 1927) y que se relaciona con las zonas climáticas y de vegetación del mundo.

La distribución o la abundancia relativa de los minerales de arcilla varía de acuerdo a los principios de Dokuchaiev, con los cinco factores que controlan la formación del suelo. Cada factor tiene efectos específicos de importancia sobre la mineralogía del suelo, de acuerdo a circunstancias particulares como sucede con el relieve, el cual define en gran parte el drenaje en un área (Besoain, 1985).

Como los materiales coloidales son una resultante de la evolución podológica, afectada por un sin número de variables, es muy difícil efectuar correlaciones pedomíneralógicas; sin embargo, existen especies que guardan estrecha correspondencia con procesos pedogenéticos como sucede con el alofán en suelos derivados de cenizas volcánicas bajo condiciones de humedad y buen drenaje (Andosoles), o la presencia de caolinita asociada a gibsita y sexquióxidos de hierro en Ultisoles y Oxisoles.

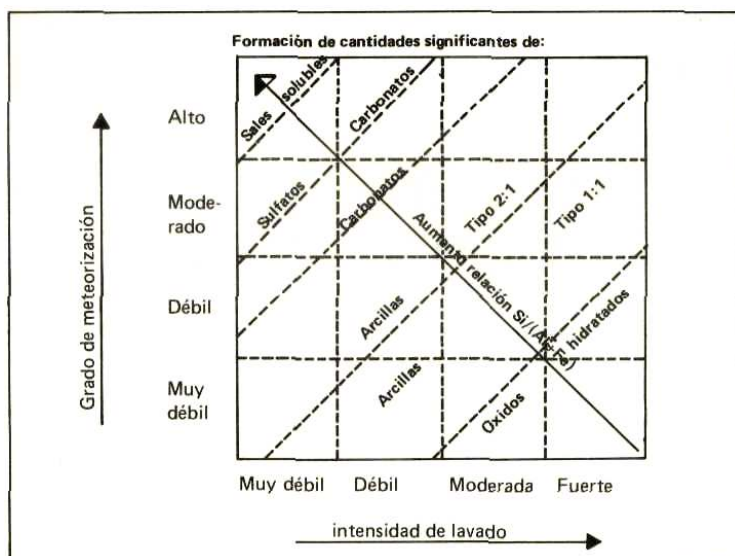


FIGURA 7. Acción conjunta de la meteorización y del lavado de bases en la neoformación (tomado de Crompton, 1962)

5. Variabilidad espacio-temporal de los suelos y manejo

La variabilidad de los suelos es una de las claves de su manejo y en ella se fundamentan las distintas formas de manejo dentro de un mismo agroecosistema. Las maneras de adaptar el manejo del suelo a sus características toman formas muy distintas: por unidades de manejo (parcelas), *site specific*, agricultura de precisión, etc.

La variabilidad del suelo tiene una doble componente: en el tiempo y en el espacio. Desde el punto de vista del manejo las características del suelo con una escala de variación temporal, pongamos de siglos, pueden ser tomadas como constantes aunque en esta consideración deben tomarse en cuenta factores como

la tecnología empleada (un horizonte petrocálcico –limitación mayor para el enraizamiento– puede tardar milenios en disolverse bajo riego, pero un «ripper» puede eliminarlo en unas horas) y también el clima (si es más lluvioso el Ca y Mg se lavan rápidamente; en cambio en climas áridos el CaCO_3 ni siquiera se lava).

La gran aportación de Dockuchaev, posteriormente formalizada por Jenny, consistió en que su enfoque de factores permite explicar las características del suelo de un determinado lugar en términos de estos factores ambientales, explica su capacidad de auto-organizarse,...

La Ciencia del Suelo, con un enfoque primario en sus inicios en la producción de alimentos, se focalizó en dos aspectos distintos según se tratara de Europa Occidental o del Nuevo Mundo u otros países con amplio potencial de poner en cultivo nuevas tierras. Mientras en Europa Occidental las posibilidades de incrementar los alimentos se basaban en incrementar los rendimientos, los trabajos de la Química Agrícola basados en Liebig recibieron una atención preferente, mientras los enfoques más edafológicos –cartografía y evaluación de suelos– no recibieron una atención notable hasta la década de los cuarenta del siglo pasado. Una situación exactamente opuesta se desarrolló en aquellos lugares donde había amplios recursos de suelos favorables para ser puestos en cultivo.

La variabilidad espacial ha merecido una gran atención entre la comunidad científica. Dicha variabilidad ocurre sobre escalas muy distintas: desde el agregado a escala continental.

También hay dos formas básicas de variabilidad: aquella que somos capaces de explicar y generalmente de un alcance mayor, relacionar con otras variables, que con frecuencia se denomina sistemática, y aquella que no somos capaces de explicar y de corto alcance que se conoce con el nombre de aleatoria (*random*) (Wilding et ál., 1983).

Las distintas características del suelo, de manera individual, presentan distinto grado de variabilidad (distancia, CV) y lo mismo es válido para los tipos de suelo.

La importancia de los factores formadores, en la variabilidad espacial de los suelos es dependiente de la escala. Así el clima y la geomorfología se manifiestan a escala de paisaje (Rey Benayas et ál., 2004) y sin embargo en una pequeña unidad de terreno (p.ej., un fondo de valle) puede incluir diferentes características topográficas así como un mosaico de diferentes texturas o composición química.

La variabilidad, como ya se ha mencionado antes, se produce sobre escalas de continentes, regiones, paisajes y también sobre laderas (catenas) o parcelas.

La cartografía de suelos ha sido el principal instrumento para abordar esta variabilidad espacial. La escuela americana –suelos similares– se preocupa del manejo; la europea (Manual 1/250) utiliza otros conceptos (SMU, TU,...).

La variabilidad espacial sobre cortas distancias, referida como aleatoria con frecuencia, está ligada con gran frecuencia al material originario, aunque puede haber también otras causas como las biológicas (p.ej., termiteros, caída de árboles), u otras formas antrópicas (bancales, gilgai, suelos poligonales).

Por el contrario, las sistemáticas se producen sobre largas distancias, ligadas a cambios climáticos y del factor covariante, la vegetación; el relieve contribuye a introducir variabilidad pero es de un rango superior al de la parcela.

La cartografía de suelos, como ciencia que describe la distribución de los suelos, se basa, de acuerdo con Hudson (1992) en el paradigma del modelo suelo-paisaje, cuyo fundamento conceptual es el enfoque factorial (Porta et ál., 2003) que desarrolló Jenny (1941). Dicho concepto es aplicable a cualquier escala cartográfica, pero donde es especialmente resolutivo es a escalas 1/15.000 y menores; a escalas mayores –cuyo interés para el manejo de suelos es muy elevado– el paso de la variabilidad aleatoria (desconocido o inexplicado) hace dicho enfoque menos atractivo.

El desarrollo de las tecnologías de la información y comunicación, juntamente con el de multitud de sensores (remotos y próximos) han propiciado, al igual que en otros sectores de la vida humana, grandes cambios en el área de la cartografía de suelos. Lo que inicialmente fue la digitalización de mapas (mapas de papel digitalizados) ha ido evolucionando hasta convertirse en lo que se conoce como cartografía digital de suelos (Lagacherie et ál., 2007) que es capaz de producir información continua y con el error asociado. Dichas metodologías carecen hoy por hoy de una estructura intelectual y operacional generalmente aceptada, si bien se han producido valiosos intentos para formalizarlas (Lagacherie et ál., 2007) y en ellos se plantea integrar todas las metodologías matemáticas, estadísticas, informáticas, etc., desarrolladas hasta ahora.

Es muy interesante destacar que una de las herramientas que ha ido emergiendo es el denominado modelo Scorpan (McBratney et ál., 2003) parecido en su formulación al modelo de Jenny pero que a diferencia de aquel que es explicativo el Scorpan es predictivo; conceptualmente ambos descansan, sin embargo, en un mismo fundamento, lo que refuerza el interés por elucidar la génesis del suelo para conocer la distribución de sus propiedades como herramienta de manejo.

6. Literatura citada

ALVARADO A. Y RAIGOSA J. (eds.). 2006. Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. Quito, Ecuador. Instituto Internacional de la Potasa. 335 p.

- ASOCIACIÓN CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA. 2005. Assessing linkages between agriculture and biodiversity in Central America: historical review and future perspectives. San José, Costa Rica. 140 p.
- BERRY L.G. Y MASSON B. 1959. Mineralogy, concepts, descriptions, determinations. San Francisco, California. W.H. Freeman and Co. 630 p.
- BESOÁIN E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 1205 p.
- BIROT P. 1962. Tratado de geografía física general. Barcelona, España. Vicens-Vives. 403 p.
- BOCKHEIM J.G. Y GENNADIYEV A.N. 2000. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. *Geoderma* 95: 53-72. Elsevier Science.
- BOHN H.L., MCNEAL B.L. Y O'CONNOR G.A. 1985. Soil chemistry. 2nd edition. Wiley Interscience. Nueva York. 341 p.
- BOLT G.H. Y BRUGGENWERT M.G.M. (eds.). 1978. Soil chemistry A. Basic Elements. Developments in Soil Science 5A. Elsevier Scientific Publishing. Amsterdam. 281 p.
- BRONGER A. Y CATT A. 1989. Paleosols: problems of definition, recognition and interpretation, 1-7. En: Bronger A. y Catt A. (eds.). *Paleopedology: nature and application of paleosols*. Catena: supplement 16. Cremlingen-Destedt. 232 p.
- BUOL S.W., HOLE F.D. Y MCCRAKEN R.J. 1981. Soil genesis and classification. Ames, Iowa. Iowa State University Press. 406 p.
- BURGHARDT W. Y DORNAUF C. (eds.). 2000. Proceedings, vol. III. The soil quality and problems: What shall we do? First International Conference on Soils of Urban, Industrial, Traffic and Mining Areas. University of Essen. 1098 p.
- CROMPTON E. 1962. Soil formation. *Outlook of Agriculture*. 3: 209-218.
- CURTIS L.F., COURTNEY F.M. Y TRUDGILL S. 1976. Soils in the British Isles. London, England. Longman Group Ltd. 364 p.
- DOBOS E., CARRÉ F., HENGL T., REUTER H.I., TÓLH G. 2006. Digital Soil Mapping as a support to production of functional maps. EUR 22123 EN. Office for Official Publications of the European Communities. Luxemburg. 68 p.
- DONKIN R.A. 1979. Agricultural Terracing in the Aboriginal New World. Viking Fund publications in anthropology, n° 56. Arizona. 196 p.
- DRIESSEN P., DECKERS J. Y NACHTERGAELE F. (eds.). 2001. Lecture notes on the major soils of the world. FAO. Roma. 16 p.
- DUCHAUFOUR P.H. 1977. Pédologie. Pédogenese et classification. París, Francia. Masson. 477 p.
- DUDAL R., NACHTERGAELE F.O. Y PURNELL M.F. 1998. Musings about «Anthropogenic soils»: Tai del Convengo Della Societa Italiana Della Scienza del Suolo, Napoli, Ischia. Università di Napoli Federico II, Naples, Italy.
- , 2002. The human factor of soil formation. Paper presented at 2002 IUSS Meeting, Bangkok, Thailand.
- EICHER D.L. 1976. Geologic time. Second Edition. New Jersey, USA. The Prentice-Hall Foundations of Earth Science Series. 150 p.

- ELÍAS F. Y CASTELLVÍ F. (coord.). 2001. *Agro-meteorología*. 2.^a ed. Madrid, España. Mundi-Prensa. 517 p.
- ESPEJO R. 1985. The ages and soils of two levels of «raña» surfaces in Central Spain. *Geoderma*, 35: 223-239.
- FANNING D.S., STEIN C.E. Y PATTERSON J.C. 1978. Genesis and classification of highly man influenced soils. In. 11th. Inter. Congr. Soil. Sc. Edmonton, Canada. 8 p.
- FASSBENDER H.W. 1975. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Turrialba, Costa Rica. IICA. 398 p.
- FERNÁNDEZ F.G., JOHNSON K.D., TERRY R.E., NELSON S. Y WEBSTER D. 2005. Soil Resources of the Ancient Maya at Piedras Negras, Guatemala. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 2020-2032. Madison WI. USA.
- FORSYTHE W. 2002. Parámetros ambientales que afectan la temperatura del suelo. *Agronomía Costarricense* 26(1): 43-62.
- GOBAT J.M., ARAGNO M. Y MATTHEY W. 2003. *Le Sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols. Deuxième édition revue et augmentée. Gérer l'environnement n° 14*. Lausanne. 569 p.
- GOLDICH S.S. 1938. A study in rock weathering. *Journal of Geology* 46: 17-58.
- HARDY F. 1970. *Suelos tropicales. Pedología tropical con énfasis en América*. México D.F., México. Herrero Hermanos Suc. S.A. 334 p.
- HERRERO J. Y PORTA J. 2000. The terminology and the concepts of gypsum-rich soils. *Geoderma* 96: 47-61. Elsevier B.V.
- HILLEL D. 1991. *Out of the earth: civilization and the life of the soil*. Nueva York. 321 p.
- HOLDRIGE L.R., GRENKE W.C., HATHEWAY W.H., LINAG T. Y TOSI, J.A. 1971. *Forest environments in tropical life zones: a pilot study*. Pergamon Press. Great Britain. 741 p.
- HUDSON, B.D. 1992. The Soil Survey as Paradigm-based Science. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:836-841.
- HUGGETT R.J. 1998. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *Catena* 32: 155-172. Elsevier Science B.V. Oxford, UK.
- IKAWA I. 1978. Occurrence and significance of climatic parameters in the soil taxonomy. In. Swindale, L.D. (ed.). *Soil-resource data for agricultural development*. Honolulu, Hawaii. University of Hawaii. pp. 21-27.
- IUSS Working Group WRB. 2006. *World reference base for soil resources 2006: 2nd edition. World Soil Resources Report n° 103*. FAO, Roma. 128 p.
- JACKS G.V. 1953. Organic weathering. *Science Progress*. 41: 301-305.
- JACKSON M.L. Y SHERMAN G.D. 1953. Chemical weathering of minerals in soils. *Advances in Agronomy* 5: 219-318.
- JENNY H. 1941. *Factors in soil formation*. New York. McGraw Hill. 281 p.
- JOHNSON D.L., WATSON-STEGNER D. Y JOHNSON D.N. 1987. Proisotropic and proanisotropic processes of pedoturbation. *Soil Sci.* 143: 278-292.
- KNAPP B. 1979. *Soil processes*. London, England. George Allen and Unwin. 72 p.
- KIMBLE J.M., AHRENS R.J. Y BRYANT R.B. 1999. Classification, correlation and management of Anthropogenic Soils, *Proceedings*. Nevada and California,

- September 21-October 2, 1998. USDA-NRCS, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- LAGACHERIE P. Y MCBRATNEY A.B. 2007. Spatial information systems and spatial soil inference systems: perspective for digital soil mapping, pp 3-22. En: Lagacherie P., McBratney A.B. y Voltz M. (eds.). Digital Soil Mapping. An introductory perspective. Developments in Soil Science, vol. 31. Elsevier. 600 p.
- LEAGUE B.L. Y HORN S.P. 2000. A 10 000 year record of Páramo fires in Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology* 16:747-752.
- LEGROS J.P. 2006. Mapping of the soil. Translated from French by V.A.K. Sarma. Enfield, New Hampshire. Science Publishers. 411 p.
- MARBUT C.F. 1927. A Scheme of soils classification. Proc. And Papers, 1 st. Internacional Congreso of Soil Science. Washington 4: 1-31.
- MARSHALL C.E. 1977. The physical chemistry and mineralogy of soils. Vol II: Soils in place. Toronto, Canadá. A Wiley-Interscience Publ. 313 p.
- MARTINI S.A. 1969. Algunas consideraciones sobre los suelos de América Central con referencia especial al desarrollo del trópico húmedo. *Fitotecnia Latinoamericana* 6(1): 127-147.
- MCBRATNEY A.B., MENDONÇA M.L. Y MINASNY B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117 (2003) 3-52. Elsevier B.V.
- MILLER A.J., AMUNDSON R., BURKE I.C. Y YONKER C. 2004. The effect of climate and cultivation on soil organic C and N. *Biogeochemistry* 67: 57-72. Netherlands.
- NETTLETON W.D. (ed.). 1991. Occurrence, characteristics, and genesis of carbonate, gypsum, and silica accumulations in soils. Soil Science Society of America, Special publication; n ° 26. Madison WI. 149 p.
- OBSERVATORIO DEL DESARROLLO, Universidad de Costa Rica. 2002. Naturaleza, gente y bienestar: Mesoamérica en cifras. San José, Costa Rica. 39 p.
- OLSON G.W. 1978. Effect of activities of the ancient maya upon some of the soils in Central América. In: 11th. Inter. Congr. Soil. Sc. Edmonton, Canadá. 11 p.
- PATON T.R. 1978. The formation on soil material. London, England. George Allen and Unwin Ltd. 143 p.
- PORTA J. 2009. Quantification of Land Degradation Stress: an overview. Faz Cano A., Mermut A.R., Arocena J.M. y Ortiz R. (eds.). *Advances in GeoEcology* 40, 163-176.
- PORTA J., LÓPEZ-ACEVEDO M. Y ROQUERO C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3.^a edición. Mundi-Prensa. Madrid. 960 p.
- REY BENAYAS J.M., GARCÍA SÁNCHEZ-COLOMER M. Y ESCUDERO A. 2004. Landscape and field-scale control of spatial variation of soil properties in Mediterranean montane meadows. *Biogeochemistry* 69: 207-225. Netherlands.
- ROUGERIE G. 1960. Le façonnement actual des modèles en Cote D'Ivoire forestière. Dakar. Mmem. Inst. Française Afrique Noire. 58. 542 p.
- RUHE R.V. 1975. Geomorphology, Geomorphic Processes and Surficial Geology. Houghton Mifflin, Boston, MA.
- SÁNCHEZ P.A. 1976. Properties and management of soils in the tropics. New York. Willey-Interscience. 618 p.

- SANDOR J.A. Y EASH N.S. 1995. Ancient Agricultural Soils in the Andes of Southern Peru. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 170-179.
- SANDOR J.A., BURRAS C.L. Y THOMPSON M. 2005. Human impacts on soil formation. In: D. Hillel (ed.) *Encyclopedia of soils in the environment*, vol. 1, pp. 520-532. Elsevier Ltd., Oxford, UK.
- SCHAETZL R. Y ANDERSON S. 2005. *Soils: Genesis and geomorphology*. Cambridge University Press. New York. 817 p.
- SCHLESINGER W.H. 1997. *Biogeochemistry: An analysis of global change*. 2nd ed. Academic Press. California, USA. 588 p.
- SIMON J.L. 1996. *The ultimate resource 2*. USA. 734 p.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. 1991. Spatial variabilities of soils and landforms. Special publication; n.º 28. Mausbach M.J. y Wilding L.P. (ed.). Madison WI. 270 p.
- , 1994. Factors of Soil Formation: A fiftieth anniversary retrospective. Special publication; n.º 33. Amundson r., Harden J., Singer, M., Luxmoore R. (eds.). Madison WI. 160 p.
- , 1998. Quantifying Soil Hydromorphology. Special publication; n.º 54. Rabenhorst M.C., Bell J.C. y McDaniel P.A. (eds.). Madison WI. 258 p.
- , 2001. *Glossary of Soil Science Terms*. Madison WI. 140 p.
- SOIL SURVEY STAFF. 1975. *Soil Taxonomy. A basic system of soils classification for making and interpreting soil surveys*. Washington, USDA-SCS. 330 p.
- , 2006. *Keys to Soil Taxonomy*. Tenth edition. Washington, USDA-NRCS. 332 p.
- STEVENSON F.J. 1965. Gross chemical fractionation of organic matter. In: Black C.A. ed. *Methods of soil analysis, Part 2. Agronomy Series No. 9*. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy, pp 1409-1421.
- THENG B.K.G. (ed.). 1980. *Soils with variable charge*. Palmertston North, New Zealand. New Zealand Society of Soil Science. 448 p.
- THOMAS M.F. 1974. *Tropical geomorphology. A study of weathering and land form development in warm climates*. Essex, Great Britain. The Anchor Press Ltd. 332 p.
- , 1994. *Geomorphology in the tropics: A study of weathering and denudation in low latitudes*. John Wiley and Sons. West Sussex, England. 460 p.
- WILDE S.A. 1958. *Forest soils*. New York. The Ronald Press Co. 537 p.
- WILDING L.P. Y AHRENS R.J. 2002. Soil Taxonomy: Provisions for anthropogenically-impacted soils. En: Micheli E., Nachtergaele F.O., Jones R.J.A. y Montanarella L. (eds.). *Soil Classification 2001. European Soil Bureau Research Report n.º 7*, EUR 20398 EN, Luxembourg. 248 p.
- WILDING L.P. Y DREES L.R. 1983. Spatial variability and pedology. In: Wilding L.P., Smeck N.E. y Hall G.F. (eds.). *Pedogenesis and soil taxonomy. Developments in soil science 11A. I. Concepts and interactions*. Chapter 4: 83-116.
- WILSON J.T. 1976. *Continents adrift and continents aground*. San Francisco, USA. W.H. Freeman and Co. 230 p.
- YAALON D.H. (ed.). 1971. *Paleopedology. Origin, nature and dating of paleosols*. Jerusalem. Israel. Keter Press. 350 p.

I.2. Información de suelos y principios del manejo de suelos

1. Introducción

Un agricultor que sea consciente de los recursos de que dispone para realizar su trabajo, ya conoce las principales características diferenciales de sus suelos. Sin embargo, es necesario unificar criterios y recopilar la información de una manera ordenada para que pueda ser utilizada por la mayor cantidad de personas; esta es la tarea de la cartografía de suelos.

Los objetivos que se pretende conseguir en este capítulo son:

- Formar usuarios de información de suelos para:
- Interpretar un mapa de suelos
- Conocer el marco en el que la transferencia de tecnología es factible
- Evaluar los riesgos e impactos esperables tras una transformación
- Hacer propuestas útiles a los que toman decisiones

2. Calidad de los mapas de suelos

Los tres parámetros que nos van a dar más información sobre la calidad de un mapa de suelos son:

- Los objetivos del mapa
- La escala de representación
- La densidad de observaciones (n.º de observaciones/100 ha de superficie real)

Estos parámetros están interrelacionados, lo que quiere decir que al variar uno deben (o deberían) variar los otros dos. La forma más lógica de iniciar la realización de un mapa de suelos es determinar los objetivos para los que se quiere el mapa, a partir de esto elegir la escala de representación y entonces determinar el número y tipo de observaciones. Para conseguir un mapa de una calidad aceptable, las relaciones que se deben cumplir entre estos parámetros se muestran en la tabla 1.

<i>Tipo de cartografía</i>	<i>Escalas</i>	<i>Unidad taxonómica</i>	<i>Densidad de observaciones</i>	<i>Finalidad del mapa</i>
Intensidad muy alta (Muy detallado)	Mayor de 1:10.000	Series	100-500 observaciones /100 ha	Estudios especiales para planificación Fincas experimentales
Alta intensidad (Detallado)	1:10.000 1:25.000	a Series	10-40 observaciones /100 ha	Diseño y redacción de proyectos Planes de conservación de suelos Estudios a nivel de finca
Media intensidad (Semidetallado)	1:25.000 1:100.000	a Familia Series	0,1-8 observaciones /100ha	Evaluación económica Estudios de viabilidad de alternativas
Baja intensidad (Reconocimiento)	1:100.000 1:250.000	a Subgrupos Grandes grupos		Estudios de previabilidad Planificación local
Exploratorio	1:250.000 1:1.000.000	a Grandes grupos		Inventario de recursos Planificación regional

TABLA 1. Relaciones entre la intensidad de la cartografía, determinada por la finalidad del mapa, la escala y la densidad de observaciones (adaptado de Porta et ál., 1999)

La diferenciación entre unidades cartográficas y unidades taxonómicas está claramente descrita en Van Wambeke y Forbes (1985). La *unidad cartográfica* es el conjunto de todas las delineaciones de suelo que están identificadas por un símbolo único, un color, un nombre u otra representación. La *unidad taxonómica* es un concepto abstracto que acepta como miembros a todos los suelos que tienen una propiedad o conjunto de propiedades determinadas.

La jerarquía de unidades taxonómicas en Soil Taxonomy (SSS, 1975) se distribuye en un modelo piramidal que en la cúspide está formado por el nivel jerárquico menos preciso (Orden) y conforme se va concretando más información aumenta el número de unidades taxonómicas en subórdenes, grupos, subgrupos, familias y series (figura 1)

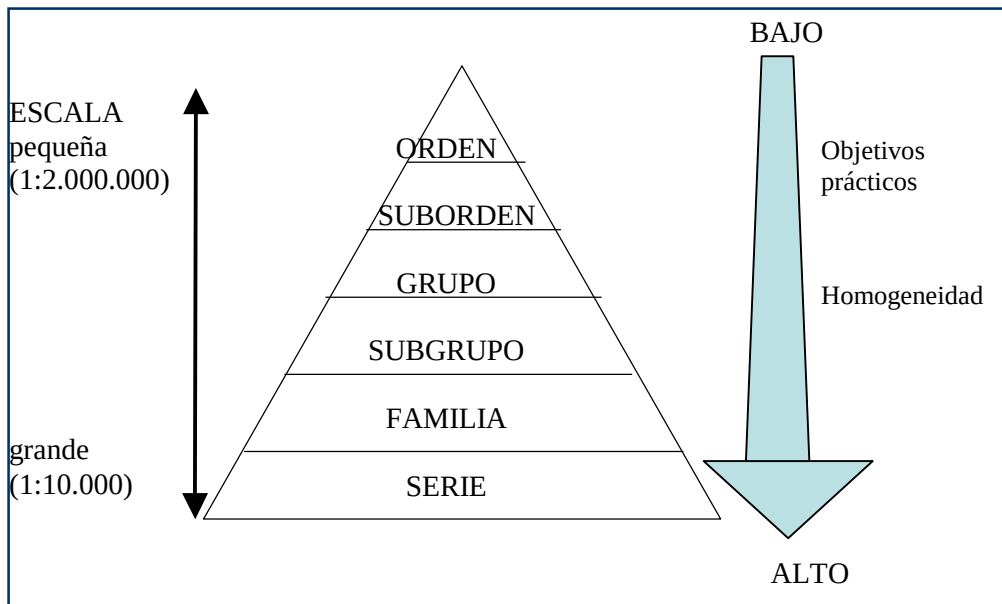


FIGURA 1. Estructura jerárquica de las unidades taxonómicas

Las series de suelos constituyen el nivel jerárquico más bajo de la taxonomía de suelos, y se utilizan en cartografías detalladas o semidetalladas. Una serie es una unidad de clasificación integrada por un conjunto homogéneo de suelos muy parecidos entre sí, desarrollado sobre un mismo material originario y cuyas características son similares, admitiendo una variación de estas características dentro de un intervalo definido.

Hay otros dos parámetros que hacen disminuir la calidad de un mapa, que son la presencia de impurezas y la precisión en la localización de los límites entre unidades.

En un mapa de suelos las impurezas hacen referencia a la presencia de tipos de suelos diferentes a los que dan nombre a la unidad. Las impurezas pueden ser de suelos símiles, es decir, semejantes en la mayoría de las propiedades utilizadas como criterio y que presentan interpretaciones parecidas para los usos más comunes. En este caso, al no tenerla en cuenta, los errores que se cometen en la interpretación de los mapas no tienen casi incidencia. También puede haber inclusiones de suelos disímiles, es decir, que tienen propiedades diferentes del suelo que da nombre y se representa en la unidad. En este caso las predicciones que se hagan para esa unidad cartográfica tendrán poca validez.

Los errores más comunes en la utilización de mapas de suelos son:

- No tener en cuenta la presencia de suelos disímiles.

- Considerar que los límites de las unidades son tan abruptos y precisos como se muestran en el mapa.
- Ampliar la escala del mapa sin aumentar el número de observaciones.

3. Propiedades de los suelos relevantes en un mapa

Las propiedades de los suelos que más nos van a interesar van a depender del uso que esté previsto tenga el suelo. Para usos agrícolas las características de los suelos que se consideran más importantes son (Porta et ál, 1999): profundidad efectiva del suelo, textura, drenaje, pedregosidad/elementos gruesos, salinidad, sodicidad, presencia de carbonato, presencia de yeso, compacidad,...

Para usos no agrícolas, concretamente usos en ingeniería civil, las propiedades más relevantes son (SSS, 1983): granulometría, presencia de freático, presencia de sulfatos, encharcamiento, permeabilidad, pedregosidad,...

En este apartado se describirán los criterios que se utilizan para definir las principales propiedades de los suelos para uso agrícola, haciendo especial énfasis en la manera de identificar estas propiedades en un mapa de suelos a escala detallada.

3.1. Profundidad del suelo

La profundidad efectiva de un suelo es aquella hasta la cuál pueden penetrar las raíces sin excesiva dificultad. Los criterios de clasificación propuestos por Herrero et al (1993) se muestran en la tabla 2.

<i>Clase</i>	<i>Profundidad efectiva (cm)</i>
Muy superficiales	< 20
Superficiales	20-40
Moderadamente profundos	41-80
Profundos	81-120
Muy profundos	>120

TABLA 2. Criterios de profundidad efectiva (Herrero et al., 1993)

Esta característica del suelo va a ser condicionante de su productividad, por lo que cuanto más condicionante sea para los cultivos, antes se tendrá en cuenta su descripción en la clasificación; así la presencia de una capa dura e impenetrable (contacto lítico) a poca profundidad se reflejará en la clasificación a nivel de subgrupo (p.ej., Xerorthent lítico), mientras que si la capa condicionante se presenta a la misma profundidad pero no está formada por una material tan impenetrable se reflejará en la familia textural superficial.

Cuando la profundidad efectiva del suelo no es tan condicionante, solamente quedará constancia de este parámetro en la descripción de la serie.

3.2. Textura

Como se ha descrito con anterioridad, la textura es la proporción entre los tamaños de las partículas. De forma simplificada se muestran en la tabla 3 algunas de las familias texturales descritas en Soil Taxonomy.

<i>Clase</i>	<i>Características en la sección control</i>
Arenosa	Textura arenosa o arenoso-franca
Franco gruesa	15% o más de arena y menos del 18% de arcilla
Franco fina	15% o más de arena y del 18 al 35% de arcilla
Limoso gruesa	Menos del 15% de arena y menos del 18% de arcilla
Limoso fina	Menos del 15% de arena y del 18 al 35% de arcilla
Fina	Del 35 al 60% de arcilla
Muy fina	Más del 60% de arcilla

TABLA 3. Algunas familias texturales descritas en Soil Taxonomy (SSS, 1999)

Como en el caso anterior, cuanto más condicionante para el desarrollo de los cultivos sea la clase textural de un suelo, aparecerá en un nivel jerárquico superior de la clasificación; así un suelo de textura arenosa o arenoso-franca en toda la sección control de clases texturales, se clasifica a nivel de suborden como Psamment. Los contrastes texturales debidos a la acumulación de arcilla iluviada se corresponden con el carácter pale- a nivel de grupo.

Si los condicionantes no son tan severos, la clase textural de la sección control se describirá en la familia textural. Al ser la textura del horizonte superficial una propiedad más fácilmente alterable por procesos de erosión o de acumulación en superficie, esta característica queda descrita en la fase de serie.

3.3.- Drenaje

A pesar de que el drenaje de un suelo tanto interno como externo es una propiedad muy determinante en las transformaciones en regadío, se refleja de manera poco precisa en las unidades de un mapa de suelos. Cuando los problemas de drenaje son severos se incluyen con el carácter aquíco a nivel de suborden o de subgrupo en función de la severidad. Si este carácter aquíco no llega a manifestarse, la clase de drenaje solamente se reflejará en la descripción de la serie, siempre y cuando se haya decidido incorporar esta característica. Los criterios de interpretación de la clase de drenaje propuestos por Herrero *et al*, (1993) se muestran en la tabla 4.

<i>Clase</i>	<i>Manchas de óxido-reducción</i>
Excesivamente drenados	Sin manchas
Bien drenados	Sin manchas antes de 100 cm
Moderadamente bien drenados	Entre 60 y 100 cm
Imperfectamente drenados	Antes de 60 cm y colores grises entre 60 y 100 cm
Escasamente drenados	Colores grises de reducción antes de 60 cm

TABLA 4. Criterios de clase de drenaje (Herrero et al., 1993).

3.4. Pedregosidad superficial y elementos gruesos

La presencia de elementos gruesos en la superficie del suelo define la pedregosidad superficial, que dificulta el laboreo del terreno, la siega y provoca problemas en las siembras de precisión. Cuando los elementos gruesos se encuentran en el perfil del suelo pueden tener un efecto negativo al disminuir la capacidad de retención de agua y nutrientes para un determinado volumen de suelo.

La lectura de esta característica del suelo en un mapa detallado de suelos se hará en la familia textural que presentará el adjetivo «esquelética» cuando la proporción de elementos gruesos en la sección control supere el 35%; la pedregosidad superficial podrá quedar reflejada en la descripción de la serie.

3.5. Salinidad

La salinidad de un suelo se mide con la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada: Cuando aumenta influye negativamente en el desarrollo de los cultivos, porque disminuye el potencial osmótico y dificulta la absorción de agua por la plantas (sequía fisiológica), además del posible efecto tóxico en especies sensibles. Los criterios de salinidad utilizados por Soil Survey Division Staff (1993) se muestran en la tabla 5.

<i>Clase</i>	<i>CEs (dS/m)</i>
No salino	< 2
Muy ligeramente salino	2-4
Ligeramente salino	4-8
Moderadamente salino	8-16
Fuertemente salino	>16

TABLA 5. Criterios de fases de salinidad (SSS, 1993)

En clasificación de suelos, cuando las condiciones salinas son extremas dan lugar a un horizonte sálico que se refleja a nivel de orden (Aridisoles), si la presencia de sales no llega a este extremo, se refleja en las fases salinas.

3.6. Sodicidad

La sodicidad de un suelo está determinada por la relación de adsorción de sodio (RAS o SAR en terminología inglesa). Cuando la proporción de sodio en el complejo de cambio es elevada provoca la dispersión de las arcillas con desestructuración del suelo, lo que dificulta el movimiento del agua. La tabla 6 muestra los criterios de sodicidad utilizados por Soil Survey Division Staff (1993).

<i>Clase</i>	<i>RAS</i>
No sódico	< 8
Ligeramente sódico	8-13
Sódico	13-25
Fuertemente sódico	>25

TABLA 6. Criterios de fases de sodicidad

En clasificación de suelos, cuando las condiciones sódicas son extremas dan lugar a un horizonte sódico que se refleja a nivel de subgrupo (Natri-), si la presencia de sodio no llega a este extremo, se refleja en las fases sódicas.

3.7. Presencia de carbonato cálcico

La presencia de acumulaciones de carbonato en un suelo está relacionado con la existencia de este componente en el material originario de los suelos y con el régimen hídrico del suelo. Este componente da unas características determinadas a un suelo que condicionarán los cultivos que se establezcan: el pH será moderadamente básico o más alto y esto influirá en la movilidad del resto de aniones y cationes del suelo.

En clasificación, la presencia de acumulaciones secundarias de carbonato cálcico lleva a la determinación de un horizonte cálcico que, entre otros horizontes diagnóstico, establece la pertenencia de este suelo al orden de los Inceptisoles.

3.8. Presencia de yeso

La presencia de acumulaciones de yeso en un suelo está relacionada con la existencia de este componente en el material originario de los suelos y con el régimen hídrico del suelo. Este componente da unas características determinadas al suelo que condicionarán los cultivos que se establezcan: cuando el contenido de yeso es elevado disminuye la cantidad de retención de agua y nutrientes, por lo que las raíces eluden este tipo de material. Sin embargo, la presencia de yeso en

bajas cantidades evita el proceso de desestructuración frente a la acción del ión sodio.

En clasificación, la presencia de acumulaciones secundarias de yeso lleva a la determinación de un horizonte gípsico que, entre otros horizontes diagnóstico, establece la pertenencia de este suelo al orden de los Inceptisoles.

3.9. Compacidad

En relación a los cultivos, la compacidad de un suelo representa la resistencia que opone un suelo a la penetración de las raíces. Los criterios SINEDARES (CBDSA, 1983) para compacidad se muestran en el tabla 7. A pesar de ser una característica importante para el desarrollo de los cultivos, en un mapa de suelos solamente queda reflejada en los resultados de las propiedades físicas del suelo (densidad aparente) que, normalmente, se muestran en la descripción de las series.

<i>Clase</i>	<i>Descripción</i>
No coherente	El cuchillo penetra sin esfuerzo hasta el mango
Poco compacto	Se requiere un ligero esfuerzo para introducir el cuchillo
Compacto	El cuchillo solo penetra de forma parcial
Muy compacto	No se puede hundir el cuchillo más que unos pocos mm

TABLA 7. Criterios de compacidad (CBDSA, 1983)

4. Casos prácticos

A continuación, se presentan cuatro problemas agronómicos comunes y la forma de encontrar la información necesaria en un mapa de suelos detallado.

4.1. Estrés hídrico para el cultivo: Frecuencia de riego

En agricultura de regadío los parámetros de riego a determinar son el momento y la dosis de riego, que estarán condicionados por el sistema de riego de la parcela y del polígono de riego (sistema de distribución del agua de riego). Cuando se permite modificar el momento de riego, para mejorar la disponibilidad de agua para el cultivo se pueden utilizar parámetros edáficos que ayuden a determinar esa frecuencia de riego. La tabla 8 muestra las principales características del suelo que van a determinar esa frecuencia de riego, la manera de encontrar esas propiedades en un mapa de suelos y otras características interesantes que hacen falta para completar la información.

Características del suelo	Fuente de información	Características adicionales
Profundidad del suelo	Subgrupo, familia, serie	Del cultivo: Enraizamiento Necesidades hídricas del cultivo De la zona: Precipitación efectiva
Capacidad de retención de agua disponible para las plantas	Inferida a partir de la familia textural y de la textura del horizonte superficial (fase de serie)	
Ascenso freático	Profundidad de la capa freática: inferida a partir de la clase de drenaje	

TABLA 8. Características del suelo, del cultivo y de la zona necesarias para determinar la frecuencia de riego en una parcela

Los criterios (tabla 9) para la evaluación de la capacidad de retención de agua disponible (CRAD) son los que establece el Soil Conservation Service (1983).

Valoración	CRAD (mm/1.5 m)
Muy baja	< 64
Baja	64-127
Moderada	128-190
Alta	191-250
Muy alta	> 250

TABLA 9. Criterios de evaluación de la capacidad de retención de agua disponible (CRAD) según SCS (1983)

4.2. Aplicación de fertilizantes

La aplicación de fertilizantes, tanto orgánicos como inorgánicos, debe plantearse de manera que la mayor parte del producto llegue a su destino, que es el cultivo. Cuando se aplican dosis elevadas, se producen pérdidas de nutrientes que llegan a destinos diferentes del cultivo (freáticos, aguas superficiales,...) y causan daños ambientales principalmente por contaminación. El problema del exceso de fertilizantes se agrava cuando hay un excedente de residuos ganaderos que son aplicados al suelo. Para minimizar los efectos ambientales que pueda tener esta aplicación de fertilizantes es necesario planificar la fertilización (momento y dosis de aplicación) en función de las necesidades de los cultivos y del tipo de suelo (LAF, 1999). La tabla 10 muestra las principales características del suelo que van a determinar la dosificación, la manera de encontrar esas propiedades en un mapa de suelos y otras características interesantes que hacen falta para completar la información.

Características del suelo	Fuente de información	Información adicional
Profundidad del suelo	Subgrupo, familia, serie	Extracciones de nutrientes del cultivo Presencia de cursos freáticos y de agua superficial
Textura y CRAD	Familia textural y fase de serie	
Capacidad de intercambio catiónico	Caracterización analítica de la serie	
Conductividad hidráulica	Caracterización analítica de la serie	
Régimen pluviométrico	Grupo	

TABLA 10. Características del suelo, del cultivo y de la zona necesarias para determinar la fertilización

4.3. Estrés por salinidad

El proceso de salinización de un suelo puede tener un origen natural o estar acelerado por actividades antrópicas, principalmente las transformaciones en regadío y el riego. La presencia de sales más solubles que el yeso en el suelo va a determinar el tipo de cultivo que se puede establecer así como el manejo del cultivo y del riego. La tabla 11 muestra las principales características del suelo que van a determinar la salinidad de una unidad cartográfica, la manera de encontrar esas propiedades en un mapa de suelos y otras características interesantes que hacen falta para completar la información.

Características del suelo	Fuente de información	Información adicional
Conductividad eléctrica	Fases salinas	Tolerancia del cultivo Origen de las sales
Tipo de sales	Caracterización analítica de la serie	

TABLA 11. Características del suelo, del cultivo y de la zona necesarias para determinar la fertilización

4.4. Degradación de las propiedades físicas

Los principales procesos que provocan la degradación de las propiedades físicas de un suelo son la compactación y la creación de capas que dificulten el movimiento del agua. En zonas con pendiente, la reducción de la infiltración supone un aumento de la escorrentía superficial y de la pérdida de suelo y

nutrientes, cuyo efecto solamente se puede reducir con medidas de conservación de suelos. La tabla 12 muestra las principales características del suelo que están relacionadas con la degradación de las propiedades físicas del suelo, la manera de encontrar esas propiedades en un mapa de suelos y otras características interesantes que hacen falta para completar la información.

<i>Características del suelo</i>	<i>Fuente de información</i>	<i>Información adicional</i>
Estructura	Serie	Tipos y momento de laboreo
Materia orgánica	Caracterización analítica	
Compactación	Serie y caracterización analítica	
ESP (Porcentaje de sodio intercambiable) Estabilidad estructural Sellado	Analítica especial	

TABLA 12. Características del suelo y del manejo necesarias para determinar el riesgo de degradación de las propiedades físicas

5. Aplicaciones de los sistemas de información geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIGs) son conjuntos de programas estadísticos que permiten manejar información georreferenciada. A partir de una información (mapas o imágenes de satélite) se introduce la información a una base de datos que tiene dos componentes: uno temático y otro espacial; mediante sistemas de análisis y representación se puede recombinar esa información para obtener nuevos mapas e informes estadísticos (figura 2).

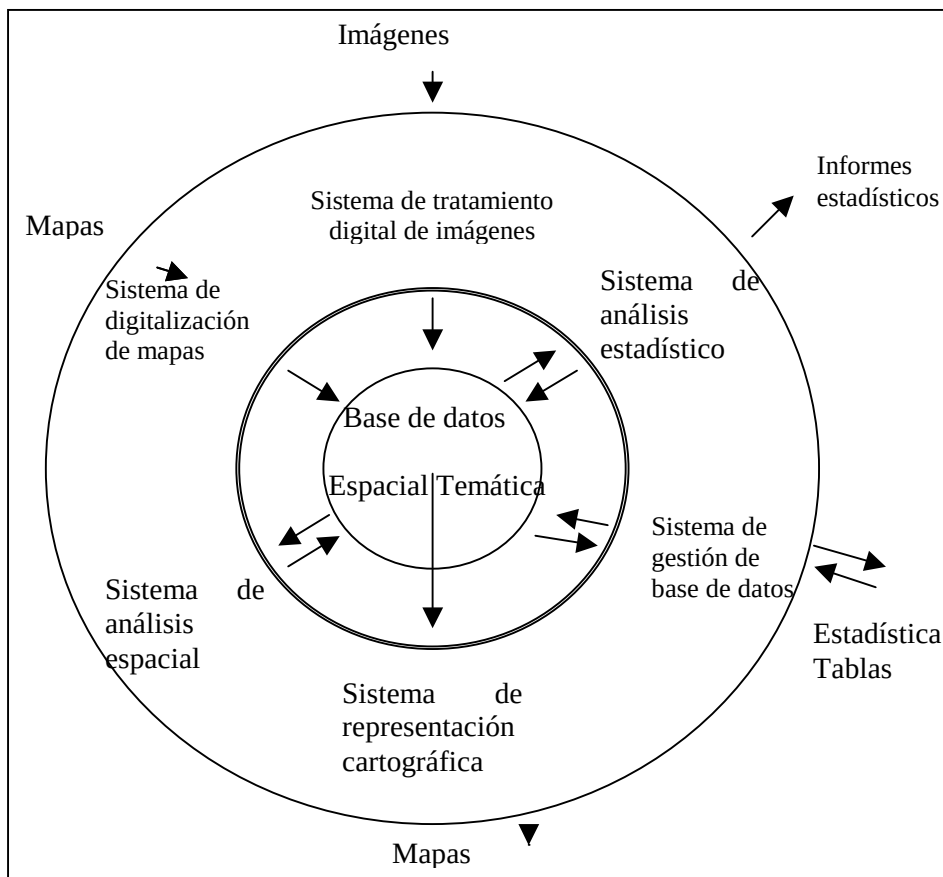


FIGURA 2. Esquema de funcionamiento de un sistema de información geográfica (modificado de Zinck y Valenzuela, 1990)

Las herramientas de análisis que permiten los SIGs son:

- Consultas a la base de datos.

La base de datos temática permite cualquier tipo de consulta, con la característica de que la respuesta está relacionada con unas coordenadas espaciales.

- Álgebra de mapas: sumas, restas, multiplicación y división entre capas.

Si a la información temática se le puede asignar un número, el SIG fácilmente podrá operar con él y generar nueva información.

- Operadores de distancia.

Permiten calcular distancias, se utilizan normalmente en relación con las unidades lineales (distancia a una carretera, curso fluvial,...).

- Operadores de contexto.

Cuando se dispone del modelo digital del terreno con coordenadas (x, y, z) estos operadores permiten buscar relaciones entre ellos para calcular pendientes, orientación,...

Con estas herramientas se obtienen nuevos mapas que pueden responder cuestiones del tipo:

- Lógico (sí/no).
- Clasificaciones previas según criterios establecidos originariamente.
- Reclasificaciones con nuevos criterios.
- Reclasificaciones utilizando modelos. Ejemplos:
 - o Cálculo de CRAD del perfil a partir de la profundidad del suelo, textura y porcentaje de elementos gruesos (Nogués, 2002).
 - o Evaluación de tierras para distintos usos (Martinez et ál., 2000).
 - o Riesgo de salinización (Santos, 2003).

6. Bibliografía

- AYERS, R.S. Y D.W. WESCOTT. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Roma.
- ATKINSON, G. 2000. Soil survey mapping. In P.F.V. Charman and B.W. Murphy. Soils: their properties and management (2.nd ed.). Sydney University Press, Melbourne.
- BOIXADERA, J., Y J. PORTA (dirs.). 1991. Información de Suelos y Evaluación Catastral. Método del Valor Índice. Monografías 3. Centro de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria, Ministerio de Economía y Hacienda, Madrid.
- COMISIÓN DEL BANCO DE DATOS DE SUELOS Y AGUAS. 1983. SINEDARES, Manual para la Descripción Codificada de Suelos en el Campo. MAPA, Madrid.
- FAO, 1999. Base refencial mundial del recurso suelo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.
- , 2001. Indicadores de la calidad de la tierra y su uso para la agricultura sostenible y el desarrollo rural. Boletín de Tierras y Aguas, n.º 5.
- , 1976. Esquema para la Evaluación de Tierras. Boletín de Suelos de la FAO 32. FAO, Roma. Italia.
- , 1977. Guía para la Descripción de Perfiles de Suelo. FAO, Roma, Italia.
- , 1990. Evaluación de tierras para la agricultura de regadío: directivas. Boletín de suelos, 55. Roma, Italia.

- HERRERO, C.; J. BOIXADERA, R. DANÉS Y J.M. VILLAR. 1993. Mapa de sòls de Catalunya 1:25 000. Full núm.: 360-1-2 (65-28) Bellví. Direcció General de Producció I Indústries Agroalimentàries I Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona.
- LAF. 1999. Criteris bàsics de la fertilització mineral i orgànica mitjançant l'ús de les anàlisis de sòls. Notes tècniques i casos pràctics. Quaderns de Divulgació 2.
- MARTÍNEZ, J.A.; O. ALBÉS Y J. BOIXADERA. 2000. Avaluació del territori de Lleida per a usos agrícoles. Perspectives Territorial, 9. Generalitat de Catalunya, Departament de Política Territorial i Obres Públiques.
- NOGUÉS, J. 2002. Mapa de suelos (E 1/25 000) de Barbués y Torres de Barbués (Huesca): Aplicaciones para la modernización de regadíos. Serie Investigación nº 36. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón.
- NOGUÉS, J.; J. HERRERO, R. RODRÍGUEZ-OCCHOA Y J. BOIXADERA. 2000. Land evaluation in a salt affected irrigated district using an index of productive potential. *Environmental Management* 25: 143-152.
- PORTA, J.; M. LÓPEZ-ACEVEDO Y C. ROQUERO. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa. 3.^a ed.
- SANTOS, M.E. 2003. Delimitación de áreas propensas a salinización mediante mapa de riego y de suelos. Proyecto de Post-grado en Ingeniería Medioambiental. CPS, Universidad de Zaragoza.
- SCHOENEBERGER, P.J.; D.A. WYSOCKI, E.C. BENHAM Y W.D. BRODERSON. 2002. Field book for describing and sampling soils (Version 2) Natural Resources Conservation Service. USDA. National Soil Survey Center, Lincoln NE.
- SOIL CONSERVATION SERVICE. 1983. National Soils Handbook. US Department of Agriculture, Washington DC.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSS). 1993. Soil Survey Manual. Soil Conservation Service U.S. Department of Agriculture. Handbook 18. Disponible en Internet: soils.usda.gov/procedures/ssm/main.htm.
- SOIL SURVEY STAFF. 1975. Soil Taxonomy: a Basic System of Soil Clasification for Making and Interpreting Soil Surveys. Agricultural Handbook No. 436, US Gov. Print Office. Washington.
- , 2006. Keys to Soil Taxonomy, 10th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
[ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/Soil_Taxonomy/keys/keys.pdf](http://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/Soil_Taxonomy/keys/keys.pdf).
- VAN WAMBEKE, A. Y T.R. FORBES. 1989. Criterios para el uso de la taxonomía de suelos en la denominación de unidades cartográficas. USDA, Soil Management support services. Monografía técnica n.º 15.
- ZINCK, J.A. Y VALENZUELA, C.R. 1990. Soil geographic database: structure and application exemples. ITC Journal spec. Issue, 270-294. Enschede.

I.3. Propiedades físicas que afectan a la compactación del suelo.

1. Introducción

La mecanización ha permitido un gran desarrollo de la agricultura y una mejora de la calidad de vida en la población agraria. Una mecanización no controlada puede originar que la fuerza ejercida sobre el suelo supere a la resistencia ofrecida y se origine compactación. Se está viendo cómo en la actualidad la tendencia del agricultor está siendo el uso de máquinas agrícolas cada vez de mayor tamaño y, por tanto, de mayor peso que pueden aumentar el problema.

La compactación del suelo se define como un incremento de la densidad aparente del suelo, un empaquetamiento de las partículas más denso y una disminución de la porosidad, especialmente en lo referente a la macroporosidad (Glinski y Lipiec, 1990, citado por Porta et ál., 2003). En un suelo compactado tiende a disminuir la cantidad de agua y de nutrientes disponibles para las raíces. Aunque puede haber compactación por procesos edafogénicos naturales, en suelos de uso agrícola el mayor problema deriva de la acción de fuerzas externas de carácter antrópico.

Una buena estructura en los horizontes del suelo permite un desarrollo óptimo de las raíces, permite una buena disponibilidad de agua para las plantas, favorece el transporte de agua y de aire dentro del suelo y permite al suelo ofrecer una fuerza frente acciones externas. En un suelo compactado la relación entre el volumen de poros y el volumen total del suelo no permite un desarrollo óptimo de las raíces (Sánchez-Girón, 1996). Esto origina que inevitablemente un suelo compactado sea un suelo menos productivo.

La compactación es el factor de degradación física de suelos agrícolas más importante en todo el mundo, siendo Europa el continente más afectado (Oldeman et ál., 1991). Van Ouwerkerk y Soane (1994) cuantifican el área degradada en Europa por compactación en 33 millones de hectáreas. Fraters (1996) afirma que el 18% del suelo europeo tiene una vulnerabilidad moderada a la compactación profunda y el 32% es muy vulnerable.

En muchas ocasiones los agricultores no son conscientes de este proceso de degradación (Van den Akker y Schjonning, 2004). Es un proceso que no se puede apreciar fácilmente a simple vista como pueda ser otro tipo de degradación como erosión o salinización. Esto hace que la sensibilización de agricultores u otros agentes sociales en este tema no sea tarea fácil.

La compactación es un problema inevitable en una agricultura mecanizada. El conocimiento de los factores que la provocan y de un manejo adecuado, puede ayudarnos a reducir sus efectos negativos sobre la degradación física del suelo, sobre la rentabilidad de la explotación y también sobre el medio ambiente.

2. Compactación superficial y profunda

En 1980 se creó un grupo de trabajo sobre compactación de suelo por vehículos con elevada carga por eje del International Soil Tillage Research Organization (ISTRO) en el que se desarrollaron trabajos de campo con tratamientos similares en distintos países de Europa y Norteamérica.

Hakansson y Reader (1994) diferencian tres tipos de compactación en profundidad y lo hacen en función del efecto de la compactación sobre la producción. Compactación superficial es la que se origina en los primeros 25 cm del suelo y tiene efectos sobre la producción que pueden durar hasta 5 años. Compactación subsuperficial que se origina entre los 25 y los 40 cm con menores efectos que la anterior pero con una duración mayor de hasta 10 años. La compactación profunda tiene lugar por debajo de 40 cm y sus efectos pueden durar décadas e incluso llegar a ser permanentes.

A partir de 1980 se establecieron una serie de ensayos en diferentes países de Europa y Norteamérica para estudiar el efecto de la compactación en la producción, utilizando vehículos con elevada carga por eje, todo ello bajo un mismo diseño experimental. Algunos de estos ensayos todavía están en activo (Van den Akker et ál., 2003). El estudio consistió en la aplicación de una compactación inicial de cuatro pases de un vehículo con una carga por eje de 50 kN por rueda (1kN = 102 kg), toneladas con presión de neumático de 300kPa. El resto de los años se procedió con las labores habituales de vertedera de 20 a 25 cm y a no entrar al ensayo con cargas superiores a 25 kN por eje (Hakansson, 1994). En estas condiciones se estudió la respuesta que cada año daba el cultivo a esa compactación inicial. La mayor respuesta del cultivo se produce durante el primer y segundo años ya que se compactan tanto la capa de arado como la capa profunda. Por ejemplo, en maíz esta reducción fue de entre el 30 y el 55% en suelos arcillosos y entre el 7 y el 14% en suelos francos (Voorhees, 2000). Los efectos de la compactación superficial sobre la producción solo duran cinco años. Los efectos a partir del cuarto año se atribuyen a la compactación profunda.

Como resultado de estos ensayos Hakansson y Reeder (1994) llegaron a definir el efecto de la compactación sobre la producción como una respuesta formada por tres tramos. El tramo primero corresponde a la compactación de la capa de arado, unos 25 cm. Su efecto dura los 5 primeros años y depende en gran medida del contenido de arcilla. Este efecto va descendiendo con el paso del

tiempo. El tramo segundo originado como consecuencia de la compactación de la parte superior del subsuelo entre 25 y 40 cm. Aunque no hay muchos datos este efecto puede durar hasta 10 años y dependerá del tipo de suelo. El tramo tercero está originado por la compactación profunda mayor de 40 cm y se asume que el efecto de esta sobre la producción puede ser permanente. A los efectos de la compactación profunda en la producción de maíz, Voorhees (2000) los cifra en una reducción permanente de entre el 6 y el 12%. En suelos arcillosos hay reducción de cosecha y del contenido de nitrógeno en cosecha tras diecisiete años después de la compactación (Alakukku, 2000, cit. por Van den Akker et ál., 2003).

La compactación superficial depende principalmente de la humedad del suelo, de la presión ejercida sobre la superficie del suelo, del número de pasadas y de las características de la rueda y de la presión de inflado de los neumáticos. La presión ejercida sobre la superficie del suelo está directamente relacionada con el diseño de las ruedas y con su presión. El uso de neumáticos de baja presión reduce la presión sobre la superficie del suelo. Los efectos en el suelo de la compactación superficial pueden recuperarse en pocos años.

La compactación profunda depende de menos factores que la superficial: humedad del suelo, peso por eje y número de pasadas, pero el efecto negativo sobre el suelo es muy duradero. Si se evita entrar en un suelo con alto contenido de humedad, el peso por eje es el factor más importante que produce compactación profunda. Cuando en 1994 se hablaba de vehículos con elevada carga por eje se consideraban cifras de 50 kN, pero en la actualidad se pueden tener vehículos que superan los 100-120 kN en suelos húmedos, como la cosechadora de remolacha o tanques de purines (Van den Akker et ál., 2003).

Los efectos a largo plazo sobre la producción están relacionados con la compactación profunda. La compactación es tanto más persistente cuanto más profunda. Los efectos de la compactación por debajo de 40 cm pueden tener consecuencias durante décadas e incluso llegar a ser permanentes (Hakansson y Reeder, 1994). Por debajo de esta profundidad es difícil reducir la compactación con el empleo de maquinaria, en condiciones poco apropiadas puede incluso aumentarse el daño. El efecto de compactación de un vehículo de 26 toneladas, 10 en el eje delantero y 16 en los dos ejes traseros produjo una compactación con efectos apreciables a 50 cm y después de 11 años todavía no se había recuperado (Etana y Hakansson, 1994).

Estos autores afirman que el tránsito por suelo húmedo con cargas por eje mayores de 6 toneladas produce compactación por debajo de 40 cm. La compactación puede ser todavía más profunda si la carga por eje es mayor con el empleo de maquinaria pesada, como ocurre con algunas máquinas forestales o militares.

En general, cargas superiores a 9 toneladas por eje pueden variar la densidad aparente y la resistencia a la penetración del suelo por debajo de los 30 cm (Voorhes, 1992); este puede ser un efecto a largo plazo. Este autor cita un estudio realizado en Minnessota, con un pase de rueda con carga de eje de 18 toneladas, aplicado a un suelo franco arcilloso húmedo en 1981, que causó daños importantes en propiedades físicas del suelo por debajo de 60 cm. No se han encontrado evidencias de recuperación de compactación profunda por la acción de factores naturales como agrietamiento por humectación-desechado o hielo-deshielo.

3. Factores que originan la compactación

Los factores que influyen en la compactación se pueden agrupar en factores naturales y factores antrópicos.

Un ejemplo de compactación natural es la que se produce en suelos con poca estabilidad estructural y bajo contenido en materia orgánica, donde se forma una capa compactada superficial denominada costra. El efecto de gotas de lluvia sobre agregados con baja estabilidad produce un efecto de salpicadura. La desintegración de estos produce una colmatación de huecos en una capa muy superficial entre 2 y 5 mm de espesor. Al secarse da lugar a una capa apelmazada que origina una infiltración baja (Porta et ál., 2003). La densidad aparente de esta costra es mayor y su permeabilidad más baja que la del material subyacente. Su presencia dificulta la emergencia de la plántula y, por tanto, la nascencia.

Dentro de lo que se denomina factores antrópicos se puede citar el pastoreo que puede producir una compactación muy superficial si se produce el paso de rebaños sobre suelos con alto contenido en humedad. Pero el factor más importante que puede originar compactación en un suelo agrícola son los elementos de apoyo de máquinas agrícolas, normalmente ruedas que ejercen una fuerza sobre el suelo. Si esa fuerza externa supera la resistencia del suelo se produce una deformación plástica. La deformación dependerá, por un lado, de las propiedades del suelo y, por otro, de la magnitud de la fuerza, del tamaño de la rueda y de la presión de inflado. La humedad del suelo está relacionada de manera directa con la compactación ya que la resistencia del suelo es más baja cuando la humedad del suelo es alta. Por ello el efecto de compactación en el suelo aumenta cuando aumenta su humedad.

La compactación del suelo será tanto mayor cuanto menor sea su resistencia y cuanto mayor sea la magnitud de las tensiones ejercidas sobre el mismo. El efecto que los elementos de apoyo tienen sobre el suelo depende principalmente de:

El peso por eje. El peso que recae sobre la rueda es el principal factor de compactación del suelo. Cuanto mayor es el peso mayor puede ser la compactación. Si el peso no excede de 4.000 kg la compactación tiene solo efectos en superficie. Si el peso es mayor a 9.000 kg los efectos pueden afectar al suelo en superficie y en profundidad, con efectos a más largo plazo. Hakansson y Reader (1994) llegan a la conclusión que la carga por eje influye en la profundidad de compactación. Para una carga de 4, 6, 10 y 15 toneladas por eje la profundidad de compactación puede ser de 30, 40, 50 y 60 cm, respectivamente.

La presión de contacto entre la rueda y el suelo. La presión ejercida sobre el suelo depende del peso por eje y de la superficie sobre la que se ejerce esa fuerza. Si se aumenta la superficie de contacto, la presión disminuye en la interfase suelo-rueda. Este factor ha llevado, en algunos casos, al uso de ruedas de mayor anchura o bien al uso de ruedas dobles o ruedas gemelas, tanto en las ruedas traseras de tractores como en las ruedas de remolques.

La presión de inflado de los neumáticos. Está relacionada con la presión ejercida por la rueda sobre la superficie del suelo, cuanto mayor es la presión de inflado mayor es la presión sobre el suelo. Un neumático con una presión de inflado de 200kPa y una carga de 30 kN puede producir una mayor compactación superficial que uno inflado con 80KPa y una carga de 50kN (Van den Akker et ál., 2003).

Número de pases. El número de veces que pasa una rueda sobre la superficie del suelo influye en la compactación del mismo, aunque la carga y la presión de contacto no sean elevadas. Cuanto mayor sea el número de pases, mayor es la compactación y mayor es el volumen de suelo afectado por la compactación (Raghavan et ál. 1977, cit. por Sánchez Girón, 1996).

Deslizamiento. Cuando una rueda de tracción patina sobre el suelo produce un mayor efecto de compactación ya que al efecto del peso gravitatorio se le une la deformación producida por los esfuerzos cortantes ejercidos en la superficie de contacto suelo-rueda. Cuando el deslizamiento supera esta cifra la densidad aparente desciende debido al efecto de excavado del terreno.

4. Propiedades físicas que afectan a la compactación del suelo

4.1. Densidad aparente

Las propiedades físicas que con más frecuencia se miden en los ensayos de compactación son la densidad aparente y la resistencia a la penetración (Voorhes, 1992).

La densidad aparente es la relación entre la masa de una muestra de suelo y su volumen. La masa se obtiene por peso de la muestra secada a 105 °C y el volumen es el volumen que ocupa la muestra en su estado natural, esto es el volumen que ocupan las partículas del suelo y los poros en el momento del muestreo; se mide en Mg. m^{-3} , numéricamente es igual a gr. cm^{-3} .

$$\rho_b = M/V$$

Depende de la textura y de la estructura del suelo, los suelos arcillosos suelen tener densidades más bajas y los arenosos más altas. Está directamente relacionada con la porosidad total, por esta razón, la compactación del suelo se suele medir mediante los aumentos en la densidad aparente.

En agricultura convencional el suelo está sometido a un ciclo anual de aireación y compactación. Empieza con la vertedera donde tiene valores bajos y posteriormente va aumentando con el resto de las labores de cultivo, alcanzando el valor más alto tras la recolección. Este conjunto de operaciones normales contribuyó a un aumento de la densidad aparente durante la campaña de 1,2 a 1,6 Mg. m^{-3} en los primeros 30 cm en un ensayo realizado por Voorhes et ál. (1978).

Con la compactación, la densidad aparente aumenta y la porosidad disminuye, por esta razón, pueden condicionar el crecimiento radicular. Algunos autores han dado valores límite de densidad aparente que denominan *densidad aparente crítica* por encima de la cual el crecimiento radicular se ve afectado y, por lo tanto, la producción. En suelos con textura franco arcillosa será de 1,55 Mg. m^{-3} y en suelos con textura arenosa franca de 1,85 Mg m^{-3} (Bowen, 1981, cit. por Porta et ál., 1999). Otros datos para un cultivo de girasol, dan 1,75 Mg m^{-3} en suelos arenosos y de 1,46 a 1,63 Mg m^{-3} en suelos arcillosos (Jones, 1983, cit. por Yin 2002).

Hakansson (1990) propuso el concepto de grado de compactación para estudiar la relación entre producción de cosecha y compactación. Para lo cual estableció una densidad aparente de referencia que era la que alcanza un suelo al ser sometido a una compactación uniaxial de 200kPa. Así podía establecer una relación entre porcentajes de compactación y efectos en la producción.

4.2. Resistencia a la penetración

Expresa la resistencia que ofrece un suelo a ser atravesado por una superficie de forma cónica. Para lo cual se utiliza un aparato denominado penetrómetro que introduce una lanza cuya punta tiene forma cónica, de superficie conocida y con un ángulo normalmente de 30°. El penetrómetro va registrando distintas lecturas a

medida que profundiza en el suelo, por ello el resultado es un conjunto de medidas de resistencia para cada profundidad. La resistencia a la penetración se expresa como fuerza por unidad de área en kPa o MPa.

El desarrollo del cultivo puede verse muy afectado con valores de resistencia a la penetración superiores a 5 MPa, sin embargo, el laboreo se dificulta con valores superiores a 2 MPa (Dexter y Zoebisch, 2004). Por otra parte, el suelo agrícola necesita una fuerza mínima que resista el tráfico. En suelos con una resistencia a la penetración entre 250kPa y 500 kPa se puede transitar, por encima de este último valor se facilita la traficabilidad (Dexter y Zoebisch, 2004).

La resistencia a la penetración se ha utilizado en muchos ensayos de compactación como una medida más. Esta resistencia está directamente relacionada con la humedad del suelo, a mayor contenido de humedad menor resistencia. Además, se puede relacionar con el crecimiento radicular, con el rendimiento del cultivo y con propiedades físicas del suelo como la compactación.

Este parámetro ha sido ampliamente utilizado en gran cantidad de trabajos sobre compactación como pueden ser: diferencias entre tractores de ruedas o de cadenas de goma (Pagliai et ál., 2003), número de veces que pasa una máquina (Boizard et ál., 2000; Hernáiz y Sánchez Girón, 2000), maquinaria pesada (Hakansson y Reader, 1994; Arvidsson, 2001; Yavuzcan et ál., 2005).

4.3. Porosidad

La porosidad del suelo es uno de los parámetros más útiles para evaluar el estado de compactación de un suelo.

La porosidad total del suelo (f) es el espacio de huecos y se define como la relación entre el volumen de huecos (V_v) y el volumen total del suelo: $f = V_v / V_T$.

La compactación de un suelo se produce cuando disminuye el espacio de poros. En un contexto agronómico se considera que un suelo se ha compactado, cuando su porosidad total es tan baja que se ven afectados negativamente aspectos fundamentales del suelo como la aireación, la penetración radicular, la infiltración de agua y el drenaje.

Determinar la porosidad total es relativamente sencillo a través de la densidad aparente (ρ_b) (Carter y Ball, 1993) y la densidad real (ρ_s) mediante la ecuación:

$$f = (\rho_s - \rho_b) / \rho_s$$

pero su valor como indicador de compactación es limitado, ya que esta no afecta por igual a los distintos tamaños de poros del suelo. No es fácil identificar cuáles son realmente los tamaños de poro más afectados en el proceso de compactación.

El problema es aún más complejo por el hecho de que tampoco existe unanimidad a la hora de clasificar los poros del suelo y sus verdaderas funciones. Existen diversos intentos para unificar la terminología en los tamaños y las funciones asociadas a cada clase.

En general, las clasificaciones se basan en intervalos de distintos diámetros de poro (epd o diámetro equivalente de poro). El sistema más sencillo (Hillel, 1998) reconoce tres categorías: *macroporos* de varios mm a cm, *poros capilares* de varias μ a unos pocos mm y *microporos* $<1\mu$.

Otros sistemas, son por ejemplo el citado en Porta et ál. (2003) que define *porosidad efectiva* (poros de transmisión) $> 60 \mu\text{m}$, *poros de almacenamiento* $0,5- 60 \mu\text{m}$, *porosidad residual* $< 0,5 \mu\text{m}$ y *huecos ocluidos* o el sistema funcional de Greenland y Hayes (1978) con *fisuras* $> 5 \text{ mm}$, *poros de transporte* $50-500\mu$, *de reserva* $0,5-50\mu$, *residuales* $0,005-0,5\mu$ y *espacio de enlace* $<0,005\mu$, así como el del SSSA (2001) con *macroporos* $>75\mu$, *mesoporos* $30-75\mu$, *microporos* $5-30\mu$, *ultramicroporos* $0,1-5\mu$ y *cryptoporos* $<0,1\mu$.

Numerosas evidencias (Hillel, 1998; Carter y Ball 1993) muestran que los más afectados por el proceso de compactación son los poros gruesos y que no se suele modificar el volumen de microporos. Por ello se trata en este contexto de estudiar específicamente los cambios en el volumen de macroporos.

El sistema SSSA (2001) establece una división en subclases de los macroporos: *gruesos* ($> 5 \text{ mm}$), *medios* ($2-5 \text{ mm}$), *finos* ($1-5 \text{ mm}$) y *muy finos* ($75\mu-1\text{mm}$), que puede permitir realizar un diagnóstico más preciso de los cambios introducidos en el sistema por el proceso de compactación.

Para evaluar directamente los cambios en la distribución del tamaño de poros se utilizan técnicas morfométricas como el tradicional estudio de láminas delgadas por microscopía o sistemas más recientes de análisis de imagen y tomografía (Jégou et ál., 2001; Rachman et ál., 2006) o bien utilizando un porosímetro de mercurio (Carter y Ball, 1993; Richard et ál., 2001), pero todos ellos son métodos tediosos en tiempo y que requieren equipamientos muy costosos.

Una alternativa a estos métodos directos, es el uso de las curvas de retención de agua en el suelo que permite realizar una estimación de la cantidad de poros de diferentes clases, establecidas según su diámetro (un ejemplo de aplicación de esta metodología se encuentra detallado en el Caso práctico 1.7 de este mismo texto). De hecho el propio concepto de «distribución del tamaño de poros» está basado en los datos de retención de humedad, usando el concepto de tamaño «equivalente» derivado del modelo capilar. Este modelo (Bouma, 1991) relaciona la altura de ascenso capilar (h) con el radio del poro:

$$h = 2\sigma / \rho g r$$

siendo: σ = tensión superficial del agua, ρ = densidad del agua, g = cte gravitacional, r = radio del tubo capilar.

Se han desarrollado diferentes ecuaciones que relacionan el tamaño de poro con la fuerza de succión con la que el agua es retenida por el suelo. Los modelos (Van Genuchten, 1980; Carter y Ball, 1993) que relacionan el potencial de agua y el diámetro equivalente de poro (epd) se basan en la ecuación de Rose (1966): $pF = \log_{10}(A) - \log_{10}(r)$; donde A es constante ($=3,4725$) y r es el radio de poro equivalente en μm ($= epd/2$).

El volumen de macroporos se considera equivalente al también denominado *espacio poroso drenable* que corresponde al volumen de poros que permanecen llenos de aire cuando el contenido de humedad del suelo está en torno a la denominada capacidad de campo (-33 a -10 kPa), es decir, poros con un epd de 9 a 30μ (según textura). Carter y Ball (1993) denominan macroporos o *porosidad efectiva* a los que tienen un $epd > 50 \mu$ (fuerza de retención de -6 kPa) y consideran que, para mantener unas condiciones de aireación adecuadas, el volumen de macroporos debe ser, al menos, un 10% del volumen total de poros del suelo.

Para las subclases de macroporos ($> 75 \mu$) definidas por SSSA (2001) los puntos de estudio de la curva de retención que marcarían los límites entre ellas son los siguientes: -4 kPa, $-0,3$ kPa, $-0,15$ kPa y $-0,06$ kPa.

Sin embargo, en las placas de succión solo se puede medir hasta -2 kPa (Bouma, 1991) por limitaciones técnicas, es decir que se podrían estimar poros de hasta 150μ como límite superior por este método. El uso de las denominadas *sand-boxes* (equipos *sand-box* y *sand/kaolin-box* de Eijkelkamp Agrisearch Equipment) para succiones bajas puede resolver estas limitaciones y obtenerse una estimación completa de los poros más gruesos.

Por último, no hay que olvidar que la caracterización del sistema de poros basada en su analogía con tubos capilares es solo una aproximación. Estos métodos son fáciles de calcular y de aplicar y pueden ser útiles para detectar la compactación, pero no deben tomarse en sentido literal como expresión del radio de los poros de un suelo.

4.4. Permeabilidad

La permeabilidad de un suelo expresa la facilidad con la que los gases y los líquidos fluyen a través de la masa del propio suelo o de un horizonte de este (SSSA 2001). Si el fluido es agua y el suelo está saturado, en física de suelos se denomina *conductividad hidráulica saturada* (K_s) y expresa la velocidad con la que circula el agua en un suelo saturado.

Las unidades se expresan en longitud por unidad de tiempo: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$, (SI: $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)

En líneas generales, por tanto, la permeabilidad hace referencia a la velocidad con la que puede circular el agua dentro del suelo y depende en gran medida del tamaño y distribución de los poros del suelo. La mayor parte del transporte de agua se produce a través de los poros más grandes ($\text{epd} > 50\mu$), como se acaba de comentar en el apartado anterior.

La compactación reduce el volumen y la continuidad de los poros grandes y por ello también reduce la permeabilidad del suelo tanto la de los líquidos como la de los gases.

La valoración conjunta de permeabilidad y macroporosidad permite estudiar cambios en el estado de compactación del suelo de forma precisa.

La conductividad hidráulica saturada se puede estimar a través de funciones de edafotransferencia, o bien medir en laboratorio o en campo. La metodología específica se encuentra detallada en numerosas publicaciones como Klute y Dirksen (1986), Reynolds (1993a y b) o Hillel (1998).

Entre los métodos de campo destaca por su facilidad de manejo y los resultados ofrecidos el denominado *permeámetro de Guelp*. Este equipo mide la conductividad hidráulica y el potencial matricial del agua del suelo de una forma relativamente sencilla. Es un permeámetro de carga constante basado en el sifón de Mariotte. El volumen de suelo en el que se realiza la medida es muy pequeño y permite realizar medidas en profundidad, por ello resulta indicado para evaluar cambios de compactación a diferentes profundidades en el suelo.

Al aplicar este método hay que tener en cuenta que lo que se mide es la denominada *conductividad hidráulica saturada en campo* (Kfs) para diferenciarla de la Ks medida en laboratorio o estimada. La Kfs es menor, la mitad o algo menos (Reynolds, 1993b), que la verdadera Ks, debido a la dificultad que existe para saturar un suelo en condiciones de campo sin dejar aire atrapado.

La conductividad hidráulica ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) se obtiene:

$$K_{fs} = 0,0041 \cdot C_1 \cdot R_2 - 0,0054 \cdot C_1 \cdot R_1$$

$C_1 = 35,39 \text{ cm}^2$ (constante para dos depósitos)

$R_1 =$ flujo de salida de agua ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), para $h_1 = 5 \text{ cm}$

$R_2 =$ flujo de salida de agua ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), para $h_2 = 10 \text{ cm}$

5. Bibliografía

- ARVIDSSON J., 2001. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvester in southern Sweden I. soil physical properties and crop yield in six field experiments. *Soil Tillage Research*. 60 67-78. Elsevier.
- BOIZARD H., RICHARD G., BRANCOUR-HULMEL M., GUERIF J., 2000. Effect of cropping system on change in bulk density, penetration resistance and hydraulic conductivity in subsoil. *Advances in GeoEcology* 32, 233-24. Catena Verlag. Germany.
- BOUMA, J., 1991. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy* 46, 1-37.
- CARTER, M.C., BALL, B.C., 1993. Soil Porosity. In: Carter, M.R. (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC Press, Boca Raton FL, pp. 581-588.
- DEXTER A.R., ZOEBISCH M.A., 2002. Degradation, Critical limits of soil properties and irreversible. In *Encyclopedia of Soil Science*. (ed. Lal R.). Marcel Dekker. N.Y.
- GREENLAND D.J., HAYES M.B., 1978. Soils and soil chemistry, pp. 1-27. In: *The chemistry of soil constituents*. Wiley and Sons Eds.
- ETANA A. Y HÅKANSSON I., 1994. Swedish experiments on the persistence of subsoil compaction caused by vehicles with high axle load. *Soil and Tillage Research*, Volume 29, Issues 2-3, March 1994, 167-172.
- FRATERS B., 1996. Generalized Soil Map of Europe. Aggregation of the FAO-UNESCO soil units based on the characteristics determining the vulnerability to degradation processes. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM). The Netherlands. 60 pp.
- HAKANSSON I., 1990. Method for Characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil and Tillage Research* 16. 105-120.
- , (Ed.) 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load traffic. *Soil and Tillage Research* 29.
- HAKANSSON I. Y REEDER R.C., 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research* 29 (1994) 277-304.
- HERNÁNZ J.L. Y SÁNCHEZ-GIRÓN V., 2000. Compaction effects due to field traffic on soil properties and the response of different crops in three tillage systems. *Advances in GeoEcology* 32, 233-24. Catena Verlag. Germany.
- HILLEL, D., 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, London.
- JEGOU D., SCHRADER S., DIESTEL H., CLUZEAU D., 2001. Morphological, physical and biochemical characteristics of burrow walls formed by earthworms. *Applied Soil Ecology* 17, 165-174.
- KLUTE A. Y DIRKSEN C., 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: Klute A. (Ed), *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2.nd Ed. Agronomy 9, American Society of Agronomy, Madison, WI.

- OLDEMAN, L.R., HAKKELING R.T.A., SOMBROECK W.G. 1991. World Map of the Status of Human-induced Soil Degradation: an Explanatory Not. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen, The Netherlands.
- PAGLIAI M., MARSILI A., SERVADIO P., VIGNOZZI N., PELLEGRINI S., 2003. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil Tillage Research*. 73 119-129. Elsevier.
- PORTA J., LÓPEZ-ACEVEDO M., ROQUERO C., 2003a. Degradación de la fertilidad física del suelo, pp. 777-795. En: *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa.
- , 2003b. Estructura del suelo y propiedades relacionadas pp. 271-305. En: *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa.
- RACHMAN A., ANDERSON S., GAUTZER C.J., UDAWATTA R.P., 2006. Computed tomography for measurement of soil macroporosity as affected by stiff-stemmed grass hedges. In: 18.th World Congress of Soil Science 9-15 July, Philadelphia, USA.
- REYNOLDS W.D., 1993a. Saturated Hydraulic conductivity: Field measurements. In: Carter, M.R. (Ed), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC Press, Boca Raton FL, pp. 599-613
- , 1993b. Saturated Hydraulic conductivity: Laboratory measurements. In: Carter, M.R. (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC Press, Boca Raton FL, pp. 589-598.
- RICHARD G., COUSIN I., SILLON J.F., BRUAND A., GUERIF J., 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: Influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Sci.* 52, 49-58.
- ROSE C.W., 1966. *Agricultural Physics*. Pergamon, N.Y. 166 pp.
- SÁNCHEZ-GIRÓN V., 1996. *Dinámica y mecánica de suelos*. Agrotécnicas S.L. Madrid.
- SSSA. 2001. *Soil Science Society of America, Glossary of soil science terms*. <http://www.soils.org/sssagloss/>
- VAN GENUCHTEN, M. TH., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- VAN DEN AKKER J.J.H., ARVIDSSON J., HORN R., 2003. Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil Tillage Research* 73. 1-8.
- VAN DEN AKKER J.J.H. Y SCHJONNING P., 2004. Subsoil compaction and ways to prevent it. *Managing Soil Quality: Challenges in Modern Agriculture* (ed. Schjonning). CAB International. UK.
- VAN OUWERKERK C. Y SOANE B.D., 1994. Conclusions and recommendations for further research on soil compaction in crop production. In: Soane B. D., Van Ouwerkerk C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production. Developments in Agricultural Engineering* 11. Elsevier 627-642.
- VOORHEES W.B., SENST, C.G., NELSON, W.W., 1978. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern Corn Belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42. 344-349.

- VOORHEES W.B., 1992: Wheel-Induced soil physical limitations to root growth. *Advances in Soil Science* 19. 73-95.
- , 2000. Long-term effect of subsoil compaction on yield maize. *Advances in GeoEcology* 32, 331-338. Catena Verlag, Germany.
- YAVUZCAN, H.G., MATTHIES D. AUERNHAMMER H., 2005. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. *Soil Tillage Research*. 84 200-215. Elsevier.
- YIN K., 2002. Bulk density. In *Encyclopedia of Soil Science*. (ed. Lal R.). Marcel Dekker. N.Y.

I.4. Acidez y encalado de suelos

1. Introducción

Los suelos ácidos están distribuidos en muchas zonas de importancia agrícola del mundo, en particular en los trópicos húmedos. Los órdenes de suelos que presentan los problemas más serios de acidez son los Histosoles, Espodosoles, Ultisoles, Oxisoles e Inceptisoles, aunque también se puede incluir algunos Andisoles y Alfisoles.

Los conceptos sobre acidez del suelo hasta la década de los cincuenta, se resumen en varios documentos (Bornemisza, 1965; Martín, 1968; Navas y Silva, 1971); pocos años después, se publican otros trabajos que resumen las experiencias sobre el tema, especialmente del trópico húmedo de América Latina, Asia y Australia (Bouldin, 1979; Laathwell, 1979; Sánchez y Salinas, 1983; Kamprath, 1984; Robson, 1989; Hintze y Elliot, 1989; Craswell y Pushparajah, 1989; Ulrich y Sumner, 1991; Raij, 1991; Aguilar, Alcanzar y Etchevers, 1994) y más recientemente otros autores resumen lo hallado hasta el presente (Molina, 1998; Espinosa y Molina, 1999; Zapata, 2003).

El problema de la acidez del suelo puede corregirse *adaptando los cultivos* a esta condición, mejorando la fertilidad del suelo con la *adición de cal, yeso y/o fertilizantes* y, en forma más primitiva, a través de la *quema de la cobertura del suelo* con la consecuente adición de cenizas con altos contenidos en cationes. El encalado junto con la siembra de especies tolerantes constituyen las prácticas más apropiadas y económicas para corregir los problemas de acidez. Sin embargo, es común que, por desconocimiento, no se utilicen los mejores criterios para la selección de materiales genéticos, o para una aplicación provechosa de los materiales de encalado existentes en el mercado.

2. La acidez del suelo

2.1. Conceptos sobre acidez

La acidificación del suelo es el proceso por el cual aumenta la concentración de iones H^+ , normalmente proveniente del Al intercambiable y de grupos orgánicos ácidos, alcohólicos y fenólicos. La acumulación de iones H^+ se da tanto por adición de dichos iones o por pérdida de bases en la solución del suelo. La acidificación reduce la disponibilidad de nutrientes en el suelo (P, K, Ca y Mg), provoca la movilización de elementos tóxicos como el Al, incrementa la movilidad de metales pesados, y provoca variaciones en la estructura de la microflora y microfauna.

1.1. Acidez del suelo: Se entiende por acidez del suelo la condición del mismo en la cual existe una acumulación de elementos tóxicos (Al, Fe y Mn), a menudo asociada a una fertilidad natural baja (deficiencia de P, cationes y elementos menores). De manera orientadora, la acidez del suelo puede determinarse midiendo su pH y en términos más precisos a través de la acidez intercambiable o del porcentaje de saturación de acidez.

1.2. pH: Es el logaritmo negativo de la concentración de H^+ . Cuando el H_2O se ioniza en H^+ y OH^- (solución neutra), ambos están en una concentración de 10^{-7} mol/L, de acuerdo a la siguiente ecuación:



$$[H^+][OH^-]/[H_2O] = 1 \times 10^{-14}$$

$$[H^+] = [OH^-] = 1 \times 10^{-7}$$

Cuando el logaritmo negativo de la $[H^+]$ es 7, el pH del suelo es 7; cuando la $[H^+]$ es mayor, tal como 10^{-4} mol/L, el pH es 4 y el suelo se considera ácido. En soluciones alcalinas la $[OH^-]$ excede la de $[H^+]$ y los suelos se consideran básicos. Bajo cualquier condición la sumatoria de $[H^+]$ y $[OH^-]$ debe ser igual a 1×10^{-14} mol/L. En los suelos naturales el intervalo de pH puede variar entre 3 y 12, pero los valores más frecuentes pueden variar entre 4.0 y 8.5. De acuerdo con Fassbender (1975), existen varios grados de acidez de suelo estimados a través del pH del suelo en agua o en KCl (tabla1) según sea el grado en que se afecten las propiedades químicas, biológicas y físicas.

	pH H_2O		pH KCl
Muy ácido	<5.5	Ácido extremo	<4
Acidez media	5.5 - 5.9	Ácido fuerte	4.0 - 4.9
Acidez débil	6.0 - 6.4	Ácido mediano	5.0 - 5.9
Acidez muy débil	6.5 - 6.9	Ácido ligero	6.0 - 6.9
Alcalino muy débil	7.0 - 7.4	Alcalino ligero	7.0 - 8.0
Alcalino débil	7.5 - 7.9	Alcalino mediano	8.1 - 9.0
Alcalino medio	8.0 - 8.4	Alcalino fuerte	9.1 - 10.0
Muy alcalino	>8.5	Alcalino extremo	>10.1

TABLA 1. Rangos de pH en suelos tropicales (tomado de Fassbender, 1975)

Algunas de las *propiedades químicas* que se alteran con la acidez del suelo son: 1) la solubilización, disponibilidad y absorción de nutrimentos (Ca, Mg, K, P, menores); la máxima disponibilidad de P ocurre a pH entre 6 y 7 mientras que la de N ocurre a pH entre 5 y 8.5; 2) la saturación bases y la saturación acidez y 3)

la generación de carga variable (CIC y CIA) y con ello la disponibilidad de cationes y aniones.

Dentro de las *propiedades biológicas* que se alteran con la acidez del suelo se deben destacar: 1) el tipo de organismos presentes; 2) el desarrollo vegetal, el cual disminuye a pH menor a 4 cuando la concentración de iones H^+ afecta negativamente el desarrollo de la raíz y 3) la fijación de N y la mineralización de la materia orgánica aumentan con el pH y la saturación de bases del suelo.

Como consecuencia de la acidez del suelo, la *propiedad física* que más se altera es su estructura, ya que a menor pH, menor es la concentración de Ca, elemento estructurante que mejora la estructura y estabilidad de los agregados y que favorece la producción de exudados radicales que causan el mismo efecto.

2.2. Causas y fuentes de la acidez del suelo

El suelo puede acidificarse tanto por *causas naturales o pedogenéticas* (lixiviación, procesos redox, acumulación de sustancias orgánicas, efecto de algunas especies vegetales, actividad volcánica), como *antrópicas* (extracción de nutrimentos por laboreo intensivo, lluvias ácidas, utilización de fertilizantes, adición de enmiendas orgánicas residuales) (figura 1).

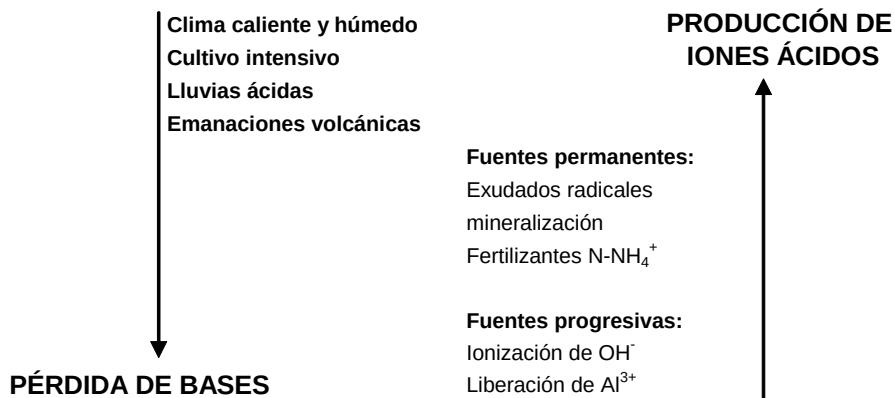


FIGURA 1. Principales causas y fuentes de acidez del suelo

2.2.1 Acidez natural o pedogenética: La acidez del suelo es relativamente más importante en ambientes en los cuales la temperatura y la humedad del suelo son altas (como ocurre en regiones tropicales lluviosas) y en zonas donde se acumulan sustancias orgánicas (suelos mal drenados en ambientes fríos), que en otro tipo de ambientes. Es por esto que el problema se identifica más con suelos

muy meteorizados y lavados, así como a aquellos suelos orgánicos ácidos de varias regiones del mundo. La actividad volcánica puede neutralizar o acidificar el medio, según sea que se depositen cenizas volcánicas o por el contrario que se presenten emanaciones periódicas de gases por tiempo prolongado. En Centroamérica, ambos tipos de actividad son comunes (Mora, 1995); la emanación de gases ácidos produce que el agua de lluvia en las laderas de los volcanes sea ácida (pH 3.8) debido a su elevada concentración de cloruros y sulfatos (Rodríguez et ál., 1995; Red Sismológica Nacional, 1995) Bajo estas condiciones, no solo se afecta el sistema suelo, sino que también se reduce significativamente el follaje de los cultivos, algunos de los cuales llegan a morir.

Las principales fuentes naturales de acidificación del suelo son:

2.2.1.1. *Iones de H^+* . La cantidad de este tipo de iones se ve afectada por:

- La producción de exudados radicales.
- La ionización de OH^- terminales en arcillas.
- Ionización de OH^- terminales en grupos ácidos ($R-COOH$), fenólicos y alcohólicos ($R-OH$) y metoxílicos ($R-OCH_3$) de la materia orgánica.
- Procesos redox tales como la oxidación rápida piritas (FeS_2) para producir H_2SO_4 en ambientes costeros y en explotaciones de minería de carbón.

2.2.1.2. *Iones Al^{+3}* : La disociación del Al^{+3} en suelos ácidos disminuye exponencialmente conforme el pH del suelo se acerca a un valor de 5.5. A partir de ese valor, el Al tiende a forma poli-hidróxidos insolubles, por lo que su disponibilidad disminuye exponencialmente, de acuerdo a la ecuación:

Reacción de disociación	pH del suelo	Solubilidad
$Al^{+3} + H_2O \rightleftharpoons Al(OH)^{+2} + H^+$	4.0-4.5	Alta
$Al(OH)^{+2} + H_2O \rightleftharpoons Al(OH)_2^+ + H^+$	4.5-5.5	
$Al(OH)_2^+ + H_2O \rightleftharpoons Al(OH)_3 + H^+$	5.5-7.5	
$Al^{+3} + 3H_2O \rightleftharpoons Al(OH)_3 + 3H^+$		Baja

Como resultado de las reacciones mencionadas al aumentar el pH del suelo disminuye la cantidad de Al intercambiable (figura 2a) y por ende disminuye el porcentaje de saturación de Al del suelo (figura 2b), tal como se ha encontrado

para Oxisoles y Andisoles (Méndez y Kamprath, 1973) y Ultisoles y Oxisoles (Abruña et al., 1973).

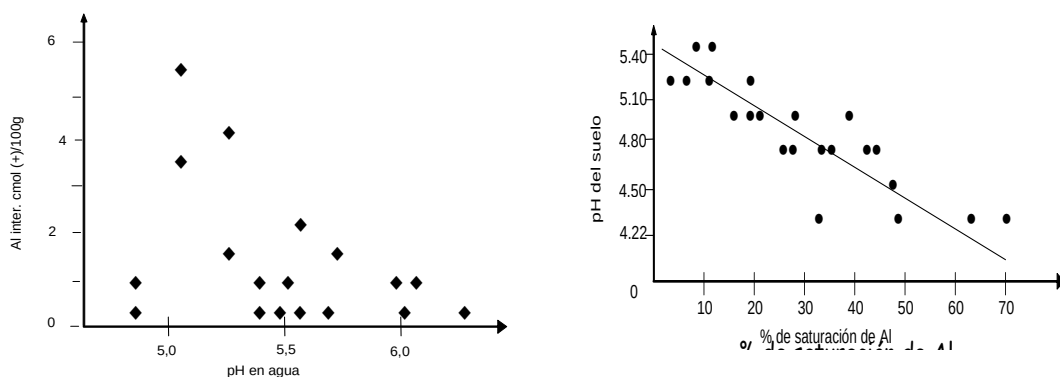


FIGURA 2. Efecto del pH del suelo sobre el contenido de Al intercambiable y la saturación de Al en Andisoles, Ultisoles y Oxisoles (tomado de Méndez y Kamprath, 1978 y Abruña et al., 1974)

2.2.2. Acidez antrópica: Otra causa importante de la acidez del suelo es el manejo intensivo de los cultivos y las plantaciones forestales. En el primer caso, se considera relevante la acidificación causada por la extracción de cationes como producto comercial. Dentro de otras fuentes antropogénicas, se encuentran:

2.2.2.1. Adición de fertilizantes nitrogenados amoniacales: El empleo de fertilizantes con efecto residual ácido y la extracción de bases, tanto en cultivos como en plantaciones forestales, puede inducir a corto plazo a la acidificación del suelo, en particular, cuando estos son de baja fertilidad natural. En la tabla 2, se presenta las reacciones de los principales fertilizantes nitrogenados en el suelo y la acidificación que pueden causar, según Tisdale et al., (1993).

Fuente	N (%)	Reacción de nitrificación	Índice de acidez (kg CaCO ₃ /100 kg fertilizante)
Urea	46	$(\text{NH}_2)_2\text{CO} + 4 \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	- 84
Nitrato de amonio	33.5	$\text{NH}_4\text{NO}_3 + 2\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$	- 63
Sulfato de amonio	21	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + 4\text{O}_2 \longrightarrow 4\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$	- 112
Fosfato monoamónico	12	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{H}_2\text{O}$	- 65
Fosfato diamónico	18	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + \text{O}_2 \longrightarrow 3\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{H}_2\text{O}$	- 74

TABLA 2. Acidez residual producida por fertilizantes nitrogenados (tomado de Tisdale et al., 1993)

2.2.2.2. *Efecto de las lluvias ácidas*: La lluvia ácida (adición de sustancias ácidas, principalmente producto de combustibles fósiles) deposita cantidades importantes de SO_2 y NO_x , o el producto de sus reacciones, lo que causa pérdidas considerables en cultivos y reduce el pH del suelo y la disponibilidad de algunos nutrimentos (Pearson y Linzon, 1985; Csillag et al., 1996; SEI, 1996). Bajo condiciones europeas, las lluvias ácidas no ejercen un efecto significativo en cuanto a cambios de acidez del suelo, aunque sí lo hacen con relación a la adición de metales pesados (Vanmechelen, Groenemans y van Ranst, 1997).

2.3. Razones de la baja fertilidad de los suelos

Una de las razones de la rotación de tierras en agricultura tropical con bajos insumos (Sánchez, 1976) y en explotaciones forestales con especies exigentes en nutrimentos (Hartemink, 2003), es la acidificación del suelo y la pérdida de su fertilidad. Para estimar la fertilidad del suelo, cuando se trata de suelos ácidos, normalmente se pueden medir las siguientes variables:

2.3.1. *Toxicidad de Al*: Cuando el aluminio se acumula en suelo en cantidad elevada, puede afectar negativamente el crecimiento de las plantas poco tolerantes a su presencia. Las cantidades del elemento consideradas como tóxicas se estiman en más de 1 mg/L de Al^{+3} en la solución del suelo o en forma relativa a la sumatoria de bases en el suelo en más del 60% de saturación de Al^{+3} .

2.3.2. *Deficiencia de Ca y/o Mg*: Los suelos ácidos tienen una cantidad de cationes intercambiables baja (menor a 5 cmol(+)/L), por lo que la disponibilidad de elementos como el Ca o el Mg no es suficiente para lograr el crecimiento óptimo de la mayoría de los cultivos.

2.3.3. *Deficiencia de Mo*: Esta deficiencia ocurre principalmente con leguminosas, en la cual el Mo es esencial para la nodulación y fijación de N; normalmente se corrige con adiciones de 0.05 a 0.2 kg Mo/ha.

2.3.4. *Toxicidad de Mn*: En algunos pocos casos, en Australia se menciona como problema la toxicidad de Mn cuando el pH del suelo disminuye; en suelos ácidos con problemas de mal drenaje, la toxicidad de Mn suele ser común, afectándose negativamente el crecimiento de las plantas.

2.3.5. *Retención de P*: La presencia de cantidades altas de Al y Fe intercambiables, aunadas a un aumento en la cantidad de carga positiva en las

micelas de cambio de suelos ácidos, hace que la disponibilidad del P adicionado como fertilizante a estos suelos disminuya temporalmente. Este fenómeno se conoce como retención de P, y se refiere a que el P se retiene en el suelo con una fuerza mayor a la que tienen las plantas para absorberlo.

2.3.6. *Toxicidad de H^+* : La presencia de cantidades tóxicas de iones H^+ en suelos orgánicos o elevados en materia orgánica, también puede constituirse en una causa de infertilidad del suelo.

En síntesis, se puede indicar que los problemas de baja fertilidad (acidez) aumentan cuando se presentan las siguientes condiciones en el suelo: *pH*: < 5.5, la *Acidez o Al Intercambiable*: > 0.5 cmol(+)/L, la *Suma bases (Ca + Mg + K)*: < 5 cmol(+)/L y la *Saturación de acidez*: >20%.

2.4. Criterios para diagnosticar problemas de acidez

El análisis de suelos es una de las herramientas más útiles para el diagnóstico de la fertilidad de los suelos. En el caso de la acidez, mediante este procedimiento es posible detectar su presencia y generar una recomendación para solventar adecuadamente el problema. La mayor parte de la acidez en los suelos tropicales (excluyendo los suelos orgánicos) proviene del Al, por lo que generalmente se habla de *acidez intercambiable* ($Al^{+3} + H^+$) y Al intercambiable, como si fueran sinónimos. La acidez o Al intercambiable se determina mediante la extracción del suelo con una sal neutra no tamponada, tal como el KCl 1N, y la titulación del extracto con una base. Esta fracción incluye el Al y el H intercambiables y en la solución del suelo, que son los que pueden perjudicar el crecimiento de las plantas.

La *saturación de acidez* es una medida del porcentaje del complejo de intercambio catiónico que está ocupado por Al y H. El valor de saturación de Al o acidez intercambiable es el mejor criterio para diagnosticar problemas de acidez. Cada cultivo, variedad o cultivar tiene su grado de tolerancia a la acidez, lo cual depende de las características genéticas de la planta. La saturación de acidez (SA), se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$\% SA = \frac{Ac. Int}{CICE} \times 100$$

Donde, la Capacidad de Intercambio de Cationes Efectiva (CICE) representa la sumatoria de Ca + Mg + K + Al + H. Los dos últimos elementos se consideran

como la Acidez Intercambiable (Ac. Int.). Es común aceptar que valores de saturación de acidez mayores al 10% afectan negativamente el crecimiento de especies vegetales poco tolerantes a la presencia de Al, mientras que el valor de 60% se considera como el máximo para especies tolerantes a la acidez del suelo. El valor deseable para la mayoría de las plantas oscila entre un 10 y un 25%.

3. Corrección de la acidez del suelo

Históricamente, se han empleado diferentes métodos para evitar el efecto negativo de la acidez del suelo sobre la producción de alimentos y madera. El primer enfoque empleado fue la utilización de material genético tolerante a la acidez del suelo, tal cual hicieron los primeros agricultores en el trópico y recientemente los fitomejoradores (Wright, 1976; Baligar y Duncan, 1990). De manera simultánea, otra forma de recuperar la fertilidad del suelo (incluyendo la reducción de la acidez), consiste en quemar la biomasa aérea para aprovechar los nutrientes ligados a la misma y posteriormente abandonar los terrenos por períodos prolongados de tiempo para lograr la recuperación de su fertilidad, a través del reciclaje de nutrientes (Nye y Greenland, 1960). Otras opciones como el enriquecimiento del barbecho, técnicas de agroforestería y enriquecimiento del sistema con insumos (entre ellos compuestos orgánicos) son recientes, y se basan principalmente en la teoría del encalado del suelo (Bornemisza y Alvarado, 1975; Bouldin, 1979; Laathwell, 1979; Sánchez y Salinas, 1983; Kamprath, 1984; Sánchez et ál., 1985; Robson, 1989; Hintze y Elliot, 1989; Craswell y Pushparajah, 1989; Kass et ál., 1989, 1997; Ulrich y Sumner, 1991; Raij, 1991; Aguilar, Alcanzar y Etchevers, 1994; Montagnini et ál., 1993, Luna y Waggoner, 1996, Luna et ál., 1996; Molina, 1998; Espinosa y Molina, 1999; Zapata, 2003).

3.1. Tolerancia de los cultivos a la acidez del suelo

La tolerancia a la acidez del suelo es muy variable entre cultivos, variedades y cultivares. Algunos cultivos desarrollados originalmente en suelos calcáreos, como el algodón, el sorgo, la soya y la alfalfa, son susceptibles a niveles de 10 a 20% de saturación de Al, mientras que otros que han crecido en ambientes más lluviosos y caliente toleran hasta un 60% de saturación de Al. En la tabla 3, se presentan los valores de saturación de Al tolerados por algunos cultivos, y el porcentaje recomendado (RAS) para la producción de los mismos (Bertsch, 1995, 1997). Este tipo de información es utilizado en forma empírica por agricultores pequeños, quienes tienen establecidos sistemas de siembra secuenciales después de la quema de la biomasa aérea; de esta manera, el cultivo de cabecera es el arroz

de porte alto (tolerante a la acidez), intercalado con yuca y banano (moderadamente tolerantes), para luego sembrar maíz y frijol (poco tolerantes), cuando la ceniza proveniente de la quema ya ha reaccionado con el suelo.

Los mecanismos de tolerancia al Al reconocidos son los siguientes (Wright, 1976; Baligar y Duncan, 1990; Bertsch, 1995, 1997):

Diferenciaciones morfológicas en las raíces laterales y en los ápices radiculares, que les permiten desarrollar una mejor habilidad para continuar su elongación sin sufrir daño.

Cambios en el pH de la rizosfera. A través de absorciones diferenciales de iones y de secreciones de ácidos orgánicos, CO₂ y bicarbonato, la planta puede cambiar la reacción de su medio inmediato de crecimiento, y con esto regular la absorción de Al. Algunas variedades tolerantes al Al aumentan el pH de su medio, mientras que en las sensitivas, éste es muy bajo (lo disminuyen).

Translocación más lenta del Al a la parte aérea de las plantas. Algunas especies y variedades tolerantes al Al acumulan este elemento en las raíces, y lo trasladan a la parte aérea más lentamente que las variedades sensitivas. Eso no quita que existan especies de árboles y helechos adaptados a condiciones de acidez que acumulan altas cantidades de Al en el follaje.

En variedades tolerantes, el Al de las raíces no impide la absorción y translocación del Ca, Mg y K, como sí ocurre con especies sensitivas. Se ha demostrado la existencia de antagonismos Al-Ca y Al-Mg en la zona radical.

En las variedades tolerantes al Al no se inhibe la absorción y translocación del P en la medida en que sucede en las variedades o especies susceptibles. Además, muchas especies o variedades tolerantes al Al, también toleran niveles muy bajos de P. O sea existe una habilidad diferencial para absorber, transportar y utilizar el P en presencia de Al.

En ciertas variedades un alto contenido de Si en la planta está asociado con la tolerancia al Al.

Como mecanismos de tolerancia a Mn se señalan:

- Reducida absorción y retención del Mn en los tejidos radiculares, sin interferir en la absorción y procesos fisiológicos de otros elementos.
- Bajo absorción de Mn y transporte rápido hacia la parte aérea evitándose los daños en la raíz.
- Incremento en el pH de la zona radical.
- Poder de oxidación de las raíces. El Mn es susceptible a reacciones redox y en sus formas oxidadas (Mn⁺³, Mn⁺⁴) no es absorbido por la planta.

Nicholaides y Piha (1986) desarrollaron un método que permite seleccionar variedades tolerantes a la acidez y que consiste en evaluar el rendimiento de cada cultivar con cal y sin cal; los resultados que se obtienen se grafican según los ejes de la Figura 3 y se considerarán como tolerantes a la acidez del suelo las variedades o cultivares que se ubiquen en el cuadrante IV, es decir las que tienen rendimiento relativo superior al 75-80% y además igual o más alto que el rendimiento promedio, en el suelo encalado, de la tercera parte de las variedades comparadas de mayor rendimiento. El método no considera la utilización de varios niveles de cal, por lo que cuando se evalúan variedades en suelos con diferente grado de acidez, puede que en algunos una variedad resulte como tolerante (se logró neutralizar la acidez que la perjudicaba con el nivel de cal empleado), mientras que en otros no, o sea faltó neutralizar la acidez que la perjudicaba (Alvarado et ál., 1989). En estos casos, se puede ordenar las variedades comparadas de mayor a menor rendimiento y considerar como más tolerantes aquellas que caen con mayor frecuencia en el tercio de rendimiento más alto.

Cultivo	% de Saturación de Al tolerado			% de Sat de Al recomendado (RAS)
	Alto	Medio	Bajo	
Arroz porte alto	X	X		
Arroz porte bajo		X	X	
Banano		X		<15
Cacao		X		<20
Café		40		<25
Camote		30		<20
Caña de azúcar		X		<20
Caupí	60			<40
Cítricos		X		<20
Coco		X		<30
Frijol			X	<20
Gandul	X			<40
Maíz		40		<25
Mango		X		<20
Maní		40		<25
Palma aceitera		X		<15
Papa		30		<20
Pejibaye		X		<25
Piña	X			<30
Plátano		X		<25
Sorgo			15	<20
Soya		X		<10
Trigo			10	<10
Yuca	75			<60

TABLA 3. Porcentaje de saturación de Al tolerado por algunos cultivos en suelos ácidos y RAS recomendado para esos cultivos en producción (tomado de Bertsch, 1995, 1997)

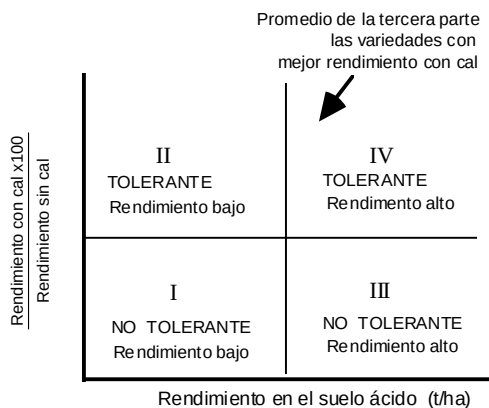


FIGURA 3. Esquema para seleccionar variedades tolerantes a la acidez (tomado de Nicholaides y Piha, 1986)

3.2. Efecto de la combustión de biomasa sobre la reducción de la acidez del suelo

En forma natural, los bosques y praderas pueden quemarse bajo condiciones climatológicas determinadas (períodos secos prolongados) y de manejo (acumulación de residuos después de la cosecha/poda o de la época seca), liberando en forma instantánea todos los nutrimentos asociados a la biomasa que se quema. En forma inducida, la quema de la biomasa aérea se hace rutinaria en el sistema de agricultura migratoria, así como en ciertas actividades agrícolas como parte del manejo de gramíneas. La quema forma parte de las actividades de limpieza del terreno para establecer cultivos y plantaciones forestales. La importancia de las quemas, en términos de superficie, se documenta para Centro América donde más de los 4000 incendios forestales ocurridos durante los años 1990 a 1995 quemaron más de 500 000 ha de bosque y debido a la sequía provocada por el fenómeno de El Niño el fuego destruyó más de 2.5 millones de hectáreas en 1998 (Observatorio del Desarrollo, 2002). En promedio, durante el período 1996-2001, para toda la región ocurren 17484 incendios /año con una mayor incidencia de eventos en Nicaragua, Honduras y Guatemala, los países más secos y extensos de la región (Asociación Conservación de la Naturaleza, 2005).

El efecto del fuego sobre las propiedades del suelo se da principalmente como una reducción del contenido de materia orgánica y de la saturación de acidez, asociado a un aumento en la suma de bases cambiables; además, el fuego puede acelerar la erosión del suelo descubierto y la volatilización de algunos elementos. De forma negativa, la quema de la biomasa aérea se relaciona con un

aumento en la erosión del suelo al reducirse la cobertura del mismo y la capacidad de infiltración y aumentarse la hidrofobicidad (Costa, 1990).

La cantidad de elementos que se libera de la biomasa aérea y que pasa a engrosar la disponibilidad de los mismos en el suelo, ocurre en forma moderada cuando se practican fuegos controlados (Richter, Ralston y Harms, 1982; Zelaya y Guillén, 2002) y tiene un impacto significativo sobre la acidez del suelo, a veces reconocido como efecto de enmienda inicial (Nye y Greenland, 1960; Ewel et ál., 1981; Richter, Ralston y Harms, 1982; Lal, Sánchez y Cummings, 1986; Balagopalan, 1987). En este caso, la adición de nutrimentos es poca y puede variar según la intensidad calórica del fuego entre 0.58 y 1.14 t/ha (Zelaya y Guillén, 2002), quienes recomiendan realizar las quemas durante los momentos del día en que haya menos viento, de manera que se pueda controlar mejor el proceso y se reduzcan las pérdidas de ceniza por el viento.

La cantidad de ceniza, y los nutrientes asociados, que cae al suelo como resultado de la quema total del bosque es muy variable y oscila entre 1.2 y 12.1 ton/ha, dependiendo del tipo y edad del bosque y del sustrato en el que haya crecido el mismo (tabla 4). Es notorio que la cantidad de N, Ca, Mg y K adicionados es mayor que la de Fe, S, P y Mn, con cantidades de Zn, Cu y B aún muy inferiores. Drechsel y Zech (1994) mencionan que en plantaciones maduras de teca, la adición de N atmosférico más el proveniente de la mineralización de los residuos en descomposición, puede suplir más del 70 % del N requerido por una plantación, siendo que esa cantidad se puede reducir al 15 % cuando ocurren incendios en forma recurrente, lo que obliga al sistema a ceder parte del N de reserva del suelo.

Variable	Manaus, Brasil (T. Acrorhox)		Yurimaguas, Perú (T. Paleudult)		Chapare, Bolivia (T. Dystropept)
Bosque (edad, años)	Primario	Secundario (12)	Secundario (25)	Secundario (17)	Secundario (11)
N (kg/ha)	80	41	127	67	1
Ca (kg/ha)	82	76	174	75	155
Mg (kg/ha)	22	26	42	16	31
K (kg/ha)	19	83	131	38	140
P (kg/ha)	6	8	17	6	9
Zn (kg/ha)	0.2	0.3	0.5	0.5	0.7
Cu (kg/ha)	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2
Fe (kg/ha)	58	22	4	8	6
Mn (kg/ha)	2	1	11	7	3
S (kg/ha)	n.d.	n.d.	24	n.d.	n.d.
B (kg/ha)	n.d.	n.d.	0.3	n.d.	n.d.
Cenizas (t/ha)	9.2	4.8	12.1	4.0	1.3

TABLA 4. Cantidad de ceniza y nutrientes asociados a la misma como resultado de la quema del bosque (adaptado de Sánchez, 1985 y Aldunate y Mejía, 1991)

Szott, Fernández y Sánchez (1991), mencionan que no todos los nutrientes asociados a la ceniza depositada después de la quema son aprovechados por la

vegetación subsiguiente, ya que una buena parte de los mismos se pierde a través del ciclo hidrológico (lixiviación, erosión, escorrentía) o intercambio gaseoso. La cantidad de nutrientes perdidos depende del tipo de suelo, en el tanto en que determina el proceso de reciclarlos/lixiviarlos y en general la velocidad de los procesos de pérdida de nutrimentos (tabla 5). Puede notarse como se pierden más nutrientes de los suelos fértiles que de los de baja fertilidad y que cuanto más arenoso sea el suelo menor es su capacidad de intercambio de cationes, lo que facilita la pérdida de los nutrientes asociados a la ceniza proveniente de la combustión de biomasa.

País	Pérdida de nutrimentos (kg/ha/año)				
	N	P	K	Ca	Mg
Suelos moderadamente fértiles					
Costa Rica	19.4	0	3.6	5.7	8.5
Panamá	nd	0.7	9.3	163.0	44.0
Papua N. Guinea	nd	nd	15.0	25.0	51.0
Oxisoles/Ultisoles					
Venezuela	nd	30.0	4.6	3.9	0.7
Brasil	0.2	0.008	0.4	tr.	tr.
Brasil	nd	0.4	12.7	16.7	8.1
Malasia	nd	nd	11.3	2.1	1.5
Esodosoles /Psamments					
Venezuela	nd	16.0	nd	2.8	nd
Bosque Montano					
Venezuela	5.0	0.3	2.2	1.6	0.6

TABLA 5. Pérdida de nutrientes en ecosistemas de bosques tropicales a través del ciclo hidrológico (tomado de Szott, Fernández y Sánchez, 1991)

4. El encalado y la acidez del suelo

El encalado consiste en la aplicación masiva de sales básicas con el objeto de neutralizar la acidez del suelo. Los productos que se utilizan como alcalinizantes o correctivos de la acidez del suelo son principalmente carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de Ca y/o Mg. Debido a su diferente naturaleza química, estos materiales presentan una capacidad de neutralización variable.

La acción neutralizante de los materiales de encalado no se debe en forma directa al Ca y el Mg, sino más bien a las bases químicas a las cuales están ligados estos cationes: CO_3^{-2} , OH^- , y SiO_3^{-2} . Los cationes reemplazan a los iones ácidos de las posiciones intercambiables y los ponen en solución; además las sales básicas se disocian y generan cationes y OH^- . Posteriormente los iones ácidos en solución pueden entrar en contacto con la cal y el agua del suelo (Espinosa, 1995). Los OH^- generados por los carbonatos, hidróxidos y silicatos son los que neutralizan

la acidez del suelo al propiciar la precipitación del Al como $\text{Al}(\text{OH})_3$ y la formación de agua.

Las principales reacciones del encalado en el suelo se incluyen en la figura 4; de la misma se deduce que el Ca no interviene en la neutralización de la acidez, si no más bien es el anión CO_3^{-2} el que al hidrolizarse produce iones OH^- que neutralizan los iones H^+ provenientes de la hidrólisis del Al y precipitan al mismo Al.

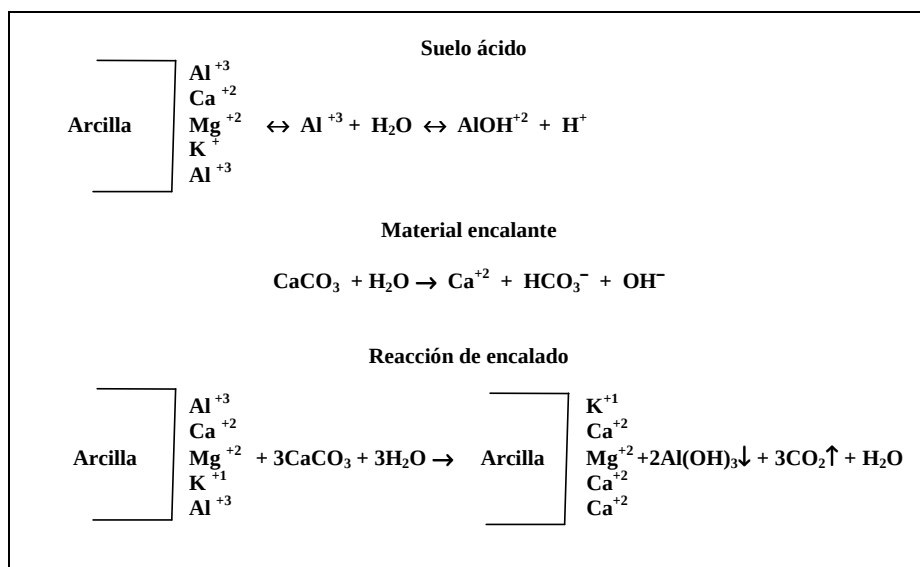


FIGURA 4. Reacciones de encalado de suelos ácidos (adaptado de Tisdale et ál., 1993)

El proceso inverso también puede ocurrir, debido a que los iones básicos como Ca, Mg y K pueden ser removidos del suelo por la absorción de las plantas o la lixiviación, siendo reemplazados por Al^{3+} . A medida que ocurre este proceso, se incrementa la actividad del H^+ y se reduce el pH del suelo. La acidificación progresiva del suelo es favorecida cuando se utilizan dosis altas de fertilizantes nitrogenados amoniacales.

4.1. Estimación de la dosis de cal para neutralizar la acidez del suelo

Las siguientes fórmulas para calcular la necesidad de cal para neutralizar la acidez del suelo se basan en el principio de linealidad entre la cantidad de producto neutralizante aplicado y la disminución del Al intercambiable del suelo. El criterio práctico que domina en la actualidad es utilizar una dosis de cal que

reduzca la saturación de acidez del suelo a un nivel que sea tolerable por el cultivo (tabla 3), de acuerdo con alguna de las siguientes fórmulas propuestas para cuantificar las dosis:

4.1.1. *Cochrane, Salinas y Sánchez (1980)*: Esta fórmula contempla la neutralización de un determinado % de saturación de acidez en relación con la CICE del suelo, multiplicado por una constante que cubre los factores que limitan la eficiencia de la reacción química, a saber, calidad del material encalante, reacciones paralelas en el suelo y condiciones climáticas:

$$\text{ton CaCO}_3/\text{ha} = \frac{1.8 (\text{Al} - \text{RAS}) (\text{C I C E})}{100}$$

Donde: Al = % de saturación de acidez existente en el suelo; RAS = % de saturación de acidez deseado (tabla 1) y CICE = Capacidad de intercambio catiónico efectiva.

4.1.2. *Van Raij (1991)*: El principio de esta fórmula es exactamente el mismo que el del caso anterior, sólo que expresado en términos de saturación de bases en lugar de acidez, con la ventaja que incluye el factor f, que se refiere a la calidad del material encalante.

$$\text{ton CaCO}_3/\text{ha} = \frac{(\text{V1} - \text{V2}) (\text{C I C E})}{100} \times f$$

Donde: V1 = % de saturación de bases deseado; V2 = % de saturación de bases que presenta el suelo, CICE = Capacidad de intercambio catiónico efectiva, f = 100/PRNT y PRNT= Poder Relativo de Neutralización Total = (Equivalente Químico x Eficiencia Granulométrica)/100

4.1.3. *Fórmula modificada*: En esta fórmula se combinan los criterios prácticos de las dos anteriores. Se expresa en términos de % de saturación de acidez y se incluye el factor f de calidad del material encalante. Al realizar esto, la constante se disminuye a 1.5 pues quedan menos factores de eficiencia de la neutralización sin contemplar. Dentro de las reacciones paralelas que se incluyen en esta constante están, la neutralización del Al no intercambiable, las correcciones de peso/volumen que pueden ser necesarias para ajustar el encalado a una profundidad de incorporación de 15 cm (Yost et ál., 1991), y para

neutralizar los nuevos puntos de carga negativa generados en muchos coloides en medios básicos al ionizar sus OH⁻ terminales.

$$\text{ton CaCO}_3/\text{ha} = \frac{1.5 (\text{Al} - \text{RAS}) (\text{CICE})}{100} \times f$$

4.1.4. *Recomendaciones de Encalado en NuMaSS 2.0*: Smyth y Osmond (2003) consideran el uso de una fórmula para calcular la necesidad de material encalante, la cual se basa en el principio del modelo discontinuo lineal, es decir, dos líneas de diferente pendiente, debido a que la neutralización de la acidez cercana a la capa doble difusa es más difícil que la que ocurre lejos de las superficies coloidales. De esta manera, cuando el nivel crítico de saturación de Al (AlC) para el cultivo es mayor a 20%, se utiliza la fórmula

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = F [\text{Al} - (\text{AlC} \times \text{CICE} / 100)]$$

Donde el valor F = 2.5 si la CICE de arcilla es menor a 4.5 cmol(+)/L y F = 1.3 si CICE de arcilla es mayor a 4.5 cmol(+)/L.

Cuando el nivel crítico de saturación de Al (AlC) es menor al 20%, se emplea la fórmula

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = F [\text{Al} - (20 \times \text{CICE} / 100)] + 7.5 [(19 - \text{AlC}) \times \text{CICE}/100]$$

4.2. Fuentes de encalado

Comercialmente se utilizan varios compuestos reconocidos como *cal agrícola* y que dependiendo de su disponibilidad pueden tener precios variables en diferentes sitios o países. Los compuestos comúnmente más empleados son los siguientes:

4.2.1. Cal calcítica – CaCO₃: Es el material más utilizado para encalar los suelos es la calcita que se obtiene a partir de la roca caliza, la cual no es pura ya que contienen arcillas, hierro, arena y granos de limo. El carbonato de Ca es un material bastante insoluble, por lo que debe ser convenientemente molido para aumentar su eficiencia agronómica y en su forma pura contiene 40% de Ca.

4.2.2. Óxido de calcio — CaO: Es el producto obtenido de la calcinación total del carbonato de Ca a una temperatura aproximada a 1000 °C y se conoce

como cal viva o cal quemada. Es un material muy cáustico y de manejo difícil porque puede causar quemaduras al contacto con la piel. Su velocidad de reacción es mayor que el carbonato debido a su mayor concentración de Ca (71% en su forma pura) y a que por ser un óxido, reacciona rápidamente al contacto con el agua, provocando una fuerte reacción exotérmica y liberando iones OH^- . Se presenta normalmente como polvo bastante fino y su precio es más alto que el del CaCO_3 .

4.2.3. Hidróxido de calcio — $\text{Ca}(\text{OH})_2$: Se obtiene a partir de la reacción del CaO con agua y se conoce como cal apagada o hidratada y es la forma en que se comercializa el CaO producido por calcinación. Es un polvo blanco, con alto grado de solubilidad y de rápida reacción en el suelo con un 54% de Ca en su forma pura. Es un material de mayor costo que el carbonato y con una reacción intermedia entre este y el CaO en neutralizar la acidez del suelo.

4.2.4. Cal dolomítica — $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$: La dolomita pura contiene 21.6% de Ca y 13.1% de Mg. Aunque este material reacciona más lentamente en el suelo que el carbonato de Ca, tiene la ventaja de que suministra Mg, el cual es un elemento que con frecuencia se presenta también deficiente en suelos ácidos.

4.2.5 Óxido de Magnesio - MgO : Este es un material compuesto solo de Mg. Se le conoce comercialmente como Magox[®], y en su forma pura contiene 60% de Mg. Su capacidad de neutralización de la acidez es mucho más elevada que la de otros materiales, pero dado que es un producto poco soluble en agua, debe ser molido finamente para que actúe como material neutralizante de la acidez del suelo.

4.3. Calidad de los materiales de encalado

Uno de los aspectos más importantes de considerar en la determinación de la eficiencia agronómica de un material de encalado es su calidad, la cual está fundamentada en los siguientes factores: 1) pureza química; 2) forma química; 3) tamaño de partícula y 4) poder relativo de neutralización total.

4.3.1. *Pureza química*: La pureza permite conocer la composición química de la cal y expresarla como equivalente de carbonato de Ca y se ve alterada por la presencia de impurezas como arcilla o minerales de Fe. Como los materiales difieren en su capacidad de neutralizar la acidez del suelo, para conocer esta característica se utiliza el criterio de Efectividad Química, Equivalente Químico

(EQ) o Poder de Neutralización, que se define como la capacidad de neutralizar la acidez que tiene un material con relación al carbonato de Ca puro, al cual se le asigna un valor del 100%. En la tabla 6 se presentan los valores de Equivalente Químico de varios materiales correctivos de acidez en su forma pura. Con relación al carbonato de Ca puro, los óxidos e hidróxidos presentan una mayor capacidad potencial de neutralización. El óxido de Mg constituye la forma química más eficiente para neutralizar la acidez del suelo.

Material	Equivalente Químico (EQ)	Composición Promedio (%)	% de Ca y Mg
Carbonato de calcio	100	85-95 CaCO_3	40
Dolomita	108	42 MgCO_3 52 CaCO_3	12 21
Óxido de calcio	175	85 CaO	71
Hidróxido de calcio	138	65 Ca(OH)_2	54
Hidróxido de magnesio	172	-	41
Carbonato de magnesio	119	-	28.5
Óxido de magnesio	248	60-90 MgO	60
Silicato de calcio	86	-	34.4
Silicato de magnesio	100	-	24

TABLA 6. Equivalentes químicos y composición química de diferentes enmiendas

La norma internacional considera que los materiales con menos del 80% de equivalente de CaCO_3 (32% de Ca) son de baja calidad (Nicholaides, 1983) y la misma legislación establece los siguientes contenidos mínimos: óxido de Ca EQ=140 (56% Ca); hidróxido de Ca EQ=110 (44% Ca). La legislación brasileña acepta un valor mínimo de EQ=67 % para calcáreos molidos (Alcarde, 1992).

4.3.2. *Forma química:* Con base en las diferentes formas químicas existentes, se presentan también diferentes capacidades de neutralización y reactividad. Los productos a base de carbonatos y silicatos neutralizan la acidez a través de sus bases químicas CO_3^{-2} y SiO_3^{-2} , las cuales son débiles. En tanto que los óxidos reaccionan inmediatamente con el agua del suelo transformándose en hidróxidos, por lo cual los óxidos e hidróxidos neutralizan la acidez a través de su base OH^- que es fuerte, y son más efectivos.

4.3.3. *Tamaño de partícula:* La fineza de las partículas de la cal determina su velocidad de reacción ya que conforme se reduce su tamaño, aumenta su área o superficie de contacto. Un volumen de 1 m^3 cúbico de cal sólo tiene 6 m^2 de superficie, mientras que esa misma cantidad molida y colocada a través de un tamiz de malla 100, tiene 60 000 m^2 de área superficial. Para estimar la Eficiencia Granulométrica de un material de encalado, este se pasa por una secuencia de mallas o cribas de diferente tamaño, donde se obtiene la cantidad de material retenido en ellas, tal como se indica en la tabla 7. Lo normal en un análisis de la

Eficiencia Granulométrica es que se utilice la siguiente secuencia de mallas: 8 ó 10, 20, 40, 60 y 80 mesh.

Número de mallas	Abertura de mallas (mm)	Eficiencia relativa (%)
< 8	> 2.36	0
8 - 20	2.36 - 0.85	20
20 - 40	0.85 - 0.42	40
20 - 60	0.85 - 0.25	60
> 60	< 0.25	100

TABLA 7. Eficiencia relativa granulométrica de la cal con base en el tamaño de malla

Los materiales que son retenidos en tamiz de 8 son inefectivos. Los que pasan este tamiz pero se retienen en tamiz 20 son un 20% efectivos pero reaccionan muy poco. Los que pasan el tamiz 20 pero se retienen en el tamiz 60, son un 60% efectivos y pueden reaccionar en un período de 10-18 meses, y todos los que pasan este último tamiz tienen un 100% de efectividad y reaccionan entre 3 y 6 meses. La cal que pasa por un tamiz 80 es muy fina y puede reaccionar en 1-3 meses. La condición ideal es que el 100% del material pase por una malla 8 y 70-80% pase por una malla 60. Los requisitos mínimos de calidad en Brasil son los siguientes: el 95% de la cal debe pasar por una malla 10, el 70% del material debe pasar por malla 20, y al menos el 50% del material debe pasar por malla 60 (Alcarde, 1992).

4.3.4. *Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT)*: Para valorar en forma conjunta la pureza química y la fineza, se utiliza un índice de eficiencia del material de encalado conocido como PRNT. Se obtiene multiplicando la Eficiencia Granulométrica por el Equivalente Químico:

$$\text{PRNT} = \frac{\% \text{EG} \times \% \text{EQ}}{100}$$

El PRNT indica el % de Equivalente Químico o Poder de Neutralización de la cal que es capaz de reaccionar en un lapso de 3 meses. Por ejemplo, un material con EQ=90%, y EG=80%, tendrá un PRNT=(90 x 80)/100=72%. Esto quiere decir que el 72% del material reaccionará en un plazo de 3 meses y el restante 18% (90-72=18), reaccionará posteriormente. A mayor valor del PRNT, más reactivo es el material de encalado por lo que para el café se recomienda que la cal empleada tenga al menos un PRNT de 75% (Malavolta, 1993).

Al conocer este índice es posible ajustar la dosis de cal a emplear de acuerdo con su grado de calidad. Un material con un 50% de PRNT será la mitad de efectivo que otro con un 100% de PRNT. Además, el valor de PRNT permite seleccionar la cal de acuerdo con su costo por unidad de PRNT:

$$\text{Costo por unidad de PRNT} = \frac{\text{Costo por saco o TM de material}}{\text{PRNT del material}}$$

4.4. Método y época de aplicación

El método óptimo de aplicación es incorporar la cal en los primeros 15-20 cm de suelo, utilizando el arado o la rastra. De esta forma, se logra la mezcla del material con la capa del suelo donde se concentran las raíces de la mayoría de los cultivos. Sin embargo, esto no puede siempre lograrse debido al costo que representa o a que el cultivo está ya establecido, como en el caso de los perennes, por lo que la cal se aplica entonces en la superficie. Si la cal va a ser incorporada con arado, esta debe distribuirse en forma uniforme en todo el terreno. En cultivos perennes con distancias de siembra amplias, la cal debe distribuirse en el área de gotera o rodaja, que es donde se concentran las raíces. En cultivos perennes también resulta práctico incorporar un poco de cal en el hoyo de siembra antes de poner la planta, y otro poco en la rodaja. Normalmente, el suelo en la banda de fertilización tiende a ser más ácido debido al efecto residual de los fertilizantes nitrogenados, por lo que la aplicación de la cal en ese sitio es una medida eficaz.

En vista de que la cal requiere de humedad para reaccionar, la época más apropiada para aplicarla es al inicio de las lluvias o un poco antes. Sin embargo, no existen limitaciones en cuanto a la época de aplicación siempre que haya humedad en el suelo y que no coincida con un ciclo de fertilización al suelo. En siembras nuevas la cal debe ser incorporada antes de sembrar. Una vez aplicada la cal, se debe esperar un tiempo prudencial de un mes, para que reaccione antes de añadir el fertilizante. El contacto directo de la cal con fertilizantes nitrogenados amoniacales en la superficie del suelo puede favorecer la formación de carbonato de amonio, el cual a su vez se transforma en amoníaco y se pierde el N por volatilización. También el contacto con fertilizantes fosfatados causa pérdidas del elemento por formación de fosfatos de Ca insolubles.

4.5. Efecto residual de la cal

El efecto residual de la cal depende de su velocidad de reacción o reactividad en el suelo. Entre los factores que intervienen en este proceso se pueden citar:

4.5.1. *Condiciones de clima y suelo:* La alta temperatura y humedad, así como un valor alto de la acidez, favorecen la reacción de la cal. Por tal motivo, los materiales de encalado son más reactivos en zonas tropicales que en sitios fríos o templados. En suelos con pendientes muy fuertes, la cal aplicada

superficialmente puede perderse por escorrentía y erosión. Se ha demostrado que la lixiviación de Ca y/o Mg proveniente de la cal, es alta en suelos de texturas livianas y alta capacidad de infiltración. Los suelos ácidos de textura arenosa deben ser encalados con mayor frecuencia que los arcillosos.

4.5.2. *Naturaleza química del material*: Los productos que forman bases fuertes como los óxidos e hidróxidos reaccionan más rápido, pero su efecto residual no es muy prolongado debido a que el Ca y/o Mg pueden ser lixiviados con el tiempo en climas muy lluviosos. Las bases débiles como los carbonatos, son de reacción más lenta y de mayor efecto residual.

4.5.3. *Tamaño de partícula*: Los materiales más finos reaccionan mucho más rápido que los gruesos, y su efecto residual es menor. Los materiales muy finos pueden presentar pérdidas significativas por la acción del viento, además de mostrar aglutinación y adherencia de sus partículas, lo que dificulta su acción y distribución (Chaves, 1993a). La cal retenida en mallas 20 y 40 puede reaccionar en un plazo que oscila entre 1 y 3 años, dependiendo de las condiciones climáticas. El material retenido en malla 10 no tiene efecto sobre la acidez del suelo.

4.5.4. *Tipo de cultivo*: En cultivos de ciclo muy corto, como hortalizas y algunas ornamentales, es preferible el uso de materiales de rápida reacción y gran fineza tales como los óxidos e hidróxidos de Ca. En cultivos perennes se puede utilizar cales con un efecto residual más prolongado (con un poco de material más grueso).

4.5.5. *Intensidad de cultivo*: Los terrenos intensamente cultivados y fertilizados con nitrógeno, son más susceptibles a acidificarse rápidamente. Se ha demostrado que en suelos ácidos como los Andisoles y Ultisoles, el abonamiento intensivo con fuentes amoniacales como sulfato de amonio, nitrato de amonio y urea, pueden incrementar los problemas de acidez a mediano plazo si no se toman medidas oportunas de corrección. Los fertilizantes nitrogenados amoniacales dejan efecto residual ácido como consecuencia de la nitrificación del NH_4^+ por las bacterias del suelo.

4.5.6. *Dosis*: Dosis muy bajas o que subestiman el contenido de acidez intercambiable del suelo no reducen la acidez de forma cuantificable y su efecto residual es casi nulo. En tal situación, el análisis de suelos es la mejor herramienta para calcular la dosis de cal adecuada. Algunos suelos pueden presentar un nivel de acidez intercambiable bajo, pero ser deficientes en Ca. En este caso, la

aplicación de la cal es la forma más económica de suplir Ca como fertilizante, y el uso de una fórmula para calcular la dosis resulta innecesario, siendo más práctico agregar una cantidad moderada de cal (0.5-1 ton/ha) como fuente de Ca.

4.6. Respuesta de los cultivos al encalado

La respuesta de los cultivos y plantaciones forestales a la adición de cal depende de la tolerancia de las especies a la acidez. Su efecto positivo se ha comprobado en cultivos anuales como maní, frijol, arroz, soja, camote, arveja y maíz, aunque no en otros tolerantes como la yuca (Bouldin, 1979; Lathwell, 1979; Alvarado et ál., 1989). Efectos positivos de la adición de cal también se documentan para cultivos perennes como café, palmito y cítricos y plantaciones forestales (Espinosa, 1995; Alvarado y Fallas, 2004), aunque también se ha demostrado que algunas especies forestales no requieren este tipo de enmienda (Herrera y Alvarado, 2001). En estos casos, la dosis de encalado normalmente recomendada oscila entre 0.5 y 2 ton/ha y en algunos casos hasta 3.

Algunos experimentos muestran que en suelos fuertemente ácidos, la dosis de cal a emplear puede ser elevada. Salas et ál. (1996) encontraron una respuesta lineal a la aplicación de cal en tiquisque blanco sembrado en un Ultisol, encontrando que la dosis más alta utilizada (4 ton/ha), no logró maximizar el rendimiento. Rojas et ál. (1996) también encontraron una respuesta lineal a la aplicación de diferentes dosis de cal en naranja Valencia (tabla 8). La dosis más alta de 3 ton/ha produjo el mejor rendimiento, en un Ultisol de Costa Rica, con 66% de saturación de Al. Estos resultados sugieren la necesidad de investigar el efecto de dosis mayores de 4 ton/ha de cal en los suelos con problemas serios de acidez.

<i>Tratamiento</i>	<i>Cajas/ha</i>	<i>LSST*/caja</i>	<i>LSST / ha</i>
Testigo	235	3.04	714
CaCO₃ 1 ton/ha	267	3.54	946
CaCO₃ 2 ton/ha	423	3.29	1 391
CaCO₃ 3 ton/ha	551	3.54	1 952
CaCO₃ + MgO 1 ton/ha	244	3.51	856
CaCO₃ + MgO 2 ton/ha	358	3.40	1 218
CaCO₃ + MgO 3 ton/ha	558	3.32	1 851

TABLA 8. Efecto de la aplicación de cal en el rendimiento de naranja Valencia, cosecha 1995, Costa Rica (tomado de Rojas et ál. 1996)

* LSST = Libras de Sólidos Solubles Totales

4.7. Sobreencalado

Se entiende por sobreencalado la utilización de dosis mayores de cal de las necesarias para neutralizar el Al intercambiable. Dosis de encalado mayores de 2-3 t/ha pueden asociarse con este tipo de problemas, por eso las recomendaciones no deben exceder esos niveles. Este fue un efecto que ocurrió frecuentemente cuando el desconocimiento de las particularidades de los suelos tropicales condujo a la imitación de las prácticas de encalado realizadas en la zona templada que suponen corregir los problemas de acidez llevando los suelos hasta la neutralidad mediante la aplicación de cal.

Como los suelos tropicales son esencialmente sistemas de óxidos, sistemas alofánicos o sistemas de aluminosilicatos laminares con revestimientos de óxidos, estas prácticas no funcionan, debido a la presencia de extensos mecanismos buffer (o reguladores) que impiden cambios progresivos en el pH. En estos suelos, después de que se ha neutralizado la acidez debida a Al (pH 5.5) se requieren cantidades exorbitantes de cal para hacer variar el pH en una unidad.

Las consecuencias del sobreencalado son:

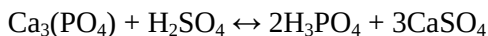
- Reducción del rendimiento por afectarse otras funciones del suelo y de la planta
- Disminución de la disponibilidad de algunos nutrimentos:
 - o P: debido a que se favorece la formación de fosfatos insolubles de Ca.
 - o B: las condiciones básicas favorecen el fenómeno de adsorción de B en suelos con capacidad de adsorción de aniones.
 - o Zn: disminuye su solubilidad cuando sus pH se acercan a niveles 6-7.
 - o Mn: en pH superiores a 6.2 el Mn tiende a precipitar en presencia de óxidos de Fe y Al.
- Deterioro de la estructura. Al subir el pH, el Fe se transforma, y su efecto agregante disminuye, por lo tanto se forman agregados más pequeños, que reducen las tasas de infiltración y pueden favorecer la erosión. Esto también puede deberse a un aumento de la actividad microbiana que degrada los agentes cementantes de tipo orgánico.

4.8. Uso de yeso agrícola

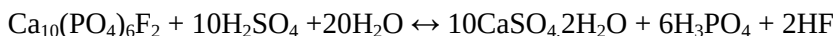
Recientemente se ha visto la utilidad de emplear yeso para el mejoramiento de suelos ácidos e infértiles como un corrector de la acidez del subsuelo, del encostramiento superficial y como fuente de Ca y S en los cultivos; además,

disminuye el nivel de Al intercambiable, su actividad, y su saturación en el complejo de intercambio del suelo (van Raij, 1988; Shaimberg et ál., 1989; Chaves, 1991; Sumner, 1993; Zapata, 2003). La aplicación de yeso al suelo permite mejorar las condiciones nutricionales del subsuelo, lo que favorece el desarrollo de las raíces y por ende del aprovechamiento del agua y nutrientes del suelo; como beneficios colaterales se da una reducción en la escorrentía superficial y la erosión (Souza et ál., 1992)

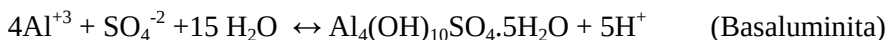
El yeso se obtiene de yacimientos o depósitos naturales de evaporitas sedimentaria (Shainberg et ál., 1989). Además, el yeso agrícola o sulfato de Ca dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es un subproducto de la industria del ácido fosfórico, el cual es necesario para la fabricación de fertilizantes fosfatados como triple superfosfato y fosfatos de amonio. La roca fosfórica (apatito) es atacada con ácido sulfúrico para producir ácido fosfórico y yeso como subproducto:



El fosfoyeso es un subproducto de la fabricación industrial por vía húmeda, en donde el ácido sulfúrico reacciona con el fluorapatito de acuerdo a la siguiente reacción (Zapata, 2003):



La aplicación de yeso a los suelos no cambia su pH en un rango mayor de 0.3 unidades, pero sí causa una disminución importante de la toxicidad de Al, elemento que precipita como jurbanita, basaluminita, y alunita (Pavan y Bingham, 1982; Sposito, 1989; Zapata, 2003), como se muestra en las siguientes ecuaciones:



Los sulfatos de Al de las ecuaciones anteriores son compuestos de muy baja solubilidad, por ello, el efecto depresor del Al disminuye; los iones H^+ que se forman, si no son neutralizados, son los causantes de la reducción del pH en 0.3 unidades. La formación de alunita podría además causar una disminución del K^+ intercambiable, efecto negativo a considerar en suelos de muy baja fertilidad (Sposito, 1989).

De acuerdo con van Raij (1998), la aplicación de yeso puede reducir la saturación de Al al aumentar la saturación de Ca. Por ejemplo, si el suelo tiene una suma de bases (Ca+Mg+K) de 2 cmol(+)/L y 2 cmol(+)/L de Al, la saturación de Al sería del 50%; de manera que si la suma de bases aumenta a 4 cmol(+)/L, la saturación de Al se reduciría un 33%. Este efecto es reconocido como dilución del Al intercambiable y no como una reducción de la acidez debida al Al. Además, en suelos de carga variable la liberación de iones OH^- por iones SO_4^{2-} absorbidos en las aristas de oxihidróxidos de Fe y Al permite formar formas no tóxicas de Al (AlOH^{+2} y $\text{Al}(\text{OH})_2^+$), proceso conocido como autoencalado (Revé y Sumner, 1972, Zapata, 2003).

A pesar de su pequeña solubilidad en agua, el yeso puede reaccionar a corto plazo en el suelo y constituir una fuente de Ca y S para los cultivos. Su composición varía de 17 a 20% Ca y de 14 a 18% de S. La acción del yeso se produce a través de la saturación del complejo de cambio con Ca, que desplaza cationes a la solución del suelo y parte del mismo Ca, los cuales están sujetos a ser lixiviados por el agua de infiltración. El SO_4^{2-} también sufre reacciones de intercambio y adsorción y es susceptible a lixivarse, arrastrando consigo a los cationes desplazados a la solución del suelo, hacia los horizontes subsuperficiales mediante la formación de pares iónicos neutros como CaSO_4 , MgSO_4 y K_2SO_4 . Esta lixiviación puede mejorar la fertilidad del subsuelo, enriqueciéndolo con Ca, Mg, K y S, y estimulando un crecimiento más profundo en el suelo de las raíces. Con ello, se incrementa el volumen de suelo explorado por las raíces, y en consecuencia las plantas son menos perjudicadas por déficit de humedad en periodos secos (Alcarde, 1988).

El cálculo de la necesidad de yeso no es fácil debido a la dificultad de estimar los efectos de autoencalamiento, de dilución del Al intercambiable y la precipitación de sales de sulfato de Al, anteriormente mencionadas. Sin embargo, en Brasil se han desarrollado algunos criterios para hacer recomendaciones de yeso (Malavolta, 1993), que se presentan a continuación:

Se recomienda el uso del yeso cuando el análisis de suelo realizado en el subsuelo (21-40 cm de profundidad) muestra <60% de saturación de Ca (con base en la CICE).

Si el análisis de subsuelo muestra >20% de saturación de Al.

Cálculo de las necesidades de yeso:

$$\text{ton/ha de yeso} = (0.6 \times \text{CICE} - \text{Ca}) \times 2.5$$

$$\text{ton/ha de yeso} = (\text{Al} - 0.2 \times \text{CICE}) \times 2.5$$

No es conveniente aplicar más de 2 ton/ha de yeso, aún cuando el uso de las fórmulas anteriores indiquen una dosis mayor.

Otro criterio mencionado por Vitti et ál. (1996) establece recomendaciones de yeso con base en la clase textural del suelo:

Suelos arenosos (<15% de arcilla):	0.5 ton/ha
Suelos francos (15-35% de arcilla):	1.0 ton/ha
Suelos arcillosos (36-60% de arcilla):	1.5 ton/ha
Suelos muy arcillosos (>60% de arcilla):	2.0 ton/ha

Si el suelo necesita ser encalado, se recomienda aplicar, primero, la cal e incorporarla, antes de agregar el yeso. Con ello, se incrementa la efectividad del yeso en los horizontes subsuperficiales, dado que el incremento de pH provocado por la caliza en el horizonte superficial Ap, disminuye la adsorción de SO_4^{-2} en este horizonte (Espejo et ál., 1999). La aplicación conjunta de yeso y cal ayuda a reducir los problemas de acidez en el subsuelo, en un período de tiempo menor al que se logra con la aplicación exclusiva de cal. La aplicación simultánea de yeso y cal se puede hacer mediante la mezcla física de ambos materiales directamente en la finca, o a través de un proceso industrial. Normalmente, la proporción de la mezcla es del 70 al 75% de carbonato de Ca o cal dolomita, y del 25 al 30% de yeso, lo que permite la aplicación de las dos enmiendas en una sola operación. No es conveniente utilizar dosis excesivas de yeso en suelos ácidos bajos en Ca y Mg, debido a que se puede incrementar la lixiviación de bases y disminuir la fertilidad de los suelos.

5. Literatura citada

- ABRUÑA F.; PÉREZ R.; VICENTE J.; FIGARELLA J.; SILVA S. 1974. Response of green beans to acidity factors in six tropical soils. Journal of Agric. Univ. Puerto Rico. 58: 44-58.
- AGUILAR A.; ALCANTAR G.; ETCHEVERS J.D. 1994. Acidez del suelo y encalado en México. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. México, D.F. 56 p.
- ALCARDE J.C. 1988. Contraditória, confusa e polemica: é a situação do uso do gesso na agricultura. Informações Agronomicas. POTAFOS 41:1-3
- , 1992. Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas. ANDA, Sao Paulo, Brasil. Boletim Técnico n.º 6. 26 p.
- ALDUNATE J.; MEJÍA R. 1991. Dinámica de nutrimentos con bajos insumos, sistemas arroz-caupí en el subtrópico húmedo de la Provincia de Carrasco, Bolivia. In. Smyth, T.J., Raun, W.R. y Bertsch, F. (eds.) Manejo de suelos tropicales en Latinoamérica. II Taller latinoamericano de manejo de suelos tropicales. San José, Costa Rica, 9-13 de julio 1990, pp. 15-22.
- ALVARADO A.; FALLAS J.L. 2004. La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Teutona grandis*) en suelos ácidos de Costa Rica. Agronomía Costarricense 28(1): 81-87.

- ALVARADO A.; ACOSTA G.; AYALA E.; DELGADILLO R.; INTURIAS G.; LENNIS J.; PRADO C. 1989. La acidez del suelo y el encalado de cultivos anuales en el Chapare. *Revista de Agricultura*. 46 (14): 17-24.
- ASOCIACIÓN CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA. 2005. Assessing linkages between agriculture and biodiversity in Central America: historical review and future perspectives. San José, Costa Rica. 140 p.
- BALAGOPALAN M. 1987. Effects of fires on soil properties in different forest ecosystems of Kulamav, Kerala, India. *Malaysian Forester* 50(1): 99-106.
- BALIGAR V.C.; DUNCAN R.R. (eds.). 1990. Crops as enhancers of nutrient use. San Diego, California. Academic Press, Inc. 574 p.
- BARBER S. 1984. Liming materials and practices. In. *Soil Acidity and Liming*. F. Adams (ed.), Wisconsin, ASA pp. 171-209.
- BERTSCH F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José, Universidad de Costa Rica. 86 p.
- , 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica. ACCS. 157 p.
- BOULDIN D.R. 1979. The influence of subsoil acidity on crop yield potential. *Cornell International Agricultural Bulletin* No. 34. Ithaca, New York. 17 p.
- BORNEMISZA E. 1965. Conceptos modernos de acidez del suelo. *Turrialba* 15(1): 20-24.
- BORNEMISZA E.; ALVARADO A. (eds.). 1975. Manejo de suelos en la América Tropical. Trabajos presentados durante el Seminario sobre Manejo de Suelos y el Proceso de Desarrollo en América Tropical, celebrado en el CIAT, Cali, Colombia, 10-14 febrero, 1974. Litografía e Imprenta Lehmann, S.A. San José, Costa Rica. 582 p.
- CARBALLO L.; MOLINA E. 1993. Caracterización física y química de materiales de encalado en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 17(2):105-110.
- CHAVES M.A. 1991. Características y uso potencial del yeso en la agricultura costarricense. *Revista Colegio de Ingenieros Agrónomos*. (Costa Rica) n.º 7: 18-20.
- , 1993a. Importancia de las características de calidad de los correctivos de acidez del suelo: desarrollo de un ejemplo práctico para su cálculo. San José, Costa Rica. DIECA. 41 p.
- , 1993b. Determinación de la calidad de 13 materiales de uso comercial empleados para el encalado de los suelos en Costa Rica a través de su valoración fisicoquímica. In: IX Congreso Agronómico Nacional. Colegio de Ingenieros Agrónomos. San José, Costa Rica. Vol. II. 111 p.
- COCHRANE T.; SALINAS J.; SANCHEZ P. 1980. An equation for liming acid mineral soils to compensate crops aluminium tolerance. *Tropical Agriculture* 57(2):133-140.
- COSTA L.M. 1990. Manejo de solos em áreas reflorestadas. En: N.F. Barros y R.F de Novais (eds.). *Relação solo-eucalipto*. Folha de Viçosa. Vinosa MG, Brasil. pp. 237-264.
- CRASWELL E.T.; PUSHPARAJAH E. (eds.) 1989. Management of acid soils in the humid tropics of Asia. *ACIAR Monograph* No. 13. (IBSRAM Monograph No. 1). Thailand. 118 p.

- CRAVO M.S.; SMYTH T.J. 1997. Manejo sustentado da fertilidade de um latossolo da amazonia central sob cultivos sucesivos. *Rev. Bras. Ciencia Solo* 21: 607-616.
- CSILLAG J.; LUKACS A.; BUJITAS K.; NEMETH T. 1996. Release of Cd, Cr, Ni, Pb and Zn to the soil solution as a consequence of soil contamination and acidification. In: 9th Conference of the International Soil Conservation Organization (ISCO). Bonn, Germany, pp. 45-46.
- DRECHSEL P.; ZECH W. 1994. DRIS evaluation of teak (*Tectona grandis* L.f.) mineral nutrition and effects of nutrition and site quality on the teak growth in West Africa. *Forest Ecology and Management* 70: 121-133.
- ESPEJO SERRANO, R., SANTANO ARIAS, J., GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, P. 1999. Soil properties that affect sulphate adsorption by Paleixerults in western and central Spain. *Commun. Soil Sci. Plant Anal* 30:1521-1530.
- ESPINOSA J.; MOLINA E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. INPOFOS. 42 p.
- EWEL J.; BERISH C.; BROWN B.; PRICE N.; RAICH J. 1981. Slash and burn impacts on a Costa Rican wet forest site. *Ecology* 62(3): 816-829.
- HERRERA B.; ALVARADO A. 2001. Effects of increasing soil acidity and decreasing nutrient availability on the growth of *Vochysia ferruginea* a secondary rain forest of northern Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 25(2): 57-64.
- HINDZE B.; ELLIOT C.R. (eds.). 1989. Acid tropical soils management and land development practices. IBSRAM Technical Notes No. 2. Thailand. 242 p.
- KAMPRATH E.J. 1984. Crop response to lime on soils in the tropics. In *Soil Acidity and Liming*. F. Adams (ed.). Wisconsin, ASA, pp. 349-369.
- KASS D.; JIMÉNEZ J.; SCHLÖNVOIGT A. 1997. Cómo hacer el cultivo en callejones más productivo, sostenible y aceptable a pequeños productores. *Agroforestería de las Américas* 4(14):21-23.
- KASS D.; BARRANTES A.; BERMÚDEZ W.; CAMPOS W.; JIMÉNEZ J.M.; SÁNCHEZ J. 1989. Resultados de seis años de investigación de cultivo en callejones (*alley cropping*), en «La Montaña», Turrialba, Costa Rica. *El Chasqui* (C.R.) 19: 5-24.
- LAL R.; SÁNCHEZ P.A.; CUMMINGS R.W. (eds.). 1986. Land clearing and development in the tropics. A.A. Balkema. Rotterdam, Holanda. 449 p.
- LATHWELL D.J. 1979. Crop response to liming of ultisols and oxisols. *Cornell International Agricultural Bulletin* No. 35. Ithaca, New York. 36 p.
- LUNA P.; WAGGER M.G. 1996. Management of tropical legume cover crops in the Bolivian Amazon to sustain crop yields and soil productivity. *Agronomy Journal* 88(5): 765-776.
- LUNA P.; WAGGER M.G.; GUMPERTZ M.L. 1996. Decomposition and nutrient release dynamics of two tropical legume cover crops. *Agronomy Journal* 88(5): 758-764.
- MALAVOLTA E. 1993. Nutrição mineral e adubação do cafeeiro. *Colheitas economicas máximas*. Sao Paulo, Brasil, Ceres. 210 p.
- MARTINI J.A. 1968. Algunas notas sobre el problema del encalado en los suelos del trópico. *Turrialba* 18(3): 249-256.
- MATHERS S.J.; HARRISON D.; ALVARADO F. 1991. An assessment of the potential of the Barra Honda limestone, Guanacaste Province, Costa Rica. *Proyecto Anglo-*

- costarricense de minerales industriales. RECOPE. San José, Costa Rica. BGS Technical Report. WC/90/37. 29 p.
- MCCOLL J.C. 1970. Properties of some natural waters in a tropical wet forest of Costa Rica. *Bioscience* 20: 1096-1100.
- MENDEZ J.; KAMPRATH E.J. 1978. Liming of latosol and the effect on phosphorus response. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 42: 86-88.
- MOLINA E. 1998. Encalado para la corrección de la acidez del suelo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 45 p.
- , 1992. El magnesio en la nutrición del café. *Revista Agroindustria* 22:12-13.
- MONTAGNINI F.; SANCHO F.; GONZÁLEZ E.; MOULAERT A. 1993. Mixed-tree plantations with indigenous trees in the Atlantic lowlands of Costa Rica. In: J. A. Parrotta y M. Kanashiro (eds.). *Management and rehabilitation of degraded lands and secondary forests in Amazonia. Proceedings of an International Symposium.* Santarem, Pará, Brasil. IITF-USDA, Forest Service. Puerto Rico, pp. 161-169.
- MORA S. 1995. The impact of natural hazards on socio-economic development in Costa Rica. *Environmental and Engineering Geoscience* 1(3): 291-298.
- NAVAS J.; SILVA F. 1971. Acidez y encalamiento en el trópico. *Suelos ecuatoriales* 13(1): 1-306.
- NICHOLAIDES J.J. 1993. Liming materials: origin, composition, use and effects. In *CRC Handbook of Nutritional Supplements*, vol. II. M. Recheigl (ed.), Florida. CRC Press, pp. 337-366.
- NICHOLAIDES J.J.; PIHA M.I. 1986. A new methodology to select cultivars tolerant to aluminium and with high yield potential. *Proceedings of a Workshop on Evaluating Sorghum for Tolerance to Aluminium Toxic Tropical Soils in Latin America*, held at CIAT, Cali, Colombia 28 May-2 Jun. 1984, pp. 103-116.
- NYE P.H.; GREENLAND D.J. 1960. The soils under shifting cultivation. *Commonwealth Agricultural Bureaux. Tech. Comm. No. 51.* England. 156.
- OBSERVATORIO DEL DESARROLLO, UNIVERSIDAD DE COSTA RICA. 2002. *Naturaleza, gente y bienestar: Mesoamérica en cifras.* San José, Costa Rica. 39 p.
- ORTEGA L.; HENRÍQUEZ C.; MOLINA E.; ANGULO L. 1996. Manejo de la fertilización con Ca, Mg y K para la producción de palmito de pejibaye. En: *X Congreso Agronómico Nacional. Colegio de Ingenieros Agrónomos.* San José, Costa Rica. vol. III, p. 164.
- PAVÁN M; BINGHAM F.T. 1982. Toxicity of aluminium seedling to coffee grown in nutrient solution. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 46: 993-997.
- PEARSON R.G.; LINZON S.N. 1985. *Effects of air pollution on agricultural crops.* Ontario, Canadá. Ministry of Agriculture and Food. Order No 85-002.
- RAIJ VAN B. 1991. *Fertilidade do solo e adubação.* Sao Paulo, Piracicaba, Brasil. POTAFOS. 343 p.
- RED SISMOLÓGICA NACIONAL. 1995. Resumen de actividad sísmica y volcánica: período de Enero-Diciembre de 1994. *Rev. Geol. Amér. Central* 18: 97-100.
- REEVE, N.G., SUMNER, M.E. 1972. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface applied amendments. *Agrochimica* 4:1-5.

- RICHTER D.D.; RALSTON C.W.; HARMS W.R. 1982. Prescribed fire: effects on water quality and forest nutrient cycling. *Science* 215:661-663.
- ROBSON A.D. (ed.) 1989. Soil acidity and plant growth. Academia Press. 306 p.
- RODRÍGUEZ A.; UGARTE J.; ÁLVAREZ M.; KLOCKOW D. 1995. Influencia de la actividad del Volcán Poás sobre la química de las aguas de lluvia en la Región de Tarcés, Costa Rica. *Ing. Cienc. Quím.* 15(2): 42-47.
- ROJAS A.; MOLINA E.; MORALES F. 1996. Evaluación agronómica de tres fuentes de cal en el cultivo de naranja. En: X Congreso Agronómico Nacional. Colegio de Ingenieros Agrónomos. San José, Costa Rica. vol. III, p. 143.
- SALAS R.; MOLINA E.; BOULDIN D. 1996. Lime response on tanager in an Ultisol of Costa Rica. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 27(9/10):2477-2484.
- SÁNCHEZ P.A. 1985. Management of acid soils in the humid tropics of Latin America. In: Sánchez P.A., Stoner, E.R. y Pushrajah, E. (eds.) Management of acid tropical soils for sustainable agriculture. Proceedings of an IBSRAM inaugural workshop held at Yurimaguas, Perú and Brasília, Brasil 24 abril-3 mayo 1985, pp. 63-107.
- SÁNCHEZ P.A.; SALINAS J.G. 1983. Suelos ácidos, estrategia para su manejo con bajos insumos en América tropical. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Colombia. 93 p.
- SÁNCHEZ P.A.; PALM C.A.; DAVEY C.B.; SZOTT L.T.; RUSSELL E.C. 1985. Tree crops as soil improvers in the humid tropics? In: M.G.R. Cannell y J.E. Jackson (eds.). Attributes of trees as crop plants. Institute of Terrestrial Ecology, Natural Environmental Research Council, Abbots Ripton, Huntingdon, England, pp. 327-352.
- SARMIENTO G. 1984. The ecology of neotropical savannas. Harvard University Press. USA. 241 p.
- SMYTH T.J.; OSMOND D.L. 2003. Improvements made to NuMaSS since the workshop at the Philippine Rice Research Institute in September 1999. In. Field testing of the integrated nutrient management support system (NuMaSS) in Southeast Asia. M.S. Casimero, S.M. Pablo, R.S. Yost y M.L. Aragon (eds.). PhilRice, Maligaya, Science of Muñoz. Nueva Ecija, Philippines, pp 137-150.
- SOUZA D.M.G.; LOBATO E.; RITCHEY K.D.; REIN T.A. 1992. Resposta de cultura anais e leucena a gesso no Cerrado. IBRAFOST. II Seminario sobre o uso do gesso na agricultura. Sao Paulo, Brasil, pp. 277-306.
- SPOSITO G. 1989. The chemistry of soils. Oxford University Press. N.Y. 273 p.
- STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE (SEI). 1996. Validation of maps to acidic deposition. San José, Costa Rica. Background papers for the workshop held at the Hotel Burgamvillea, 7-11. October 1996.
- SUMNER M.E. 1993. Gypsum and acid soils: the world scene. *Advances in Agronomy* 51:1-32.
- SZOTT L.T.; FERNÁNDEZ E.C.M.; SÁNCHEZ P.A. 1991. Soil-plant interactions in agroforestry systems. *For. Ecol. Mgmt* 45: 127-152. Szott, L.T., Palm, C.A. y Buresh, R.J. 1991. Ecosystem fertility and fallow function in the humid and subhumid tropics. *Agroforestry Systems* 47: 163-196.

- TISDALE S.; NELSON W.; BEATON J.; HAVLIN J. 1993. Soil fertility and Fertilizers. 5ed. Columbus USA, Mac Millan Publishing.
- ULRICH B.; SUMNER M.E. (eds.). 1990. Soil acidity. Springer-Verlag. 224 p.
- VANMECHELEN L.; GROENEMANS R.; VAN RANST E. 1997. Forest soil condition in Europe: results of a large scale soil survey. Bruselas, Génova, United Nations, Economic Commission for Europe. 261 p.
- VAN RAIJ B. 1998. Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo. Associação nacional para difusão de adobos e correctivos agrícolas. Sao Paulo, Brasil 87 p.
- VITTI G.C. et al. 1996. Tecnicas de utilização de calcario e gesso na cultura dos citros. In: Anais IV Seminario Internacional de citros: nutrição e adubação, Sao Paulo, Brasil. Fundação Cargill, pp. 131-160.
- WRIGHT M.J. (ed.). 1976. Plant adaptation to mineral stress in problem soils. Ithaca, New York. Proceedings of a workshop held at the National Agricultural Library. 420 p.
- YOST R. ET AL. 1991. Uso de sistemas de apoyo-decisión para hacer recomendaciones de cal y fósforo. En: Manejo de suelos tropicales en Latinoamérica. T.J. Smyth et ál. (eds.). San José, Costa Rica, North Carolina State University. pp. 177-185.
- ZAPATA R.D. 2003. La química de la acidez del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 170 p.
- ZELAYA V.N.; GUILLÉN I. 2002. Efectos de las quemas prescritas en las propiedades físico-químicas del suelo, a diferentes intensidades calóricas en bosque de coníferas. Tatascán 14(1): 73-81.

1.5. Programación del fertirriego y su control en la Región Central de Chile

1. Introducción

El conocimiento es la más poderosa herramienta para hacer de la agricultura una actividad competitiva y altamente rentable. La innovación tecnológica presenta un crecimiento exponencial en el campo de la agricultura. Es por esto que un productor o empresa líder debe, necesariamente, conceptualizar la innovación como algo inherente a su propio proceso de cambio y mejora.

La tendencia de la agricultura actual es aproximarnos lo más posible al potencial máximo del cultivo en cuanto a rendimiento y calidad, manteniendo en todo momento un equilibrio con el medio ambiente que evite la degradación de nuestros recursos naturales. En los últimos años nos encontramos con dos grandes vías de avance tecnológico: i) La gran expansión de la electrónica e informática aplicadas a la agricultura (equipos automáticos de fertirrigación, controladores climáticos, fitomonitores, sondas y sensores de múltiples parámetros de control), y ii) Creación o adaptación de nuevos genotipos de cultivos y técnicas que permiten un mejor aprovechamiento de los recursos y mejoramiento de la producción y calidad de las cosechas.

La disponibilidad actual de componentes electrónicos e informáticos facilita la instalación de automatismo y la implementación de nuevas técnicas de cultivo. La presencia de empresarios innovadores y asesores agrícolas capacitados y convencidos de sus ventajas, provoca que el uso de estos sistemas sea cada vez más generalizado, sobre todo en frutales, hortícolas y ornamentales.

El término fertirrigación engloba la nutrición hídrica y mineral de los cultivos y sobre su concepto se concentra buena parte de los avances técnicos que sustentan el desarrollo de la agricultura intensiva. Fertirrigación significa literalmente, aplicación simultánea del agua de riego y los fertilizantes. Esta técnica abre nuevas posibilidades para controlar el suministro hídrico y nutricional de los cultivos de tal forma que permite optimizar la distribución y concentración de los iones y agua en el suelo e impactar positivamente en el rendimiento y calidad de los productos.

En un sistema de fertirrigación se pueden controlar fácilmente la parcialización, la dosis, la concentración y la relación de los fertilizantes aplicados. Existen muchas evidencias experimentales acerca de las ventajas de la fertirrigación. Dentro de las variables más importantes de conocer y manejar adecuadamente en el fertirriego, es disponer de un buen diagnóstico del nivel nutricional del suelo, del cultivo y de las aguas de riego. Posteriormente,

identificar las etapas fenológicas y productividad esperada y la respectiva demanda de nutrientes, para luego definir un programa nutricional que implica la elección de los fertilizantes y cantidad más adecuada para cada etapa fenológica. Es fundamental, después de diseñar adecuadamente un programa de fertirriego para las condiciones particulares del productor, disponer de un sistema de monitoreo que permita tomar decisiones oportunas durante el ciclo de desarrollo y, así, optimizar la nutrición y evitar pérdidas de elementos químicos en profundidad. La fertirrigación permite optimizar el rendimiento, la calidad de los productos y el incremento de biomasa vegetal por unidad de agua usada.

2.- Situación mundial

Las áreas agrícolas bajo riego presurizado se están expandiendo a través del mundo. En China, India, Japón y Australia existe una expansión considerable de estos sistemas de riego (Bucks, 1995). En algunos países, tal como Israel, donde la disponibilidad de agua es limitante para los cultivos, todo el riego es presurizado (Hagin y Lowengart-Aycicegi, 1999) y más del 80% de la superficie irrigada usa el método fertirriego (Imas, 1999). Estados Unidos es el país con mayor superficie fertirrigada y en la actualidad debe tener una superficie cercana a 1 000 000 has, España es el segundo país con mayor implantación de esta técnica, y cuenta en la actualidad con una extensión superior a las 450 000 has de cultivo bajo fertirriego. Países como Australia, Sudáfrica, Israel, Italia, Egipto, México e India, también superan las 100 000 has con riego localizado. Actualmente, se estima una extensión aproximada de 3 000 000 has bajo fertirrigación y en 1991, según Bar-Yosef (1999), la distribución mundial de la superficie bajo riego presurizado por cultivo era: frutales y viñas, 72%; Hortalizas, 16%; otros cultivos, 14%.

En Chile, en la actualidad existen más de 100 000 has de riego tecnificado en las cuales es posible fertirrigar. El riego localizado (goteo, microjet y microaspersión) alcanza 75 000 has, y el riego tecnificado mayor (pivote central, aspersión tradicional, carrete) ocupa más de 30 000 has. Su expansión en la zona central del país, alcanza el 15% anual.

La fertirrigación al aire libre o en invernadero ha propiciado un importante mejoramiento de los cultivos. Las principales ventajas de la fertirrigación se pueden resumir en lo siguiente: a) Posibilidad de empleo de aguas y suelos de baja calidad: aguas y suelos salinos, suelos pedregosos, excesivamente permeables, etc.; b) Posibilidad de aplicación de otros productos utilizando la infraestructura, como correctores, desinfectantes del suelo, herbicidas, nematicidas, funguicidas, reguladores del crecimiento, etc.; c) Aplicación precisa

de nutrientes de acuerdo a la demanda del cultivo por lo que se evita la concentración excesiva de fertilizante en el suelo y lixiviación fuera de la zona de humedecimiento; d) Aplicación de agua y fertilizantes solamente a un volumen determinado de suelo, donde las raíces están más activas, incrementándose la eficiencia del uso del fertilizante y reduciendo su impacto ambiental; e) Reducción en el tráfico de maquinaria agrícola en el campo; f) Fabricación «a la carta» de fertilizantes concentrados adaptados a un cultivo, agua de riego y condiciones climáticas durante todos y cada uno de los días del ciclo del cultivo y g) Fácil automatización de la fertilización.

Entre los posibles inconvenientes del sistema podemos citar al costo inicial de la infraestructura, posibilidad de obturación de goteros y necesidad de manejo del sistema por personal especializado. Un mal manejo de la fertirrigación puede provocar daños como: acidificación, lavado de nutrientes y/o salinización del suelo.

Las grandes ventajas que aporta el sistema de fertirrigación compensan sobradamente los inconvenientes citados que, por otra parte, pueden tener una solución relativamente simple. El costo inicial se puede amortizar en poco tiempo y la obturación de goteros se puede evitar si se sigue una tecnología de fertirrigación adecuada. El problema de formación del personal se puede resolver mediante cursos de formación y obras de divulgación escritas por los especialistas que puedan informar de sus propias experiencias.



FOTOGRAFÍA 1. El fertirriego permite plantaciones productivas y rentables de aguacates en suelos marginales de la V Región de Chile



FOTOGRAFÍA 2. Uva de mesa de exportación plantada en la IV Región de Chile y manejada con fertirriego

3. Programación de la fertirrigación

Para realizar la fertilización de cultivos a través del riego se deben considerar los siguientes pasos: Definición de la fenología del cultivo, demanda nutricional de la planta, aporte de nutrientes del suelo y agua y eficiencia de uso de los fertilizantes.

3.1. Definición de la fenología del cultivo

Se debe ordenar cada una de las etapas fenológicas de la planta y se les debe asignar la duración que tienen en la zona, para saber en qué períodos corresponderá aplicar nutrientes junto con el agua. La precisión en la fertilización se basa, en gran medida, en el conocimiento de cada una de las etapas que vive la planta durante su ciclo. Esta información es clave para planificar la fertirrigación. Por ejemplo, en frutales de hoja caduca, se manifiestan las siguientes etapas fenológicas.

Latencia: El frutal se encuentra en receso metabólico el cual termina después de una cantidad de horas de frío. No existe consumo ni transporte interno de agua ni nutrientes. Los nutrientes y carbohidratos están formando parte de compuestos químicos de reserva.

Activación: Termina la latencia. Se genera una transformación interna de los almidones a azúcares. Se inicia la movilización de nutrientes desde las raíces y madera a los puntos de brotación. La planta se abastece de sus propias reservas. Se inicia la etapa de yema hinchada.

Brotación: Aparecen las primeras hojas. La planta empieza a acelerar lentamente su velocidad de absorción de agua y nutrientes del medio externo.

Desarrollo: Se produce una gran actividad celular orientada a la formación de órganos especializados en distintas funciones de la planta (hojas, tallos, raíces, flores y frutos). Todavía el consumo de agua y nutrientes es bajo. Comienza la aparición de raicillas y corresponde a unos 25-35 días post-brotación.

Crecimiento: Viene un gran aumento en el tamaño de los órganos y se produce un aumento importante en la demanda diaria de agua y nutrientes, especialmente N. Existe una alta dependencia del suministro externo de nutrientes.

Floración: Los nutrientes, azúcares y agua se movilizan de preferencia rumbo a los órganos reproductivos. La absorción por parte de las raíces llega a ser máxima. En esta etapa el papel del K es fundamental, debido a su papel en el transporte de carbohidratos, que conforman el 90% del peso seco del fruto.

Cuaja: Corresponde a la caída de pétalos y es una etapa breve. Marca el inicio de la etapa de mayor importancia como es el llenado de fruto.

Llenado de fruta: Es el proceso de mayor actividad en la translocación interna de nutrientes y azúcares y absorción externa de agua y nutrientes. En esta etapa se llega a la demanda máxima de nutrientes, especialmente K.

Pinta: En esta etapa la fruta ha llegado a su calibre máximo y comienza a cambiar de color. Es necesario disminuir el aporte de N para evitar inducción de nuevos brotes y desórdenes fisiológicos en el flujo de carbohidratos que van a la fruta. La tasa de absorción es alta, pero menor que en llenado de fruta. En esta etapa el fruto constituye el principal órgano de demanda y los fotosintatos se movilizan hacia este órgano.

Cosecha: En esta etapa comienza la senescencia de los tejidos y normalmente no se aplican fertilizantes.

Postcosecha: La planta presenta una nueva actividad radical y se genera un reflujo de nutrientes desde las hojas hacia la madera y raíces. Este momento es clave como oportunidad para aplicar nutrientes y aumentar las reservas para el inicio del crecimiento de la próxima temporada.

<i>Fase fenológica</i>	<i>Fecha</i>
Yema hinchada	25 agosto
Brotación	5 septiembre
Floración	15 octubre
Inicio cuaja	1° noviembre
Término división celular	1° diciembre
Cosecha	12 febrero
Postcosecha	5 marzo

TABLA 1. Fecha correspondiente a cada fase fenológica para manzanos de la variedad gala en la zona centro-sur de Chile

Fase fenológica	Variedad O'Neal		Variedad Elliot	
	Duración (días)	Fechas	Duración (días)	Fechas
Floración	45	15 ago-1 oct	15	1 oct – 15 oct
Crecimiento Fruto	45	1 oct-15 nov	60	15 oct - 15 dic
Cosecha	30	15 nov - 15 dic	45	15 dic - 30 ene
Postcosecha	120	15 dic – 15 abr	75	30 ene - 15 abr

TABLA 2. Duración aproximada de estados fenológicos en arándanos para la zona central de Chile

3.2. Determinación de la demanda:

Frutales: Corresponde a los requerimientos de nutrientes del crecimiento anual de las plantas frutales en plena producción, con un crecimiento y nutrición equilibrada dentro de un determinado ecosistema frutal. El crecimiento anual puede variar en distintos ecosistemas de acuerdo a diferentes factores del clima o del suelo. También, puede ser distinto de acuerdo al nivel tecnológico o manejo de una determinada área frutícola o de un huerto en particular. El crecimiento anual alcanzable en distintos ecosistemas frutales, determina a su vez una demanda diferente de nutrientes para satisfacer la formación de fotosintatos, estructuras celulares y reacciones metabólicas. Los componentes del crecimiento anual considerados en la demanda son: frutos, hojas, brotes, raíces e incremento de estructuras permanentes. Normalmente, los componentes que generan una mayor demanda son los frutos y las hojas. Entre el 60 y el 70% de toda la demanda del crecimiento anual está dado por ambos componentes. A continuación, siguen los brotes, posteriormente las raíces y las estructuras permanentes. Por ejemplo, Klein y otros (1989) en manzanos tipo estándar presentan una distribución del N de 27, 32, 20, 16 y 4 para frutos, hojas, brotes, estructuras permanentes y raíces.

Para el cálculo de la dosis de fertilización se debe considerar el contenido de nutrientes en los tejidos que serán exportados del huerto (tabla 3). Esto es, la exportación de nutrientes por los frutos y en el material de poda no incorporado en el suelo. No se deben considerar las hojas, flores, raíces, los que quedan finalmente en el suelo, los cuales se reciclan y finalmente entran en equilibrio con el suelo.

Especie	Exportación de N (kg N/ t fruto)	Exportación de P (kg P ₂ O ₅ /t fruto)	Exportación de K (kg K ₂ O/t fruto)
Uva vinífera	3.6	1.70	5.6
Uva de mesa	4.0	1.70	5.6
Kivi	5.0	1.75	2.9
Manzano Granny Smith	2.1	0.50	2.2
Manzano patrón enano	1.5	0.50	1,9
Peral	2.2	0.65	2.0
Naranja	2.7	0.60	4.2
Cerezo	6.4	1.70	5.0
Durazno	5.1	1,40	5.2
Damasco	4.6	4.50	4.3
Olivo	6.0	2.8	6.0
Nogal	4.5	3.0	6.5
Ciruelo	3.0	1.0	4.0
Palto	6.2	2.90	18,2
Arándano	4.7	0.8	5.2
Frambuesa	16.9	3.6	10.4

TABLA 3. Exportación de N, P y K calculada en la fruta y en el material de poda retirado del huerto en distintas especies frutales

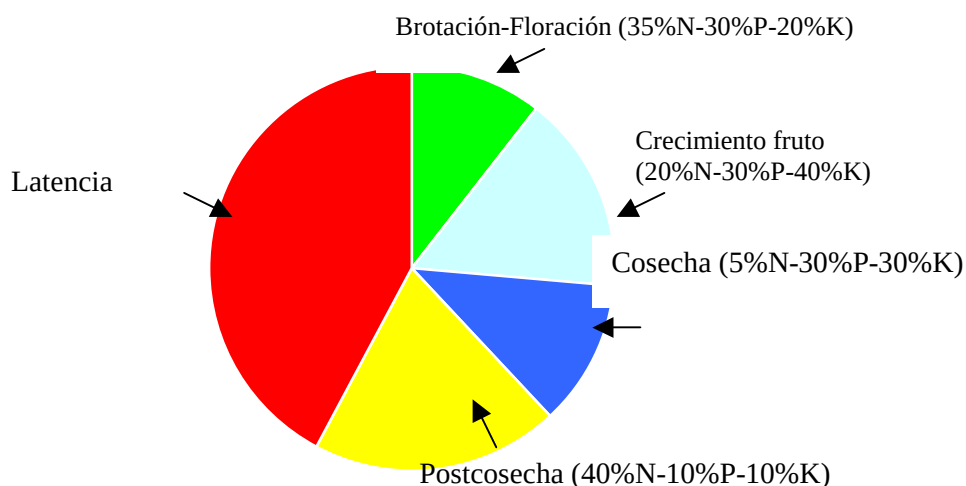


FIGURA 1. Distribución porcentual aproximada de requerimientos N-P-K, según fase fenológica de frutales de hoja caduca

Cultivos: La tasa de extracción de nutrientes para alcanzar el óptimo rendimiento y calidad es una característica específica del cultivo y depende de las condiciones climáticas. Es independiente de las características del suelo y técnica de riego. En la tabla 4 se presenta la demanda total de N, P y K para algunas

hortalizas desarrolladas bajo condiciones específicas. La extrapolación de los datos de absorción de N, P y K a otras condiciones climáticas diferentes a las indicadas (temperatura y radiación) debe hacerse en forma cuidadosa y solamente como una primera aproximación.

Flores: En relación a la absorción de nutrientes por la rosa, Eymar (1998) cita que la mayor tasa de absorción de nutrientes por las raíces de rosas ocurre durante el desarrollo del tallo floral y hojas, cuando los botones florales ya están formados. Al cosechar los tallos florales, disminuye la cantidad de tallos, hojas y flores, disminuyendo también la absorción hasta el desarrollo de tallos y hojas siguientes. Por consiguiente, el ritmo de absorción es discontinuo, dependiendo de las podas realizadas y corte de flores.

Cadahía (1998) trabajó con rosas testando varios cultivares, observó que la absorción de P aumentó cuando hubo una reducción del pH de la solución debido al aumento de concentración de N-NH_4^+ . La mayor absorción de N ocurrió después de la poda, durante el desarrollo de tallos de la primera floración. Después de esta fase, la absorción de N disminuye y se mantiene constante durante las floraciones posteriores. Para el K, la absorción varió, produciéndose las máximas tasas de absorción durante la formación de los botones florales en cada ciclo de producción de rosas.

En consecuencia, se puede concluir que el nitrógeno, fósforo y potasio siguen una tendencia creciente de demanda por la planta, necesitando de mayores cantidades de N y P, en las primeras fases y K en las fases siguientes de crecimiento de la planta, o crecimiento de los tallos florales.

Especie	Absorción (kg/ha)			Variedad	Plantas/ha	Suelo	Rendimiento comercial (ton/ha)	Referencia
	N	P	K					
Tomate Industrial	393	59	520	VF M82-1-2	50.000	Arcilloso	160	Dafne (1984)
Tomate invernadero	450	65	710	F-144 Daniela	23.000	Arenoso	195	Bar-Yosef et ál. (1992)
Tomate campo	250	24	370	675	12.000	Arenoso	127	Bar-Yosef et ál. (1982)
Pepino	205	31	370		100.000	Arenoso	75	Bar-Yosef et ál. (1980)
Papas	170	26	190	Desiree		Franco	57	
Lechuga	110	22	250	Iceberg	100.000	Arenoso	45	Bar-Yosef y Sagiv (1982)
Apio	150	36	225	Florida	90.000	Franco	65	Feigin et ál. (1976)
Repollo	110	29	220	Kasomi	80.000	Franco	82	Sagiv et ál. (1992)
Brócoli	200	26	165	Woltam	33.000	Franco	13	Feigin y Sagiv (1971)
Maíz dulce	240	40	320	Jubilee	75.000	Franco	28	Sagiv et ál. (1983)
Zanahoria	280	73	600	Buror	400.000	Franco	85	Sagiv et ál. (1995)
Sandía	150	25	385	Galia	25.000	Arenoso	56	Sagiv et ál. (1980)

TABLA 4. Demanda de N, P y K de algunos cultivos y hortalizas

3.3. Suministro del suelo y aporte de agua de riego

El suministro del suelo y agua se cuantifica mediante análisis químico de suelo y agua, respectivamente.

El N se debe aportar para satisfacer las demandas del cultivo de la temporada. Cualquier cantidad de N que no sea utilizada por el cultivo dentro de la temporada de crecimiento, lo más probable es que constituya una pérdida del sistema, con consecuencias económicas y medioambientales negativas. El N debe satisfacer la demanda de la temporada.

A diferencia del N, para el resto de los nutrientes (P, K, Ca, Mg, etc.) el objetivo de la fertilización debe ser corregir los niveles deficientes en el suelo, de forma de entrar a la brevedad a una fertilización de mantenimiento. Por lo tanto, con estos nutrientes se deben distinguir dos sistemas de fertilización: de corrección y de mantenimiento.

La estrategia de la fertilización de corrección es llevar el suelo a un nivel de suministro óptimo. Los niveles de disponibilidad suficientes en el suelo aparecen en la tabla 5.

<i>Nutriente</i>	<i>Contenido suficiente en el suelo (0-30 cm) (mg kg⁻¹)</i>
P Olsen	30
K intercambio	140
Mg intercambio	60
Ca intercambio	800
Azufre disponible	20
Hierro	2,5
Manganeso	1,0
Cobre	0,5
Zinc	0,5-1,0 ⁽¹⁾
Boro	0,5-1,0 ⁽¹⁾

TABLA 5. Niveles de reserva suficientes de nutrientes en el suelo. ⁽¹⁾ Para cultivos sensibles.

Una vez alcanzados estos niveles en el suelo, deben mantenerse con una fertilización de mantenimiento, que corresponde a la exportación de P, K, Mg, Ca, S y microelementos de los cultivos. El mantenimiento de los niveles de disponibilidad debe ser controlado por lo menos cada dos años, mediante análisis de suelo muestreado en la zona del bulbo húmedo. Paralelamente, deben realizarse los análisis foliares tradicionales para controlar la nutrición.

La fertilización de corrección debe efectuarse, ojalá, en el momento de la plantación del huerto o viñedo, con la excepción de N. Cuando el huerto se encuentra en producción y no se han corregido los niveles nutricionales, se debe adoptar una estrategia de corrección en el tiempo, con el propósito de llegar cuanto antes a una adecuada disponibilidad.

En general, en fertirriego el aporte del suelo se considera menor como consecuencia de que el volumen explorado por las raíces está circunscrito normalmente al bulbo de humedecimiento (figura 2). Es importante destacar que la forma y dimensiones del patrón de humedecimiento es importante para determinar el volumen de suelo ocupado por las raíces y, a su vez, conocer su influencia sobre el suministro de nutrientes para el cultivo. Este patrón de humedecimiento depende básicamente de:

- La textura y estructura del suelo.
- El perfil físico del suelo y la estratificación.
- Topografía del terreno.
- Tipo de emisor (forma de distribuir el agua y caudal unitario).
- Volumen de agua aplicada durante un riego.
- Estado de humedad del suelo.

La acción conjunta de estos factores, unos con mayor incidencia que otros según el caso, influirá en el desplazamiento del flujo de agua tanto en profundidad como en el plano horizontal. Una textura fina (franco arcillosa, arcillosa) generará un desplazamiento del flujo de agua más horizontal que vertical. El patrón de humedecimiento generado tendrá, por tanto, un mayor desarrollo superficial, en comparación con la profundidad.

Todo lo contrario se producirá en una textura gruesa (franco arenosa, arenosa) donde el volumen húmedo adoptará una forma más vertical en detrimento de la superficie húmeda. En consecuencia, según sea el perfil de suelo, el volumen húmedo que se genere puede adoptar formas variadas e irregulares.



FIGURA 2. Forma del bulbo húmedo con diferentes caudales y distanciamiento de emisores (fotografía NFREC, U. de Florida)

El caudal de un emisor es directamente proporcional al desplazamiento horizontal del flujo e inversamente proporcional a la profundidad alcanzada. La razón de este comportamiento está en el estado de saturación que se produce en el suelo, con reducción de la velocidad de infiltración vertical del agua, la cual se ve obligada a desplazarse horizontalmente. Cuanto más caudal proporcione un emisor, mayor es la superficie húmeda y menor la profundidad en que llega el frente de humedad. Complementariamente, habría también una mayor profundización del frente húmedo cuando la textura sea más gruesa. A medida que aumenta el tiempo de riego y por tanto la cantidad de agua aplicada, aumenta también la superficie y la profundidad mojada del volumen húmedo.

En la tabla 6 se presenta una estimación del porcentaje de área humedecida en riego por goteo, de acuerdo a la descarga del emisor, textura del suelo y distancia entre goteros. En todo caso, se debe considerar que el mejor método para evaluar la forma y dimensiones de los patrones de humedecimiento es sobre el mismo terreno y los parámetros que deben evaluarse son radio húmedo (r) a una profundidad de unos 30 cm, donde previsiblemente se concentra la mayor densidad de raíces y profundidad del frente de humedad (p).

Distancia entre lateral (m)	Descarga del gotero (lt/h)								
	2			4			8		
	Textura del suelo								
	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina
	Distancia entre goteros sobre lateral (m)								
	0.3	0.7	1.0	0.6	1.0	1.3	1.0	1.3	1.7
1.0	40	80	100	80	100	100	100	100	100
2.0	20	40	60	40	60	80	60	80	100
3.0	13	26	40	26	40	53	40	53	67
4.0	10	20	30	20	30	40	30	40	50
5.0	8	16	24	16	24	32	24	32	40
6.0	7	14	20	14	20	27	20	27	34

TABLA 6. Porcentaje de área humedecida del suelo en riego por goteo de acuerdo a la descarga del emisor, textura de suelo y distancia entre goteros

3.4. Eficiencia de uso del nutriente

En fertirriego existe un aumento importante en la eficiencia de uso de los fertilizantes. Los productos son inyectados directamente a la zona radical y, por consiguiente, quedan inmediatamente disponibles. A su vez, se presenta una mejor sincronización entre la demanda del cultivo con el aporte de fertilizantes, lo que permite una reducción importante de las pérdidas. Papadopoulos (2001) señala las siguientes eficiencias de uso en fertirriego para N, P y K, según el sistema de riego usado.

Sistema de riego	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
Surco	40-60	10-20	60-75
Aspersión, pivote	60-70	15-25	70-80
Goteo, microaspersión	75-85	25-35	80-90

TABLA 7. Porcentaje de eficiencia de uso de N, P y K de acuerdo al sistema de riego empleado. Papadopoulos (2001)

3.5. La relación NH_4/NO_3 en la solución nutritiva

La asimilación de nitratos (NO_3) por parte de las plantas es un proceso con alto costo energético, puesto que esta fracción se debe reducir finalmente hasta aminoácidos. Los carbohidratos producidos en la fotosíntesis son el origen de la energía metabólica. En consecuencia, si la planta absorbe amonio (NH_4) es de esperar un ahorro en moléculas carbonadas las cuales estarían disponibles para la biosíntesis de macromoléculas lo que se traduciría en mayor producción de materia seca. Sin embargo, ocurre lo contrario. Se ha demostrado que la absorción exclusiva de NH_4 causa una reducción entre 15 a 40% en el rendimiento. Entonces, el suministro más económico de NH_4 , en términos energéticos, puede bajar los rendimientos, tanto como un déficit de nitrógeno.

El transporte de NH_4 a través de la membrana celular es un proceso pasivo y no se acumula en las células, puesto que la enzima glutamina sintetasa asegura su eliminación como especie iónica. La transformación de amonio a amida produce la liberación de un protón (H^+) que es eliminado al medio externo, produciendo acidez en la rizósfera.

Por otro lado, la absorción de NO_3 es acompañada por un consumo de H^+ y producción de un ion OH^- . Cuando la reducción de NO_3 ocurre en las raíces este OH^- puede pasar al suelo. En las hojas el OH^- puede inducir a una alta alcalinización de la savia, lo cual es evitado por la síntesis de ácidos orgánicos, particularmente ácido málico y carboxílico. Una fracción de estos ácidos orgánicos pueden, a su vez, ser excretados por la rizófera, adquiriendo un rol fundamental en la nutrición como agente quelante de microelementos y solubilizante de fracciones de nutrientes adsorbidos en el suelo, principalmente fosfatos.

La disponibilidad óptima de todos los nutrientes es en el rango de pH 6-6.5. El pH de la rizósfera determina la disponibilidad de fósforo ya que afecta los procesos de precipitación/solubilización y de adsorción/desorción de los fosfatos. El pH también influye sobre la disponibilidad de micronutrientes (B, Cu, Fe, Zn, Mn) y la toxicidad de algunos de ellos (Al, Mn). Como se señaló anteriormente, el principal factor que afecta el pH en la rizósfera es la relación NH_4/NO_3 en el agua de riego, especialmente en hidroponía, sustratos inertes y en medios con bajo poder buffer, como suelos muy arenosos (Feigin et ál., 1980).

La forma de nitrógeno (NH_4^+ y NO_3^-) absorbida por la planta también determina el balance cationes-aniones en la planta (Barber, 1984). La nutrición amoniacal produce un patrón de absorción catiónica basado principalmente en NH_4^+ , disminuyendo así la absorción de otros cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ (Marschner, 1995). Asimismo induce la excreción radicular de H^+ al medio para mantener la electroneutralidad en la planta (Imas et ál., 1997). La disminución de pH en la rizósfera puede causar toxicidad de Al y Mn, y tiene en general un efecto adverso sobre el crecimiento radicular y sobre el desarrollo vegetal (Ganmore-Neumann y Kafkafi, 1980; 1983).

Cuando el nitrógeno es proporcionado bajo la forma de nitratos, el anión NO_3^- es absorbido, y la planta absorbe más aniones que cationes. Las plantas bajo nutrición con NO_3^- presentan un mejor crecimiento y mayores rendimientos (Ganmore-Neumann y Kafkafi, 1980; 1983; Imas et al, 1997). Sin embargo, una nutrición con 100% del N como nitratos puede aumentar el pH de la rizósfera a valores de más de 8 (Marschner, 1995). A esos valores de pH, el fósforo y microelementos precipitan, disminuyendo su disponibilidad.

Por lo tanto, en la práctica se recomienda aplicar el N como fuentes combinadas, manteniendo una relación ligeramente superior al 50% de nitratos, para mantener el pH de la rizósfera en valores óptimos (Avidan, 1998; Zaidan y Avidan, 1997). En la figura 3, se presentan resultados de Vidal et ál. (2005) en frambuesa, donde se aprecia la variación del pH del suelo después de aplicarse diversas fuentes de N por 5 años. El pH de todos los tratamientos disminuyó, siendo esta reducción muy marcada cuando se empleó solamente fuentes amoniacales, en tanto, el nitrato tiende a mantener el pH a los valores originales. La fertilización mixta (50% amonio y 50% nitrato) presentó un comportamiento intermedio.

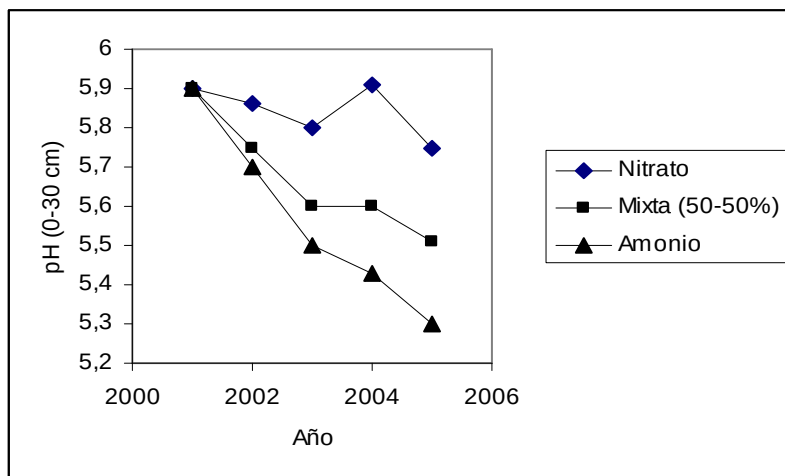


FIGURA 3. Variación del pH del suelo en frambuesa sometida a diferentes fuentes de nitrógeno por fertirriego. (Vidal et ál., 2005)

3.6. Respuesta de los cultivos a la fertirrigación

Se han publicado numerosos estudios durante las últimas tres décadas sobre respuesta de los cultivos a la fertirrigación comparado con fertilización en cobertera y/o en banda. Bar-Yosef (1999) presenta una revisión muy completa sobre esta materia. La mayoría de los cultivos bajo riego han sido investigados en diferentes localidades. En Israel y Florida se encontró que árboles de naranjos y pomelos presentaban mayor rendimiento de fruta y mayor eficiencia de uso de N bajo fertirrigación comparado con aplicación de N parcializado en cobertera (Dasberg et ál., 1988; Boman, 1995, 1996). Se ha reportado para cultivos anuales una menor lixiviación de nitratos en fertirrigación, sin que se afecte el rendimiento y calidad (p.ej., en tomates, Miller et ál., 1976; para alfalfa, Feigin et ál., 1982). Varios estudios han mostrados que la respuesta a N fue mayor bajo fertirrigación comparado con la aplicación en cobertera (p.ej., en manzanos, Assaf et ál., 1983; Klein et ál., 1989; en tomates, Bar-Yosef, 1977; Clough et ál., 1990; en lechuga, Bar-Yosef y Sagiv, 1982).

Los trabajos referidos a fertirrigación con P y K muestran un incremento considerable de la respuesta del cultivo a estos elementos, comparado con aplicaciones en cobertera o banda. Rauschkolb et ál. (1979) informa que la aplicación de P en riego por goteo en tomates resultó en mayores contenidos foliares de P comparado con aplicación de la misma dosis de P en banda. Bar-Yosef (1989) encontró que la aplicación de P por fertirrigación en maíz dulce

resultó en mayor rendimiento comparado con la aplicación de todo el P a la siembra. Incrementos de la respuesta a K con fertirrigación han sido informados para citrus (Lavon et ál., 1995), toronja (Boman, 1996), viña (Christensen et ál., 1991) y caña de azúcar (Ingram y Hilton, 1986). En general, la respuesta a la fertirrigación con P y K es más pronunciada cuando el N aportado no es un factor limitante.

Respecto a la fertirrigación en viñedos, Bravdo y Hepner (1987), presentan resultados que indican que la fertirrigación es la forma más eficiente de suministrar NPK en los viñedos, pudiendo obtenerse rápida respuesta a la fertilización. El fósforo fue el nutriente que tuvo mayor incidencia en el rendimiento y calidad de la vid, reflejándose dicho efecto en altos rendimientos, número de racimos por planta, contenido de P en el pecíolo, calidad sensorial y color del vino.

En las figuras 4 y 5, Vidal et ál., (2004, 2005) reportan resultados del efecto del fertirriego en berries (frambuesa y arándanos). Se observa en ambos ensayos el considerable incremento en producción cuando se aplica la técnica del fertirriego. Cabe señalar, que en el tratamiento convencional, también se empleó riego por goteo, pero el N fue aplicado al suelo en tres oportunidades durante el ciclo de desarrollo. En tanto, en el tratamiento de fertirriego, este fue aplicado en forma permanente en el agua de riego.

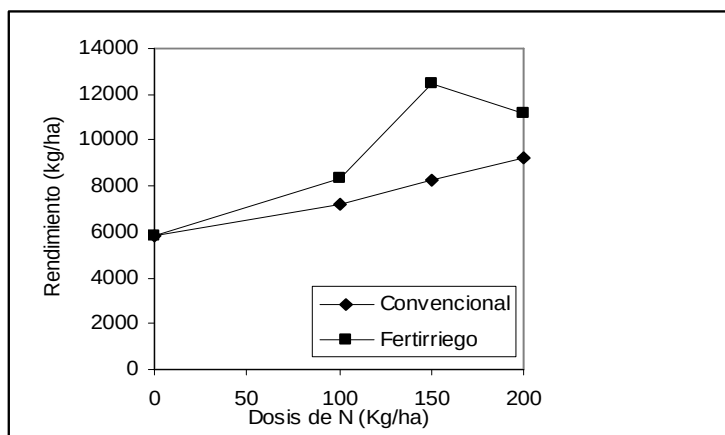


FIGURA 4. Rendimiento de frambuesa cv Heritage de cuarta temporada bajo diferentes dosis de N aplicado en forma convencional (3 parcialidades) y fertirriego (Vidal et ál., 2005)

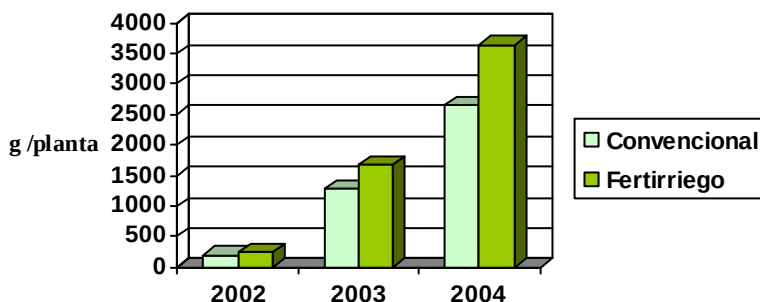


FIGURA 5. Rendimiento de arándano var. Duke durante tres temporadas, sometido a dos tratamientos de aplicación de fertilizantes (convencional y fertirriego). Plantación efectuada en diciembre de 2000. Vidal et ál., (2004)

3.7. Monitoreo de nutrientes y sales

No podemos enfatizar la importancia del control del riego sobre el monitoreo de la solución de suelo. El riego y el manejo de sales y nutrientes están completamente interrelacionados.

Algunas veces el monitoreo de la conductividad eléctrica o de los niveles de nitratos y otros elementos puede entregarnos más información sobre cómo estamos regando que la medición de la cantidad de agua en la zona de raíces. Por ejemplo, los niveles de nitratos descenderán abruptamente si se riega en exceso. Dependiendo de la calidad del agua de riego, los niveles de conductividad eléctrica aumentarán gradualmente en período de riegos deficientes.

El procedimiento de Monitoreo Nutricional se fundamenta en el control continuo del sistema suelo-agua-planta. El objetivo es optimizar la solución fertilizante y los aportes de agua, para así incrementar la rentabilidad y minimizar el impacto ambiental, obteniendo producciones de calidad.

El procedimiento consiste en la instalación de sondas de succión a diferentes profundidades del perfil de suelo para la obtención de la solución nutritiva, además del muestreo de la solución fertilizante (agua de riego más fertilizantes) que llega a la planta. Esto permite tener en todo momento, con gran facilidad y ahorro de tiempo, la estimación adecuada de la conductividad eléctrica, el pH y la concentración de nutrientes de la solución, como también, las sales nocivas para el cultivo tales como cloruros y sodio.

Resulta ser un apoyo fundamental a la gestión de la fertirrigación y su uso nos permite establecer:

- Control de programa de fertirriego (verificar las dosis de aplicación).
- Contenidos de nutrientes en el bulbo de riego.
- Necesidades reales de la planta en cada momento a lo largo del ciclo.
- Tipo y cantidad de fertilizantes más adecuados a utilizar.
- La forma de evitar y corregir antagonismos y desequilibrios.
- Evitar lavado de fertilizantes en el perfil.
- Detectar déficits hídricos o excesos de riego y/o fertilización innecesaria.
- Necesidades de acidificación del agua de riego para evitar precipitaciones y obstrucciones de goteros.
- Efectuar las modificaciones necesarias para optimizar la nutrición de la planta en períodos menores a 10 días después del muestreo.

Una de las sondas de succión se instala a la profundidad de la máxima densidad radicular y la otra bajo la profundidad de enraizamiento. Se procede a efectuar muestreos durante las diferentes fases de desarrollo de la planta y se obtienen soluciones acuosas del perfil de suelo y solución fertilizante, además de una muestra foliar. Un detalle del procedimiento de trabajo se presenta en las fotos 3 y 4.



FOTOGRAFÍA 3. Instalación de la sonda en fresas



FOTOGRAFÍA 4. Procedimiento de extracción de solución de suelo

4. Conclusiones.

Cuando se dispone de riego presurizado, el fertirriego no es una alternativa sino que se transforma en una necesidad por las numerosas ventajas que ofrece para manejar la nutrición de los cultivos. Para diseñar programas de fertirriego, se deben tomar en consideración diversos aspectos de suelo, agua y planta y, en este sentido, el empleo de un *software* para facilitar los cálculos constituye una herramienta de un valor fundamental para el uso de asesores y productores agrícolas.

La fertirrigación es una técnica muy efectiva para ahorrar agua y mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes. Existe una adopción creciente de esta técnica, por sus grandes ventajas.

No es conveniente aplicar programas generales de fertirrigación, puesto que cada productor tiene diferentes condiciones de suelos, nivel productivo y calidad de aguas de riego, lo que influye notablemente en sus necesidades de fertilización. La extrapolación de datos a diferentes zonas agroecológicas y diferentes condiciones de suelo, puede conducir a errores importantes y gasto innecesario.

Se debe incrementar la investigación relacionada con requerimientos de agua y nutrientes de los cultivos bajo microirrigación. La aplicación de nutrientes a través del agua de riego, sin tener como base los requerimientos del cultivo, puede crear serios problemas ambientales.

La fertirrigación debe ser considerada como un componente esencial de los modernos sistemas de riego presurizado, así se podrán alcanzar los mayores beneficios desde el punto de vista medioambiental, productivo y de rentabilidad.

Se debe avanzar en la aplicación de técnicas de monitoreo y en el mejoramiento de metodologías de determinación de la concentración de nutrientes en la solución de suelo y en su interpretación, de tal forma que los propios

productores puedan hacer estas determinaciones y reaccionar en forma oportuna con medidas de corrección y ajuste de la fertilización.

La intensificación de la agricultura bajo riego y el incremento en el uso de fertilizantes son las principales formas de incrementar la producción y satisfacer la demanda de alimentos, además de proteger el medio ambiente.

5. Literatura consultada

- ASSAF, R.; LEVIN, I. Y BRAVDO, B. 1983. The response of apple trees to nitrogen fertilization regimes. *Hassadeh* 63:2586-2593.
- AVIDAN, A. 1998. Fertigation in vegetables. *Gan, Sade ve Meshek* June 1998: 25-48. (en hebreo).
- BARBER, S.A. 1984. *Soil Nutrient Availability: A Mechanistic Approach*. John Wiley and Sons, Inc., NY.
- BAR-YOSEF, B. 1977. Trickle irrigation and fertilization of tomatoes in sand dunes: water, N, and P distribution in the soil and uptake by plants. *Agron. J.* 69:486-491.
- , 1999. Advances in fertigation. *Advances in Agronomy* 65:1-77.
- BAR-YOSEF, B. Y SAGIV, B. 1982. Response of tomato to N and water applied via trickle irrigation system. I. Nitrogen. *Agron. J.* 74:633-637.
- BAR-YOSEF, B.; MATAN, E.; LEVKOVICH, I.; ASSAF, A. Y DAYAN, E. 1992. Response of greenhouse tomatoes to irrigation and fertilization in the Besor area. Report on Project 30-170-92. *Agr. Res. Org., Bet Dagan, Israel*.
- BAR-YOSEF, B.; KRAMER, S. Y BEN BASAT, S. 1980. Trickle irrigation and fertilization in the Northern Arava Valley in Israel: Bell pepper. Annual Report. *Agr. Res. Org., Bet Dagan, Israel*.
- BAR-YOSEF, B.; SAGIV, B.; Y MARKOVITCH, T. 1989. Sweet corn response to surface and subsurface trickle phosphorus fertigation. *Agron. J.* 81:443-447.
- BOMAN, B.J. 1995. Effects of fertigation and potash source on grapefruit size and yield. *Dahlia Greidinger International Symposium on Fertigation, Technion, Israel*, pp. 55-66.
- , 1996. Fertigation versus conventional fertilization of flatwood grapefruit. *Fert. Res.* 44:123-128.
- BRAVDO, B. Y HEPNER, Y. 1987. Irrigation management and fertigation to optimize grape composition and vine performance. *Acta Hort.* 206, 49-67.
- BUCK, D.A. 1995. Historical development in microirrigation. *Proc. 5th Int. Microirrigation Cong., Orlando, FL., pp.* 1-5.
- BUNT, A.C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. *Unwin Hyman Ltd, London*.
- CADAHÍA, C.; EYMAR, A.; SÁNCHEZ, A. Y LÓPEZ-VELA, D. 1998. Differences in nutrient uptake of four rose cultivars in sand culture. *Acta Horticulturae* 458:335-341.

- CASARINI, E.; FOLEGATTI, M.V. Y ARTIGIANI, V.H. 2004. Fertirrigación en rosas. En: Fertirrigación: Teoría y práctica. Boaretto, Lyra, Ferreira y Vidal. Versión CD.
- CLOUGH, G.H.; LOCASCIO, S.J. Y OLSON, S.M. 1990. Yield of successively cropped polyethylene-mulched vegetables as affected by irrigation method and fertilization management. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 115:884-887.
- CHRISTENSEN, L.P.; PEACOCK, W.L. Y BIANCHI, M.L. 1991. Potassium fertilization of Thompson Seedless grapevines using two fertilizer sources under drip irrigation. *Asm. J. Enol. Vitic.* 42:227-232.
- DAFNE, O. 1984. Nitrogen effect on dry matter production, mineral absorption, yield and quality of processing tomatoes. M.Sc. Thesis submitted to the Faculty of Agriculture, The Hebrew University of Jerusalem, Israel.
- DASBERG, S.; BAR-AKIVA, S.; SPAZISKY, S. Y COHEN, A. 1988. Fertigation versus broadcasting in an orange grove. *Fertil. Res.* 15:147-154.
- EYMAR, A.; LÓPEZ, V. Y CADAHÍA, C. Fertirrigación de coníferas y rosas. En: Cadahia, C. Fertirrigación: cultivos hortícolas y ornamentales. Madrid: Mundi-Prensa, 1998, pp.417-463.
- FEIGIN, A.; ZWIBEL, M.; RILSKI, I.; ZAMIR, N. Y LEVAV, N. 1980. The effect of ammonium/nitrate ratio in the nutrient solution on tomato yield and quantity. *Acta Hortic.* 98: 149-160.
- FEIGIN, A. Y SAGIV, B. 1971. Broccoli response to manure and N fertilization in a loessial soil in southern Israel. Report on Project 401-10102. *Agr. Res. Org., Bet Dagan, Israel.*
- FEIGIN, A.; SAGIV, B.; AVIRAM, H. Y ZIPILEVICH, Y. 1976. Celery response to manure and N fertilization in a loessial soil in southern Israel. Report on Project 301-046. *Agr. Res. Org., Bet Dagan, Israel.*
- FEIGIN, A.; LETEY, J. Y JARRELL, W.M. 1982. Celery response to type, amount and method of N-fertilizer application under drip irrigation. *Agron. J.* 74:971-977.
- GANMORE-NEUMANN, R. Y KAFKAFI, U. 1980. Root temperature and percentage $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ effect on tomato plants. I Morphology and growth. *Agron. J.* 72:758-761.
- , 1983. Root temperature and percentage $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ effect on strawberry plants. I Growth, flowering and root development. *Agron. J.* 75: 941-947.
- HAGIN J. Y LOWENGART-AYCICEGI, A. 1999. Fertigation-State of the art. The Intern. Fertiliser Soc., Proceeding n.º 429, pp. 1-25.
- IMAS, P. 1999. Manejo de nutrientes por fertirriego en sistemas frutihortícolas. presentado en el XXII Congreso Argentino de Horticultura. 28 Sep. a 1 Oct. Tucumán, Argentina.
- IMAS, P.; BAR-YOSEF, B.; KAFKAFI, U. Y GANMORE-NEUMANN, R. 1997. Release of carboxylic anions and protons by tomato roots in response to ammonium nitrate ratio and pH in nutrient solution. *Plant and Soil* 191: 27-34.
- INGRAM, K.T. Y HILTON, H.W. 1986. Nitrogen-Potassium fertilization and soil moisture effects on growth and development of drip-irrigated sugarcane. *Crop Sci.* 26:1034-1039.
- KLEIN, I.; LEVIN, I.; BAR-YOSEF, B.; ASSAF, R. Y BERKOVITZ, A. 1989. Drip nitrogen fertigation of Starking Delicious apple trees. *Plant and Soil* 119: 305-314

- LAVON, R.; ERNER, Y.; SHAPZISKI, S. Y MOHEL, E. 1995. The effect of K fertigation with different N forms on the yield and fruit size of "Shamouti" oranges. In: Proceeding of the Dahlia Greidinger International Symposium on Fertigation. pp. 35-77. Technion, Haifa, Israel.
- MARSCHNER, H. (1995). Mineral Nutrition of Higher Plants. 2.nd ed. Academic Press, San Diego, New York.
- MILLER, R.; ROLSTON, D.E.; RAUSCHKOLB, R.S. Y WOLFE, D.W. 1976. Drip application of nitrogen is efficient. California Agric. 30:16-18.
- PAPADOPOULOU, I. 2001. Processo de transição convencional para a fertirrigação. P.9.70. In: Fertirrigação Flores, Frutas e Hortaliças. M. V. Folagatti et ál'. (Coord.). Vol 2. Livraria e Editora Agropecuária. 331 p.
- RAUSCHKOLB, R.S.; ROLSTON, D.E.; MILLER, R.J.; CARLTON, A.B. Y BURAU, R.G. 1979. Phosphorus fertilization with drip irrigation. Soil Sci. Soc. Am. J. 40:68-72.
- SAGIV, B.; BAR-YOSEF, B. Y ELIAH, E. 1980. Drip irrigation and fertilization of spring muskmelon at Besor, Pub. N°17. Div. Of Sc. Pub., The Volcani Center, Bet Dagan, Israel.
- SAGIV, B.; BAR-YOSEF, B.; ELIAH, E. Y MINI, A. 1983. Response of sweet corn to trickle irrigation and N fertilization under drip and sprinkle irrigation. Report N° 301/064. Agr. Res. Org., Bet Dagan, Israel.
- SAGIV, B.; BAR-YOSEF, B.; HADAS, A.; SORIANO, S. Y LEVKOVICH, I. 1995. Response of drip irrigated carrot to manure and municipal refuse compost and inorganic N fertilization. Report n.º 301/504-90. Agr. Res. Org., Bet Dagan, Israel.
- SAGIV, B.; FEIGIN, A.; HADAS, A.; KEINAN, M. Y MARCOVICH, T. 1992. Response of drip irrigated Chinese cabbage to manure and municipal refuse compost and inorganic N fertilization. Report n.º 301/154-90. Agr. Res. Org., Bet Dagan, Israel.
- VIDAL, I. 2003. OPTIFER® 1.0. Manual de Usuario. Departamento de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. 48 p.
- VIDAL, I.; VENEGAS, A. Y ESPARZA, E. 2005. Efecto de la fertilización nítrica y amoniacal en parámetros productivos y de calidad en frambueso (*Rubus idaeus* L.) fertirrigado. 56 Congreso Agronómico de Chile. 14-17 octubre 2005. INIA, Chillán, Chile.
- VIDAL, I.; VENEGAS, A. Y SOTO F. 2005. Efecto de la fertilización nitrogenada en parámetros productivos y de calidad en frambueso (*Rubus idaeus* L.) fertirrigado. 56 Congreso Agronómico de Chile. 14-17 octubre 2005. INIA, Chillán, Chile.
- VIDAL, I; SERRI, H. Y PINO I. 2005. Eficiencia de uso de N por fertirriego en arándano empleando la técnica de dilución isotópica. Informe final IAEA Technical Cooperation Project No. CHI/5/021: Improvement of Soil/Water/Nutrient Management to Control Soil Degradation
- ZAIDAN, O Y A. AVIDAN. 1997. Greenhouses tomatoes in soilless culture. Ministry of Agriculture, Extension Service, Vegetables and Field Service Departments (en hebreo).<http://www.ipipotash.org/presentn/mdnpfesf.html-top>.

I.6. Los sistemas agrarios como marco de la tecnología de suelos. Enfoques en la Unión Europea

La tecnología de la producción agraria y como integrante de ella la tecnología de suelos tiene su aplicación dentro de los llamados sistemas agrarios o agroecosistemas. Conviene pues, en primer lugar, examinar el significado de sistema agrario antes de pasar a revisar las características de los sistemas agrarios actuales, con énfasis en la situación española.

La revisión de las fuerzas motrices que están impulsando el cambio de la agricultura actual hacia otra más sostenible en la Unión Europea (UE) servirá para ilustrar las oportunidades que ofrecen a la tecnología de suelos y los retos a los que debe hacer frente. El presente capítulo finaliza con una referencia al futuro que se vislumbra para la tecnología agraria, en general, y para la tecnología de suelos, en particular, como instrumento del desarrollo agrario.

1. Sistemas agrarios

Los agroecosistemas son ecosistemas¹ naturales manejados y simplificados por la mano del hombre con el objeto de obtener una producción más elevada en beneficio propio.

Según Chorley y Kennedy (1976), citados por Vink (1983), un sistema es «un compuesto estructurado de objetos o atributos». Estos objetos y atributos consisten en componentes o variables (p. ej., fenómenos que pueden asumir valores variables) que exhiben relaciones discernibles entre ellas y que operan conjuntamente como un todo complejo, según un determinado patrón. Otro aspecto a destacar en la definición de los sistemas es que estos tienen unos límites arbitrarios, que definen un espacio físico, delimitado según el problema a estudiar.

Los ecosistemas y, consecuentemente, los agroecosistemas, son sistemas abiertos, lo que significa que hay un intercambio de masa, energía e información² con el entorno. Los ecosistemas pertenecen además a un tipo especial de sistemas, llamados sistemas controlados, en los cuales un conjunto de variables clave pueden ser controladas a través de la aplicación de la inteligencia (Vink, 1983).

¹ Unidad fundamental de estudio de la Ecología, definido en los años treinta del siglo XX por el botánico británico sir Arthur Tansley como una unidad que comprende un grupo de organismos (biota) y su entorno ambiental (factores abióticos, p.ej. el medio). Se puede definir a cualquier escala y se halla en situaciones próximas al equilibrio.

² Información incluye aspectos intangibles, pero muchas veces esenciales, como conocimientos y conceptos.

Una comunidad de plantas cultivadas, junto con las prácticas de manejo (p.ej., método de laboreo, rotaciones, etc.), ubicadas en una parcela, se denomina sistema de cultivo (Villalobos et ál., 2002). Urbano (2002) destaca la importancia que tienen las relaciones de los sistemas de cultivo con otros sistemas de producción, particularmente ganaderos y forestales; el reconocimiento de la importancia de dichas relaciones es fundamental para huir del enfoque reduccionista atribuido a la agronomía y avanzar hacia planteamientos holísticos en el manejo de los recursos naturales (Savory, 1988).

A un nivel superior de organización, los principales cultivos y prácticas de manejo utilizadas en una explotación agrícola concreta constituyen un sistema de explotación. A escala regional donde los sistemas de explotación son similares se puede hablar de sistemas agrícolas (Loomis y Connor, 1992).

Cuando se integran las producciones ganaderas y forestales, parece más apropiado hablar de sistemas agrarios, más aún si se pretende avanzar hacia una gestión global de los sistemas, integrando, por ejemplo, el ciclo de nutrientes, uno de los aspectos clave de la tecnología de suelos. El término agroecosistema es utilizado con diversa significación según los autores, siendo equivalentes en algunos casos a sistemas de cultivo y, en otros, a sistemas agrícolas o agrarios (Doré et ál., 2006). En lo que sigue su uso será el de sistemas agrarios.

1.1. Características de los sistemas agrarios

Los sistemas agrarios poseen un conjunto de características o atributos (Marten, 1988) que se pueden desglosar en atributos agroecológicos: productividad, estabilidad y sostenibilidad y en atributos sociales: ecuanimidad, autonomía y suficiencia. Dentro de la productividad se puede distinguir entre: cantidad, calidad, seguridad y economía.

En un sistema agrario es importante distinguir también (Gliessman, 1988) los insumos externos humanos, p. ej., pesticidas, fertilizantes inorgánicos o semillas y los insumos externos naturales, p. ej., radiación solar, precipitaciones, temperatura, viento, sedimentos o propágulos de semillas.

De manera similar hay que considerar de manera separada la estructura y las funciones del sistema. La estructura del sistema la componen las partes físicas con relaciones particulares y que serían los factores bióticos (organismos vivos que interaccionan con el ambiente) y los factores abióticos (p. ej., la radiación). Las funciones del sistema o procesos dinámicos que tienen lugar dentro del sistema serían el flujo de energía, los ciclos de nutrientes, el control de poblaciones y los cambios del agroecosistema.

1.2. Tipología de los sistemas agrarios

No existe en estos momentos una clasificación de los sistemas agrarios satisfactoria y aceptada por todos los autores. Ello se debe probablemente a la multitud de criterios (ambientales, tecnológicos, sociales, económicos) y de disciplinas implicadas en su clasificación.

Grigg (1990), partiendo de los trabajos de Whittlesey (1936), emplea cinco criterios: las asociaciones de cultivos y ganadería; los métodos empleados para producirlas; la intensidad en la aplicación a la tierra de trabajo, capital y organización, así como el retorno de productos resultante; el destino del producto final: comercial o de subsistencia y finalmente el conjunto de estructuras empleadas para albergar y facilitar las operaciones agrarias.

Basándose en ello distingue: agricultura itinerante; pastoreo nómada; arroz por inundación en Asia; agricultura mediterránea; sistemas de agricultura mixta (Europa y EE.UU.); sistemas de producción de leche (lecherías); plantaciones tropicales; ganadería extensiva y sistemas de producción de cereales.

Mannion (1995) presenta una clasificación basada en aspectos agroclimáticos y edáficos, lo cual tiene el interés de dar una visión global de su ocurrencia. Contiene la mayoría de los tipos de Grigg, realiza numerosas subdivisiones según la orientación de la producción y reconoce los sistemas agroforestales (p. ej., dehesas) no recogidos por Grigg.

Los sistemas agrarios también se pueden clasificar de forma esquemática en seis grupos siguiendo, a grandes rasgos, los procesos de transformación que la agricultura ha sufrido en Europa: agricultura tradicional extensiva, agricultura tradicional a gran escala (latifundio), agricultura tradicional a pequeña escala, agricultura orientada al mercado, agricultura socializada y agricultura especializada en producción animal.

1.3. Evolución de los sistemas agrarios y desarrollo tecnológico

El desarrollo de los sistemas agrarios ha ido ligado a avances científicos e innovaciones tecnológicas que han generado cambios en los modelos de producción y en la organización social.

La tabla 1, modificada a partir de Mannion (1995), recoge algunos hitos fundamentales en la evolución de la agricultura en la Unión Europea, sobretodo en el ámbito anglosajón.

Período	Aportación tecnológica
8000 a.C.	Primeras domesticaciones de plantas y animales
3000 a.C.	Arado, uso de la tracción animal
1000 a.C.	Primeros riegos
1500 a.C. – 1500	Expansión agrícola y deforestación en Europa
50 a.C.	Columela publica «De Re Rustica», piedra angular de la agronomía antigua
S. X	Expansión en España de los regadíos árabes, partiendo de los sistemas romanos
S. XI	Libro de agricultura de Ibn-Al-Awwar o Abu Zacaria
1500	Fin de la Edad Media. Introducción de cultivos procedentes del Nuevo Mundo
1650	Generalización de la rotación de Norfolk y similares en Gran Bretaña
1830s	Importación de nitrato sódico desde Chile
1840	Liebig publica «Chemistry in its application to agriculture and physiology»
1843	Lawes y Gilbert establecen los experimentos de Rothamsted (Gran Bretaña)
1844	El primer cargamento de guano llega a Valencia
1865	Publicación de los trabajos de Mendel sobre Genética
1870s	Revolución industrial. Especialización de la producción. Maquinaria
1913	Proceso Haber-Bosch para producir fertilizantes nitrogenados
1920s	Tractores. Recolectoras
1930	<i>Dust blow</i> en EE.UU. e inicio del movimiento conservacionista
1940s	Fitosanitarios
1950s	Desarrollo del modelo industrial en agricultura. Revolución verde
1960s	Siembra directa. Inicio del cultivo de conservación
1995	Comercialización de organismos modificados genéticamente

TABLA 1. Evolución de la agricultura (modificada de Mannion, 1995)

El desarrollo de la agricultura se expandió lentamente desde los primeros lugares donde se originó (Oriente Medio, Sudeste Asiático, Mesoamérica y Sudamérica) hacia otras áreas. De esta manera, no llegó a España hasta hace 7500 años y quizás tardó unos 2000 años más en llegar a Gran Bretaña.

Como puede verse en un rápido examen de la tabla de Mannion (tabla 1), el desarrollo de la agricultura está ligado, muchas veces, a avances en temas centrales de la tecnología de suelos: fertilización, manejo del agua y trabajo del suelo.

2. Manejo de los sistemas agrarios en agricultura convencional y tendencias de cambio

La introducción del término «agricultura convencional» implica situarse en un determinado lugar en el espacio y en el tiempo. En este capítulo, agricultura convencional se refiere a la que se practicaba hasta la actualidad y aún se practica en la cuenca mediterránea como parte de la España seca y, por extensión, en el resto de la Unión Europea.

La lenta evolución de los sistemas agrarios, desarrollados a partir del Neolítico (Grigg, 1990), dio paso en Europa Occidental a la agricultura convencional, si bien de forma aproximada se identifican tres momentos en que se han producido cambios cualitativos y cuantitativos importantes: el primero con el fin de la época medieval (1500–1600), con la introducción de tubérculos y praderas; el segundo con la Revolución Industrial (1870s) que conllevó la especialización de cultivos y la introducción de técnicas, que posibilitaban un cierto ahorro de mano de obra, y el tercero con el desarrollo de la aplicación del modelo industrial en agricultura (1950s) que permitió el uso masivo de insumos externos, en un contexto de bajos precios de la energía, y que también conllevó avances en la mejora genética vegetal y animal y en el campo de los agroquímicos.

La agricultura que se denomina convencional, también para diferenciarla de la que existía antes de 1950 y que algunos llaman tradicional, ha sido responsable de que la UE alcanzara la autosuficiencia alimentaria entre 1970 y 1980 y de que dispusiera de una riqueza de productos agrícolas como antes no se había conocido. La aplicación de sus principios en el manejo de los sistemas agrícolas, aunque puedan presentar distintas orientaciones productivas, conlleva como objetivo el obtener la mayor producción posible, que en general corresponde al mayor ingreso. El uso masivo de insumos para lograr este objetivo productivo conlleva que algunos autores también la denominen «agricultura intensiva» (Doré et ál., 2008).

De manera global los sistemas agrarios españoles han presentado una menor productividad que otros sistemas, p. ej., del norte de Europa. Las limitaciones en las disponibilidades de agua impidieron ensamblar un modelo tecnológico comparable y que pone de relieve la importancia de la tecnología del manejo del agua en la agricultura mediterránea.

La eliminación de las limitaciones en el suministro de nutrientes a los cultivos (tecnología de la fertilización) también ha constituido un aspecto clave en las mejoras de las producciones. Ha sido, sin embargo, la integración de múltiples avances tecnológicos (variedades mejoradas, adecuado control de plagas, enfermedades y malas hierbas mediante el uso de agroquímicos u otros) lo que ha posibilitado el citado progreso.

La intensificación mejoró las condiciones de trabajo de los agricultores y su renta. El incremento de las producciones conllevó, a su vez, el desarrollo de la tecnología de alimentos: almacenaje, transformación de productos y transporte, contribuyendo a un mayor desarrollo económico y social de ciertas zonas agrícolas y ganaderas, potenciado con la exportación de los productos a nuevos mercados.

No obstante, en este momento, nos hallamos en plena transformación de la filosofía de manejo de los sistemas agrarios en la Europa occidental. Se pueden identificar, a grandes rasgos, tres fuerzas motrices principales de dicho cambio: la primera es la pérdida de confianza por parte de una población mayoritariamente urbana en el sistema agroalimentario, particularmente, en relación con la calidad y la seguridad alimentaria; la segunda son los excedentes generados por una agricultura subvencionada, mientras existe un 80% de la población mundial con problemas de desnutrición, y la tercera va asociada a los impactos sobre el medio ambiente y la creciente presión social sobre la agricultura que ello origina.

2.1. Pérdida de confianza en el sistema agroalimentario

La opinión pública occidental se vio sorprendida por la aparición de una serie de hechos, ampliamente recogidos en los medios de comunicación, que provocaron en ella serias dudas sobre el sistema agroalimentario (Bonny, 2000).

Se cuestionaba la capacidad del sistema alimentario para producir alimentos sanos y el manejo mismo del sistema. Algunos casos recientes han sido, o son, la fiebre aftosa de los rumiantes, la peste porcina clásica del cerdo en varios países europeos o la presencia de pesticidas orgánicos persistentes en alimentos vegetales.

Todo ello se tradujo, a nivel de la UE, en un conjunto de iniciativas legislativas para intentar corregir el sistema³, la creación de Agencias de Calidad Alimentaria y en nuevas actitudes por parte del consumidor: exigencia de productos de mayor calidad, e incluso una disposición a pagar una cantidad superior por alimentos sanos y naturales.

2.2. Excedentes y malnutrición

La agricultura de los países europeos occidentales antes de la última reforma de la Política Agraria Comunitaria (PAC) se encontraba fuertemente subvencionada (41.992 millones de euros para el año 2003 en la UE), aunque la subvención solo representaba, aproximadamente, un 0,3% del PIB europeo.

3 En la actualidad en la UE el Reglamento 339/2005 exige que se compruebe en los alimentos y de forma regular, los contenidos de residuos de plaguicidas en los productos vegetales para que no se sobrepasen los límites máximos establecidos para cada producto fitosanitario. Además el Reglamento 178/2002, exige que se garantice la trazabilidad de los alimentos y de los piensos. Como consecuencia los agricultores han de cumplir una serie de obligaciones en materia de trazabilidad y de registro relativos a la utilización de productos fitosanitarios.

La PAC anterior fue un éxito en relación al incremento de las producciones, pero en los últimos años generó un gran volumen de excedentes cuya financiación resultaba en extremo costosa. A su vez, la UE era y es deficitaria en productos destinados a la alimentación animal e importa, mayoritariamente, productos frutícolas, tropicales y aceites.

Por otro lado, en los países en vías de desarrollo, la malnutrición es crónica en muchas áreas⁴, especialmente en África subsahariana y el sur de Asia. Los sistemas agrarios de algunas de estas regiones se hallan profundamente perturbados, de modo que no son capaces de satisfacer las necesidades básicas de la población y menos el aumento de la demanda que se espera. Tampoco los excedentes de los países desarrollados sirven para alimentar a esta población mal nutrida. Numerosos autores cuestionan la exportación del modelo de la Revolución Verde al resto del mundo y abogan por modelos que tengan más en cuenta las especificidades locales. Además, el progreso de los países en vías de desarrollo se ve limitado por las barreras e inconvenientes comerciales que los países más desarrollados oponen al flujo de alimentos, al tiempo que las exportaciones subvencionadas de los últimos inundan sus mercados e impiden el despegue de sus sistemas agrarios. Esta situación se agrava por la carencia de infraestructuras o la dificultad de acceder a créditos para poder comprar semillas u otros insumos. La solución de dichos problemas es en extremo compleja y de naturaleza económico-social, pero también de manejo de recursos. Se plantean interesantes problemas desde el punto de vista de la tecnología de suelos, como por ejemplo el de cómo incrementar la fertilidad de los suelos de África como una opción básica en la estrategia de mejorar la alimentación del continente (Buresh et ál., 1997).

2.3.- Impactos sobre el medio ambiente

Otro punto clave y desencadenante de la evolución reciente de la agricultura convencional en los países de la UE ha sido el impacto de la actividad agraria sobre el medio ambiente. Algunos aspectos a resaltar están relacionados con la ecoeficiencia, la pérdida de recursos no renovables, el uso excesivo de insumos que provocan problemas de contaminación y la pérdida de biodiversidad. Las actividades agrarias contribuyen también al cambio global a través de los denominados gases de efecto invernadero (Batjes y Bridges, 1992). La región mediterránea es una de las zonas más sensibles a dicho cambio (Peñuelas, 1998).

⁴ Al inicio de este siglo se calcula que 850 millones de personas carecen de una alimentación suficiente para satisfacer las necesidades calóricas diarias; paradójicamente el 75% vive en el medio rural.

2.3.1. *Ecoeficiencia*

La Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) utiliza una serie de indicadores para evaluar el comportamiento ambiental de diferentes sectores económicos, siendo uno de ellos la ecoeficiencia. La ecoeficiencia se define (EEA, 2002) como la relación entre la actividad económica y los efectos ambientales negativos asociados. Uno de los objetivos del desarrollo sostenible es romper o desacoplar esta relación, lo que implica la reducción en la cantidad de los recursos naturales utilizados o en la cantidad de emisiones por unidad de *output* económico. Este incremento en la eficiencia se consigue bien a través del cambio tecnológico, bien por un producto ambientalmente menos dañino.

En comparación con otros sectores, la ecoeficiencia en los sistemas agrarios europeos está mejorando lentamente lo cual, a la vez, está y estará ligado a la PAC.

2.3.2. *Usuario principal de suelos y aguas*

La agricultura utiliza por la propia naturaleza de la actividad y, de manera extensiva, el recurso suelo. En las zonas mediterráneas, donde el regadío constituye la clave de la estabilidad de las producciones y de la rentabilidad, lo mismo ocurre con el agua. La competencia con otras actividades económicas que demandan dichos recursos ha venido cuestionando desde hace años la posición preeminente de la agricultura, especialmente en lo que se refiere al uso del agua (Naredo, 1997).

2.3.3. *Pérdida de recursos no renovables*

Uno de los principales recursos naturales que más pérdidas sufre es el suelo, el cual no es renovable a escala humana (Porta et ál., 1999). Las formas de degradación del suelo en relación a la actividad agraria son diversas (Rusco et ál., 2001), debiendo en la UE citarse la erosión que afecta a 117 millones de hectáreas (12% de la superficie de la UE); la compactación, existiendo un riesgo importante en un tercio de la superficie europea; la salinización, remarcable en 3,8 millones de hectáreas y siendo particularmente importante en el valle del Ebro; la pérdida de materia orgánica en un contexto donde el 45% de los suelos europeos presenta contenidos bajos de materia orgánica y la contaminación difusa. Todo ello, como señala López Bermúdez (2000), puede llevar a algunas áreas mediterráneas a la desertificación.

2.3.4. *Uso excesivo de fertilizantes y pesticidas*

La agricultura convencional se fundamenta en un amplio uso de fertilizantes minerales y pesticidas. Si bien las cantidades de, por ejemplo, los fertilizantes nitrogenados minerales empleadas son en general relativamente modestas, no

sucede lo mismo en determinadas áreas (Ramos et ál., 2002) o cuando se consideran también los fertilizantes orgánicos⁵. Ello conduce a la existencia de grandes zonas donde las disponibilidades de nitrógeno están muy por encima del que pueden absorber los cultivos y que se ha traducido en la presencia creciente de nitratos en las aguas, en bastantes casos por encima del límite de potabilidad de 50 mg NO₃/l.

Simultáneamente, los problemas de hipoxia, ligados a las pérdidas de nutrientes de los ecosistemas agrarios, alcanzaron una gran extensión (Díaz, 2001).

En lo que se refiere al incremento del uso de agroquímicos, en las últimas décadas ha sido muy notable. En los últimos 50 años se han multiplicado por 26 (Starke, 2002) superando los 150 millones de toneladas y esta expansión en el uso va acompañada de descubrimientos asociados a la toxicidad sobre las personas⁶. Asimismo, su detección en las aguas ha ido incrementándose con el aumento de su uso y la mejora de las técnicas analíticas para su detección.

No obstante, en la Unión Europea, el desarrollo de la Directiva 91/414/CEE sobre comercialización de productos fitosanitarios, ha provocado la retirada del 75% de las sustancias activas que existían antes de 1993 además de otras medidas asociadas⁷.

2.3.5. Pérdida de biodiversidad

La pérdida de biodiversidad⁸ se define como la reducción de forma permanente o durante un largo período, a nivel cuantitativo o cualitativo, de los componentes de la biodiversidad y de su capacidad para suministrar bienes y servicios.

El manejo de los agroecosistemas tiene como finalidad aprovechar el flujo de energía para obtener un producto útil y conlleva su simplificación. La extensión del monocultivo y otras prácticas agrarias son consideradas responsables de la

5 La intensificación de la producción ganadera implicó la concentración de animales, desligándola, en muchas áreas, de la actividad agrícola. La consecuencia, en dichas áreas, fue la insuficiente disponibilidad de terrenos para la aplicación de residuos ganaderos.

6 En 1993 los toxicólogos identificaron 45 plaguicidas y elementos químicos industriales sospechosos de alterar el sistema endocrino. En 1998 pasaron a ser 60 y en la actualidad se identifican más de 250 agroquímicos de este tipo. Además la aplicación rutinaria o preventiva de agroquímicos crea situaciones de riesgo, percibidas o reales, relacionadas con la posibilidad de que los alimentos contengan restos de estas aplicaciones.

7. Reglamento 339/2005 y Reglamento 178/2002.

8 Biodiversidad es la variabilidad de los organismos vivos en cualquier ámbito y comprende la diversidad en cada especie o diversidad genética, entre las especies o diversidad específica y la de los ecosistemas o diversidad ecológica.

pérdida de razas animales y de especies y variedades de plantas⁹, además de una pérdida adicional de biodiversidad¹⁰ que, para algunos, hace ya años que ha llegado a límites inaceptables (Germain y Ros, 1999). En muchos agroecosistemas, esta degradación no parece haberse detenido, sino que sigue aumentando.

Además de la pérdida en la propia biodiversidad faunística y florística en los agroecosistemas cabe añadir los impactos negativos en los ecosistemas naturales, p. ej., el enriquecimiento de los cursos de agua en nutrientes minerales o en pesticidas, o el secado de determinadas áreas húmedas.

3. Otros enfoques en el manejo de los sistemas agrarios

En la UE existen otros enfoques en la gestión de los sistemas agrarios y que tienen interés por presentar alternativas a la agricultura convencional.

3.1. Agricultura o producción ecológica

La agricultura o producción ecológica se conoce en otros países bajo la denominación de orgánica o biológica. Sus bases ideológicas y técnicas se establecieron durante la década de los años cuarenta y a principios de los cincuenta del siglo pasado, en plena expansión industrial.

La producción ecológica se halla reglamentada en los ámbitos europeo, estatal y autonómico en España, asociándole una etiqueta. En este contexto la producción ecológica se refiere a un tipo de producto definido sobre la base de unas prácticas determinadas de cultivo. En el Reglamento 834/2007, el Consejo de la Unión Europea establece que «la producción ecológica es un sistema general de gestión agrícola y producción de alimentos que combina las mejores prácticas ambientales, un elevado nivel de biodiversidad, la preservación de recursos naturales, la aplicación de normas exigentes sobre bienestar animal y una producción conforme a las preferencias de determinados consumidores por productos obtenidos a partir de sustancias y procesos naturales».

Este tipo de producción tiende a incrementarse en la UE aunque la superficie a ella dedicada, inferior al 4,2% en el año 2006, sigue siendo minoritaria.

9 El ser humano ha ido domesticando para la producción de alimentos y desde hace unos 10 000 años, distintas especies animales y vegetales. Se contabiliza que se han domesticado unas 30-40 especies de mamíferos y de aves y se han cultivado unas 7000 especies vegetales aunque solo una docena asegura el 70 % de la producción alimentaria.

10 Se suele evaluar, de forma particular, por la presencia o ausencia de especies de pájaros ya que la diversidad y abundancia de plantas e insectos afectan directamente a la disponibilidad de alimento para las aves. También se suele evaluar mediante la presencia de plantas consideradas malas hierbas en los campos cultivados.

3.2. Agricultura o producción integrada

La agricultura integrada se desarrolla en Europa a partir de los años ochenta del siglo XX y tiene su origen en la expansión de los principios del control integrado de plagas a la globalidad de las prácticas agrarias. Ha sido impulsada por la Organización Internacional de la Lucha Biológica (OILB) aunque, en los últimos tiempos, la agroindustria ha apostado claramente por los principios de producción a ella asociados, al resolver alguno de los problemas actualmente planteados, p. ej., la trazabilidad. No obstante, no se adopta un etiquetado único.

El término control integrado de plagas (CIP) se refiere a «la combinación de estrategias, incluyendo métodos biológicos, biotécnicos, genéticos y de manejo en campo, diseñados para reducir al mínimo el uso de pesticidas». En la UE cabe destacar la obligación, a partir del año 2014, de seguir los principios del CIP en la aplicación y utilización de productos fitosanitarios.

A diferencia de la agricultura ecológica, la agricultura integrada no pretende la eliminación del uso de agroquímicos ni del uso de la moderna tecnología, sino que más bien aboga por reducir las técnicas con alto impacto ambiental.

La producción integrada pretende la optimización de múltiples objetivos: el mantenimiento de los ingresos agrarios y el empleo, la protección del entorno, hábitats y paisajes valiosos, la mejora del bienestar y la salud de los consumidores, proveyéndoles de alimentos de alta calidad, y la prevención de la contaminación.

Este tipo de agricultura ha tenido sus primeros éxitos en la producción frutícola y posteriormente en la hortícola. En fruticultura, las normas técnicas de la producción integrada suelen considerar (no existe una normativa europea o estatal común en España) todos los aspectos de la tecnología de suelos, desde la conservación del entorno al estudio del suelo antes de la plantación, la selección de patrones y variedades acorde con las condiciones edafoclimáticas, el establecimiento de la plantación, la fertilización, la programación del riego y el manejo de la cubierta vegetal.

4. La tecnología de suelos en el manejo futuro de los sistemas agrarios

El manejo de los recursos y entre ellos el suelo y el agua, continuará ligado a la importancia y a la necesidad de producir¹¹.

11 Se calcula que la población mundial alcanzará la cifra de 9-9,5 millones en 2050. Sin cambios en las dietas ello implica multiplicar por 1,5 la demanda actual de alimentos pero si la dieta se diversifica, por un mayor poder adquisitivo, aumentando la ingesta de calorías animales, la demanda será superior al doble de la actual. Se necesitan de 3 a 5 calorías de origen vegetal para

El reto de una demanda creciente de alimentos se puede satisfacer aumentando la superficie cultivada y manteniendo los niveles de productividad o bien incrementando los rendimientos por unidad de superficie. Aquí es interesante recordar el concepto de capacidad de carga definido como el número de personas o animales que se pueden mantener con la productividad primaria de una determinada área. Se podría discutir cuál es la opción más viable, aunque parece que la solución para muchos es la intensificación en las áreas potencialmente más productivas, dejando más superficie sin cultivar, es decir, más espacio para la propia naturaleza. Las superficies disponibles (Fischer et ál., 2001) en buena parte del mundo, la competencia para el uso no agrícola con otros sectores, la necesidad de mantener bosques y praderas como medida ambiental para luchar contra el cambio climático y las tendencias sociales en Occidente¹² encaminan hacia la adopción de esta solución.

Este manejo de los recursos va asociado a la exigencia de alcanzar objetivos medioambientales. Estas tendencias y el cambio en la percepción social de las funciones de la agricultura se recogen en la actual PAC (Reglamento de la CE 1782/2003), de manera que se plantea eliminar el vínculo entre producción y ayudas directas¹³, aunque persistan algunos elementos para mantener el precio de los productos; y supeditar las ayudas directas al cumplimiento de normas medioambientales además de otras normas relacionadas con la salud pública, el bienestar animal, la sanidad animal y vegetal. A su vez, se incrementan los fondos para el desarrollo rural.

En el ámbito de manejo de recursos frente a las exigencias ambientales ya existían importantes iniciativas legislativas p. ej., en relación a la protección de las aguas contra la contaminación por nitratos, tanto a escala de la UE como estatal y autonómica y la designación de las zonas vulnerables asociadas. En el ámbito europeo, las zonas vulnerables se espera cubran un 46% de la superficie (1,5 millones de km²). En la comunidad autónoma de Cataluña (España) se designaron en 1998 las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas subterráneas por nitratos de origen agrario y ello va asociado al obligado cumplimiento del «código de buenas prácticas agrarias en relación al nitrógeno», así como la aplicación de un programa de medidas agroambientales. Algunos de los aspectos regulados y a los que hay que dar respuesta técnica son: los períodos

producir una caloría animal y la producción de 1 kg de proteína animal consume 5 veces más agua que la producción de 1 kg de proteína vegetal.

12 En los 27 países de la UE el 8% de la población activa se dedica a la agricultura y aproximadamente sólo un 4% lo hace en los 15 países integrantes de la UE en 2004, antes de la ampliación.

13 En 2007, el apoyo europeo a la agricultura era de 56 mil millones de Euros, de los cuales 37 mil millones corresponden a ayudas directas distribuidas de forma desigual según los productos. Las ayudas directas son prácticamente nulas para las producciones hortícolas y frutícolas y, por ejemplo, son muy importantes para la producción de carne bovina.

de aplicación de fertilizantes, las áreas excluidas, los planes de fertilización, dosis de fertilizante máximas según cultivo y tipo, la gestión del riego o la explotación de cultivos intercalares, entre otros. La programación del abonado nitrogenado, especialmente en Cataluña, donde la mayoría de las zonas de mayor actividad agraria se hallan dentro de las zonas vulnerables, necesita integrar obligatoriamente los aspectos de gestión antes mencionados. La necesidad de cerrar los ciclos de nutrientes subraya las oportunidades que el campo de la tecnología de suelos ofrece a través de una correcta aplicación de los residuos orgánicos al suelo. El papel de los fertilizantes especiales, las técnicas y momentos de aplicación son otros tantos aspectos que, ante un exceso de nutrientes, adquieren un relieve especial sobre el que habrá que profundizar.

La paradoja del aumento (o mantenimiento) de la productividad y mejora de la calidad ambiental no se puede lograr más que con una mejora de la ecoeficiencia de la actividad.

En relación con la tecnología y el desarrollo agrario y más específicamente con la eficiencia en la utilización de los recursos, insumos o entradas en el sistema, Wit (1992) ya señalaba que el fertilizante nitrogenado se utilizaba de forma más eficiente (kg de grano/kg de N), a medida que se incrementaba la producción, concluyendo que existe un efecto sinérgico entre los insumos. Ello implica que hay que aproximarse a altos niveles de productividad para obtener la máxima respuesta de estos insumos. Cuando se intenta seguir este principio a nivel de explotación surgen una serie de dificultades ligadas al entorno edafoclimático, p. ej., un período de sequía después de la aplicación de fertilizante nitrogenado, lo que implica que las plantas no van a absorber este nitrógeno y que la contaminación posterior puede ser elevada. También la propia variabilidad espacial de los suelos, que puede conllevar a que una parte de la parcela reciba unos insumos excesivos cuando esta es tratada como una unidad más en el sistema de explotación y se aplica la misma cantidad de fertilizante, a todas las parcelas, con el mismo cultivo. Aparece pues, simultáneamente, la necesidad de un manejo de acuerdo al medio que hay que conocer.

La aplicación de los principios de la tecnología de suelos a la gestión eficiente de los regadíos en el área mediterránea es imprescindible para garantizar, primero, la seguridad alimentaria y, en segundo lugar, para incrementar la productividad de este recurso cada vez más escaso. Además existen toda una serie de problemas asociados como son la sobreexplotación de acuíferos o su contaminación por agroquímicos que añaden más problemas a los sistemas agrarios de regadío y que exigen que el agua de riego se utilice con mucha más precisión que en la actualidad. Se vislumbra la posibilidad de una mayor reutilización de las aguas residuales y la expansión de aplicaciones tecnológicas, como el riego deficitario controlado.

En lo que respecta a la conservación de los recursos, la erosión del suelo es casi con seguridad el problema más grave de la agricultura de secano en la zona mediterránea (Martín de Santa Olalla, 2000). Así, las técnicas del cultivo de conservación (García-Torres et ál., 2001), que dejan suficientes residuos en la superficie protegiendo el suelo de la erosión, resultan imprescindibles. Existe tecnología en ciertos cultivos para poder utilizar una cubierta vegetal entre hileras que, para evitar una posterior competencia por el agua con el cultivo, es tratada a salida de invierno con un herbicida, de manera que se produce solo un consumo de agua cuando no existe interferencia con el cultivo. Al tiempo, esta tecnología ha de permitir incrementar el contenido de carbono de nuestros suelos (Lal, 2002).

El mantenimiento de la materia orgánica es otro aspecto clave para preservar la calidad del suelo (Dogliotti et ál., 2005).

En la protección de la biodiversidad, técnicas tradicionales en tecnología de suelos, como la rotación de cultivos (Urbano, 2002; Vandermeer, 1989) o el trabajo del suelo mediante técnicas asociadas al cultivo de conservación¹⁴ juegan también un papel clave.

Para alcanzar los objetivos medioambientales parece lógico que se pase de una agricultura de elevados insumos, un sistema con problemas de degradación del medio, a una agricultura de menores insumos o sostenible, pero ello solo es posible si se dispone de mayor información (Edwards et ál., 1990) sobre el sistema agrario, si se es capaz de interpretarla y de dar una solución técnica; por tanto decir que cada vez será más importante la aplicación de los principios de la tecnología de suelos.

Se irán introduciendo nuevos avances asociados, por ejemplo, a la aplicación de las técnicas de la denominada agricultura de precisión.

La agricultura de precisión (Pierce y Sadler, 1997) es un concepto que supone el desarrollo y la adopción de nuevos sistemas de decisión, basados en el manejo diferencial de la explotación agraria, atendiendo a la variabilidad espacial presente en las parcelas. Así los sistemas de información geográfica o los sistemas de posicionamiento global por satélite (GPS) han abierto una vía para confeccionar mapas de rendimientos en cada parcela o para tratar la variabilidad espacial de cada parcela en relación, por ejemplo, al nivel de fertilidad o a la profundidad enraizable. Estas técnicas conectadas a lo que se denomina maquinaria inteligente permiten aplicar cantidades variables de insumos según las necesidades de cada zona en una parcela. Ello no exime de la necesidad de un alto grado de conocimientos edafológicos e información de suelos (tipo de suelo, fertilidad, etc.), complementados con la información suministrada por

14 La simplificación de las labores agrícolas permitiría también incrementar el almacenaje de carbono en el suelo ayudando a mejorar el balance de carbono de la producción agraria, disminuyendo las emisiones de dióxido de carbono.

ordenadores, satélites, sensores y otros componentes electrónicos. Actualmente se considera que, para las explotaciones europeas, la viabilidad económica para la aplicación de esta técnica se sitúa en 70–100 ha.

Lo anterior, asociado al acercamiento de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación al sector agrario, van configurando su evolución en la UE. En un período corto de tiempo el impacto de Internet en la agricultura española se dará en los servicios que suministren extensión e información al agricultor, lo que constituye también un nuevo reto en el ámbito de la tecnología de suelos.

Volviendo al inicio del capítulo, hay un punto clave para que las políticas agrarias y medioambientales, concretamente de conservación de suelos y aguas, tengan éxito y es, entre otros aspectos (Napier et ál., 2000), su capacidad de integración en las especificidades de los sistemas agrarios.

5.- Bibliografía

- BATJES, N.H. Y BRIDGES E.M. 1992. A review of soil factors and processes that control fluxes of heat, moisture and greenhouse gases. Technical Paper 23. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen.
- BONNY S. 2000. Les consommateurs, l'agriculture, la qualité et la sécurité des aliments: une analyse du questionnement des consommateurs et des réponses apportées. *Productions Animales* 13, 287–301.
- BURESH R.J., SÁNCHEZ P.A. Y CALHOUN F. (eds.). 1997. Replenishing soil fertility in Africa. SSSA special publication 51. Soil Science Society of America y American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin.
- DÍAZ R.J. 2001. Overview of hypoxia around the world. *Journal of Environmental Quality* 30, 275–281.
- DIRECTIVA de 15 de julio de 1991 del Consejo de las Comunidades Europeas relativa a la comercialización de productos fitosanitarios. *Diario Oficial de la Unión Europea* 230, de 19-08-1991, 1–32.
- DOGLIOTTI S., ITTERSUM M.K. VAN Y ROSSING, W.A.H. 2005. A method for exploring sustainable development options at farm scale: a case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agricultural Systems* 86, 29–51.
- DORÉ T., LE BAIL M., MARTIN P., NEY B. Y ROGER-ESTRADE J. (coords.). 2006. *L'agronomie aujourd'hui*. Quae.
- DORÉ T., RÉCHAUCHÈRE O. Y SCHMIDELY P. 2008. *Les clés des champs. L'agriculture en questions*. Quae.
- EDWARDS C.A., LAL R., MADDEN P., MILLER R.H. Y HOUSE G. (eds.). 1990. *Sustainable agricultural systems*. Soil and Water Conservation Society. Iowa.
- EEA (European Environment Agency). 2002. *Environmental signals 2002. Environmental assessment report n.º 9. Chapter 6: Agriculture*. European Environment Agency. Copenhagen.

- FISCHER G., SHAH M., VELTHUIZEN H. VAN Y NACHTERGAELE F.O. 2001. Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century . International Institute for Applied Systems Analysis and FAO. Wageningen.
- GARCÍA-TORRES L., BENITES J. Y MARTÍNEZ-VILELA A. 2001. Conservation agriculture, a worldwide challenge. FAO.
- GERMAIN J. Y ROS J. 1999. La conservació i l'ús sostenible de la diversitat biològica de Catalunya: un repte i una necessitat, 77–87. En: Idees. Revista de temes contemporanis. La sostenibilitat, o el futur possible. Departament de la Presidència. Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- GLIESSMAN S.R. 1998. Agroecology. Ecological processes in sustainable agriculture. Sleeping Bear Press.
- GRIGG D.B. 1990. The agricultural systems of the world. An evolutionary approach. Cambridge University Press.
- LAL R. 2001. Soil carbon sequestration and the greenhouse effect. Soil Science Society of America, Inc.
- LOOMIS R.S. Y CONNOR D.J. 1992. Crop ecology. Productivity and management in agricultural systems. Cambridge University Press.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. 2000. El riesgo de desertificación, 15-38. En: Martín de Santa Olalla F. (coord.). Agricultura y desertificación. Mundi-Prensa.
- MARTEN G.G. 1988. Productivity, stability, sustainability, equitability and autonomy as properties for agrosystem assessment. *Agricultural Systems* 26, 291-316.
- MANNION A.M. 1995. Agriculture and environmental change. John Wiley and sons.
- MARTÍN DE SANTA OLALLA F. (coord.) 2000. Agricultura y desertificación. Mundi-Prensa.
- NAPIER T.L., NAPIER S.M Y TURDON J. 2000. Soil and water conservation policies and programs. Successes and failures. CRC Press.
- NAREDO J.M. 2001 Sobre la «sostenibilidad» de los sistemas, 435–448. En: Labrador J. y Altieri M.A. (eds.). Agroecología y desarrollo. Aproximación a los fundamentos agroecológicos para la gestión sustentable de agrosistemas mediterráneos. Mundi-Prensa.
- PEÑUELAS J. 1998. La mediterrània. Alteracions en el funcionament dels ecosistemes, 33–39. En: Medi Ambient (ed.). Tecnologia i Cultura (21). Departament de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya.
- PIERCE F.J. Y SADLER E.J. (eds.). 1997. The state of site-specific management for agriculture. America Society of Agronomy, Crop Science Society of America y Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- PORTA J., LÓPEZ-ACEVEDO M. Y ROQUERO C. 1999. (2.ª ed.). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa.
- RAMOS C., AGUT A. Y LIDÓN A.L. 2002. Nitrate leaching in important crops of the valencian community region (Spain). *Environmental Pollution* 118, 215-223.
- REGLAMENTO de 28 de enero de 2002 del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen los principios y los requisitos generales de la legislación alimentaria, se crea la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria y se fijan

- procedimientos relativos a la seguridad alimentaria. Diario Oficial de la Unión Europea 178, de 01-02-2002, 1-31.
- REGLAMENTO de 29 de septiembre de 2003 del Consejo por el que se establecen disposiciones comunes aplicables a los regímenes de ayuda directa en el marco de la política agrícola común y se instauran determinados regímenes de ayuda a los agricultores. Diario Oficial de la Unión Europea, 270, de 21-10-2003, 1-69.
- REGLAMENTO de 23 de febrero de 2005 del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a los límites máximos de residuos de plaguicidas en alimentos y piensos de origen vegetal y animal. Diario Oficial de la Unión Europea 70, de 16-03-2005, 1-16.
- REGLAMENTO de 28 de junio de 2007 del Consejo sobre producción y etiquetado de los productos ecológicos y por el que se deroga el Reglamento (CEE) 2092/91. Diario Oficial de la Unión Europea 180, de 28-06-2007, 1-23.
- RUSCO, E., JONES R. Y BIDOGLIO G. 2001. Organic matter in the soils of Europe: present status and future trends. European Soil Bureau. Soil and Waste Institute for Environmental and Sustainability. Joint Research Centre. Ispra.
- STARKE L. (ed.). 2002. L'estat del món 2002. Informe del Worldwatch Institute sobre el progrés cap a una societat sostenible. Centre UNESCO de Catalunya. Barcelona.
- SAVORY A. 1988. Holistic resource management. Gilmour Publishing.
- URBANO P. 2002. Fitotecnica. Ingeniería de la producción vegetal. Mundi-Prensa.
- VANDERMEER J. 1989. The ecology of intercropping. Cambridge University Press.
- VILLALOBOS F.J., MATEOS L., ORGAZ F. Y FERERES E. 2002. Fitotecnica. Bases y tecnologías de la producción agrícola. Mundi-Prensa.
- VINK A.P.A. 1983. Landscape ecology and land use. Longman Group Limited.
- WIT DE C.T. 1992. Resource use efficiency in agriculture. *Agricultural Systems* 40, 125–151.

I.7. Indicadores de calidad del suelo

1. Introducción

El suelo es un recurso natural no renovable en la escala temporal humana. La pérdida de suelo asociada a determinadas técnicas de manejo inadecuadas puede ser irreversible, por lo que resulta necesario adoptar sistemas y modelos de producción sostenibles que ayuden a conservar el suelo.

Normalmente, el suelo (un medio altamente anisotrópico en profundidad) no se degrada uniformemente, sino que son las capas superficiales (las más fértiles) las primeras en perderse. Esto implica, entre otras cosas, que con la pérdida de suelo se pierde una de sus funciones principales, la de producir alimentos (Lal, 1999).

La mejora y conservación de la calidad del suelo (CS) es por tanto un aspecto clave en el manejo sostenible del suelo. El hecho de que el suelo sea un recurso natural heterogéneo, de modo que existe una gran variedad de tipos de suelo, dificulta la fijación de valores límite de degradación para sus propiedades. Igualmente, a diferencia del agua y el aire, el suelo no existe en estado «puro», por lo que es difícil proponer estándares de calidad universales (Sojka y Upchurch, 1999).

Sin embargo, en el control y seguimiento de la CS es necesario definir y fijar indicadores y umbrales de calidad. El único sistema lógico de evaluar la CS es hacerlo de manera específica para cada lugar (*site specific*), utilizando, eso sí, el desarrollo de una serie de criterios universales, que permitan obtener resultados validados y comparables.

Desde su inicio, el estudio de la CS ha estado ligado a los esfuerzos orientados a realizar una agricultura sostenible (Wander et ál., 2002). El estudio de la CS puede y debe ser empleado como una herramienta para evaluar sistemas de producción sostenibles que puedan actuar en armonía con el medio. Para evaluar el impacto de distintos sistemas de manejo agrícola en la CS, el seguimiento en el tiempo de los cambios en su estado es además fundamental.

Por lo tanto, el concepto de calidad del suelo debe interpretarse desde una doble óptica: por un lado es un concepto holístico, pero por otro, su aplicación es específica de cada lugar.

2. Calidad del suelo

La CS es un concepto que engloba la calidad física, química y biológica del suelo. Este concepto se empezó a emplear a principios de los años noventa en

respuesta al creciente interés en el manejo sostenible del suelo y poniendo de relieve que este requería algo más que el control de la erosión (Karlen et ál., 2003). Hasta ese momento aspectos químicos y biológicos del suelo se habían tratado sin considerar los aspectos físicos del mismo (Dexter, 2004). Antes de extenderse el empleo del término CS se empleaban conceptos como *soil tilth* o *soil workability*, que indicaban la capacidad de un suelo o la condición más adecuada para desempeñar una función determinada, pero no englobaban aspectos físicos, químicos y biológicos como lo hace el concepto de CS. Por lo tanto, el concepto de CS en sí no es nuevo, pero la manera de evaluarlo ha evolucionado (Porta et ál., 2005).

De hecho, la evaluación de tierras (*land evaluation*), ha venido realizándose oficialmente desde hace décadas, aunque la metodología y los criterios empleados difieren de los que conciernen los estudios de calidad del suelo, fundamentalmente en que la evaluación de tierras no considera los parámetros biológicos del suelo ni las diversas funciones de éste (De la Rosa, 2005). Normalmente los procesos de evaluación de tierras se han realizado con fines agrícolas o para estudios de degradación (es decir, sin considerar la multiplicidad de funciones del suelo). Además, la evaluación de tierras normalmente incluye parámetros edáficos y no edáficos (clima, vegetación) y se centra generalmente más en la «aptitud» de un suelo para producir que en su calidad como sistema. Sin embargo, los estudios de evaluación son enormemente útiles a la hora de definir zonas agro-climáticas (Arshad y Martin, 2002) homogéneas, un paso fundamental para estudiar la calidad del suelo, una de cuyas principales características es la variabilidad regional.

Desde su aparición en su acepción actual, el concepto de *calidad de suelo* también ha ido evolucionando en el tiempo. Hoy día se entiende por CS la capacidad de este para funcionar.

En un principio se definía la calidad de suelo en términos de fertilidad de suelo y de productividad; con el tiempo se han ido incluyendo otros aspectos, todos ellos relacionados con las funciones del suelo. Quizás lo que ha ido cambiando es el concepto *función del suelo*, o lo que se entiende por funciones del suelo.

Las funciones del suelo pueden ser diferentes y dependen del uso del mismo. Para un consumidor, la función principal puede ser la producción de alimentos saludables y accesibles (Shukla et ál., 2006), y para un conservacionista, su función primordial sería proteger los recursos existentes y contribuir a la protección del medio (como sumidero de C atmosférico, p. ej.). Desde un punto de vista agronómico, las principales funciones del suelo son: la capacidad de producir alimentos y fibras sin degradarse (p.ej., manteniéndose útil en el futuro),

la conservación del medio ambiente y la garantía de la salud humana. De esta manera, el estudio de la CS implica:

- Definir las funciones para las cuales se evalúa la CS.
- Determinar las propiedades del suelo indicadoras de la calidad (indicadores de calidad).
- Integrar los indicadores (que engloban aspectos físicos, químicos, biológicos, económicos y sociales) en índices de calidad cuantitativos y comparables.

2.1. Definición

Se han propuesto diferentes definiciones formales para la CS.

Larson y Pierce (1991) (cit. Bolindre et ál., 1999) se referían a la CS como el grado de excelencia en relación a un estándar o nivel de referencia.

Karlen (1997) define la CS: «la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua y sostener la salud humana y el hábitat». Esta es la definición adoptada por la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (ASSS). A menudo se emplea la definición resumida «capacidad de un suelo para funcionar».

Para Carter et ál. (1997), es «el grado de aptitud de un suelo para desempeñar una función determinada».

Las funciones del suelo para las que se quiere evaluar la CS se deben definir antes de comenzar el estudio de la misma, ya que la CS es específica de cada lugar y de las funciones que se quieran evaluar. Antes de evaluar la CS, hay que responder a preguntas como: ¿para qué? y ¿cómo? La objetividad en la evaluación debe ser el principio-guía básico al evaluar la CS, siendo como es el concepto de «calidad» un atributo fácilmente sujeto a la subjetividad del evaluador (Sojka y Upchurch, 1999).

Una idea de cómo la óptica con la que se debe enfocar el estudio de la calidad del suelo es, o debería ser, diferente en distintas regiones se deduce de la observación de cuáles son las principales causas de degradación del suelo en diferentes zonas del planeta (figura 1).

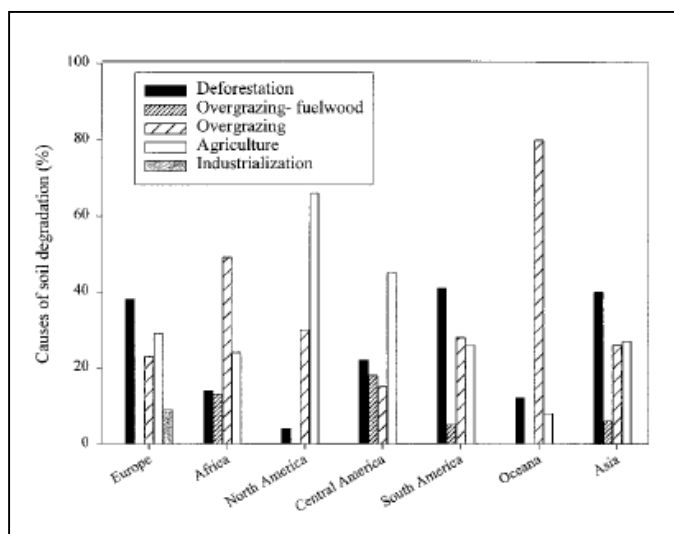


FIGURA 1. Causas de degradación del suelo en las diferentes regiones del mundo. Fuente: Wander et ál., 2002 (adaptado de Oldeman et ál., 1990)

2.2. Calidad intrínseca y calidad dinámica

La CS tiene dos componentes, uno que depende de las características inherentes al suelo (calidad intrínseca) y otro que varía en función del grado de conservación o degradación que presente el suelo (calidad dinámica).

Las características intrínsecas de un suelo dependen de los factores formadores del mismo: el material parental, el clima, la topografía, la vegetación y el tiempo, y se basa en las observaciones y determinaciones del perfil completo del suelo. Estas propiedades son poco o nada susceptibles a sufrir cambios debido al manejo, y definen la calidad intrínseca del suelo. Generalmente, están bien reflejadas en los diferentes sistemas de clasificación de los suelos (Wander et ál., 2002) y son las que se emplean a la hora de evaluar los posibles usos de un suelo.

En cambio, las propiedades más dinámicas (las más susceptibles de sufrir cambios debido al manejo del suelo), definen la calidad dinámica de este. Estas propiedades son, por ejemplo, el contenido y la calidad de la materia orgánica (MO) del suelo, el contenido en nutrientes, y los aspectos físicos que definen la estructura del suelo, así como la actividad biológica. Los parámetros del suelo que cuantifican estos aspectos dinámicos del mismo pueden servir como indicadores de calidad. El contenido en MO y sus fracciones (Gregorich et ál., 1994) son en muchas ocasiones seleccionados como indicadores de la calidad dinámica, como se explica más adelante.

2.3. Calidad y/o salud del suelo

Calidad y salud del suelo son conceptos equivalentes, aunque no siempre considerados sinónimos (Doran y Parkin, 1994). Harris y Bezdicek (1994) emplean simultáneamente estos dos conceptos y al referirse a la calidad del suelo nombran siempre los dos: la calidad/salud del suelo.

Por distinguir de alguna manera los términos calidad y salud se puede decir que: la *calidad* hace referencia a la calidad intrínseca del suelo, a su capacidad para desempeñar una serie de funciones debido a sus características específicas, y que *salud del suelo*, hace referencia a la calidad dinámica del suelo, que es la que va a sufrir cambios debido al uso y manejo.

A menudo cuando se hace referencia al estado del suelo o a cambios sufridos por el mismo debido a una determinada actividad se emplea el término *calidad* cuando quizás el término correcto es el de *salud* del suelo.

La salud del suelo puede variar, mejorar, empeorar, se puede remediar, en cambio la calidad es una característica del suelo que afecta a sus funciones, y que también puede afectar a la salud del suelo. La capacidad de un suelo para afrontar una serie de procesos de degradación y la respuesta frente a estos dependerá de su calidad intrínseca. La calidad del suelo y la evolución de su salud por lo tanto serán específicas de cada tipo de suelo (Karlen et ál., 2003).

En este capítulo se hace referencia a la evaluación de la calidad de suelos de uso agrícola, pero igualmente se podría realizar la evaluación de suelos con otros usos, aunque tal y como se ha mencionado anteriormente, los criterios o los indicadores elegidos cambiarían, debido a que la evaluación de la CS es específica de las funciones y tipo de manejo.

2.4. Evolución de la calidad/salud del suelo en el tiempo

En cualquier tipo de suelo su calidad puede mantenerse, degradarse o mejorar (Karlen et ál., 2003) y si ciertas prácticas agrícolas pueden favorecer la degradación del suelo, otras pueden contribuir a mantenerla o incluso mejorarla.

El estudio de la calidad/salud del suelo en el tiempo bajo diferentes sistemas de manejo permite seleccionar en cada caso las técnicas más apropiadas para mantener o mejorar la misma.

El sistema de manejo que contribuya a la mejora de la CS será específico de cada situación y también dependerá del estado inicial del suelo: no es lo mismo partir de un suelo en el que algunas propiedades se han visto degradadas o partir de una situación en equilibrio. Tal y como se ha comentado, el efecto que ciertas prácticas tengan sobre la CS dependerá del tipo y del grado de degradación del

suelo, y de lo que se considere la situación de referencia o punto de partida en la evaluación.

Cuanto mejor esté documentado el historial del suelo objeto de evaluación, la interpretación de los efectos que diferentes actuaciones han tenido en ese suelo se realizará de forma más correcta. Es importante tener en cuenta todos los aspectos que pueden afectar a las propiedades del suelo. Por ejemplo: un año con temperaturas superiores a la media o con precipitaciones por encima o por debajo de la media pueden afectar más al contenido de MO del suelo debido al efecto de las condiciones climáticas en la tasa de mineralización de la misma, que una práctica agrícola determinada (Wander et ál., 2002). Otro ejemplo: trabajos agrícolas realizados en condiciones de excesiva humedad pueden dañar más el suelo que las mismas prácticas realizadas en condiciones más adecuadas.

La actividad agraria, la puesta en cultivo de suelos vírgenes, o la intensificación de la agricultura suponen, en cualquier caso, una perturbación del suelo y una alteración de sus propiedades. El objetivo básico de estudiar la calidad del suelo agrícola es el de mantener la producción alterando lo menos posible la capacidad del suelo para funcionar.

Hay que llegar a un equilibrio entre alteración mínima de la calidad del suelo y la producción de alimentos de calidad de manera rentable.

La calidad dinámica, que es lo que se suele evaluar, se centra en el estudio del estado de los 200 ó 300 mm superficiales del suelo en relación al tipo de manejo, y se mide empelando varios indicadores químicos, físicos y biológicos, incluyendo algunas propiedades intrínsecas. La búsqueda de indicadores útiles a la hora de la evaluación de la CS es necesaria, y debe realizarse específicamente para cada situación, ya que el mismo indicador no reflejará igualmente los cambios producidos en el suelo en todas las situaciones.

3. Indicadores de calidad del suelo

Un indicador de calidad es una propiedad del suelo relacionada con alguna o varias funciones del mismo. Para que una propiedad pueda ser indicador de calidad debe ante todo ser sensible a cambios en el uso del suelo, a diferentes manejos del mismo y a cambios climáticos y antropogénicos (Shukla et ál., 2006). Además, debe ser fácil de medir, reproducible, fácil de entender, debe integrar aspectos físicos, químicos y biológicos, y a poder ser, debe formar parte de las bases de datos ya existentes. Este último aspecto es importante y a la vez difícil de conseguir. Por un lado, porque normalmente no hay bases de datos de suelos, y, en los casos en los que los hay, los parámetros medidos no son muchos y a menudo la metodología empleada no ha sido la correcta. Por otro lado, en los

últimos años se han publicado listas de indicadores que incluyen parámetros poco habituales en los estudios tradicionales de suelos. Esto ocurre con los parámetros biológicos (actividades biológicas, DNA del suelo, actividades enzimáticas, etc.), de los que generalmente no hay series de datos lo suficientemente amplias como para poder interpretar su comportamiento en diferentes situaciones. Este último aspecto es importante ya que como se verá más adelante, es necesario disponer de series de datos largas para la correcta interpretación de los indicadores.

En el largo plazo, sería interesante poder contar con observatorios de la CS, con el mismo objetivo con el que se idearon las estaciones meteorológicas. Estos observatorios proporcionarían información general acerca de la evolución de ciertas propiedades al margen de su uso, complementando así los datos e información recogida en las parcelas de estudio. Algunas iniciativas recientes (Wander et ál., 2002) han propuesto con éxito la creación de equipos multidisciplinares de trabajo, a fin de monitorizar la evolución de la calidad del suelo a nivel más o menos regional (p.ej., a nivel de estado en EE.UU.). Estos equipos están formados por agricultores, técnicos, conservacionistas, investigadores y expertos.

Los indicadores deben ser además precoces, es decir, sensibles al cambio en la CS a corto plazo. En este trabajo se ha mencionado la importancia de la existencia de ensayos de larga duración que permitan estudiar el efecto a largo plazo de los distintos sistemas de manejo del suelo, pero en la práctica los proyectos no son lo suficientemente largos como para que se puedan observar cambios en todas las propiedades de suelo, de ahí la importancia de que los indicadores sean precoces. Para Arshad y Martin (2002), ensayos de larga duración de entre 10-30 años son necesarios para determinar los efectos positivos y negativos que un determinado uso del suelo tiene en los indicadores de calidad.

4. Conjunto mínimo de datos

Para la evaluación de la CS es necesario tener un conjunto mínimo de datos (CMD) formado por un número de indicadores que integren aspectos físicos, químicos y biológicos del suelo. En función de los aspectos del suelo que se quieran evaluar este CMD estará formado por unos parámetros u otros. Por lo tanto el CMD será también específico de cada situación. La evaluación de la calidad del suelo a través de un único indicador nos podría llevar a conclusiones erróneas, y se ha observado reiteradamente que un conjunto de datos es siempre más potente como descriptor del sistema suelo que la medida de propiedades individuales (Wander et ál., 2002).

Sin embargo, incluir en un índice todos los parámetros medibles del suelo es inviable; por lo tanto, el CMD debe estar formado por un número abordable de indicadores. Más importante que el número de indicadores que lo constituyen es que el CMD sea equilibrado, lo que significa que debe incluir, tal y como se ha mencionado varias veces, indicadores físicos, biológicos y químicos del suelo.

Se han desarrollado varios métodos de selección de los indicadores que deben formar parte del CMD. Los más importantes están resumidos más adelante.

5. Evaluación de la calidad del suelo

Antes de comenzar a estudiar o evaluar la calidad de un suelo se deben fijar las funciones para las que se quiere evaluar su calidad. Un suelo destinado a un uso agrícola va a necesitar una estructura adecuada que permita la infiltración y acumulación de agua, el desarrollo radicular, la actividad de la macro y microfauna, con capacidad de suministrar los nutrientes necesarios para el desarrollo vegetal, y que presente resistencia a los procesos degradantes tales como la erosión, etc. Por lo tanto, serán estas las funciones que habrá que estudiar, y se deberá conocer cuáles son los parámetros que reflejan la capacidad de un suelo para desempeñar esas funciones.

La evaluación de la CS requiere del conocimiento profundo de las propiedades del suelo, de cómo medirlas correctamente, de cómo interpretarlas, y de cómo cambian y varían en el tiempo y cómo les afecta el tipo de manejo que se estudia. Para Karlen et ál (1997), la CS además de un fin es una herramienta de trabajo y estos autores proponen un marco de trabajo para la evaluación y seguimiento de la CS que consiste en la elección, interpretación e integración de los indicadores de calidad (figura 2). Para poder evaluar la calidad del suelo es necesario un conocimiento profundo acerca de los aspectos y propiedades del suelo que afectan al funcionamiento del mismo.

Por lo tanto, el estudio de la calidad del suelo no consiste únicamente en la medida y control de una serie de parámetros, resulta necesario conocer el funcionamiento del agrosistema.

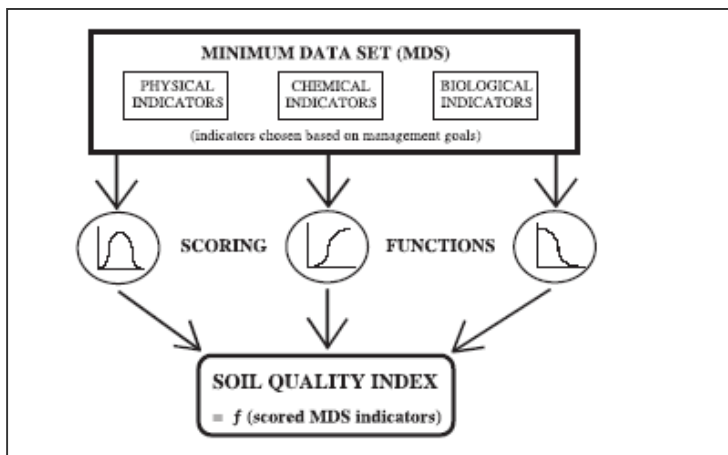


FIGURA 2. Modelo conceptual de conversión de los indicadores en un índice de calidad. Se resumen las tres etapas de la evaluación de la calidad del suelo propuesta por Karlen et ál. (1997), que son la elección de indicadores, la interpretación (valor óptimo, más es mejor, o menos es mejor) y la integración en un índice de calidad (Karlen et ál, 2003)

5.1. Elección de los indicadores

Para formar parte del CMD se deben escoger los indicadores más adecuados siguiendo el criterio de elección anteriormente mencionado: deben ser fáciles de medir, reproducibles y que muestren buena correlación con otros indicadores. Estudios más recientes (Yemefack et ál., 2006) proponen la aplicación de «filtros» adicionales para seleccionar los indicadores de CS. Los citados autores «exigen» a sus indicadores, para ser seleccionados, (i) explicar la mayor cantidad de varianza posible del conjunto de datos inicial, (ii) presentar una significación importante en el análisis de la varianza frente a un cambio de manejo, (iii) tener un tiempo rápido de respuesta a cambios en el manejo o el sistema agrícola, y un tiempo largo de «recuperación» una vez que la causa de la alteración cesa, (iv) ser barato de muestrear y medir y (v) no ser redundante, es decir, no presentar correlación con ningún otro de los indicadores seleccionados.

Este enfoque es sin duda mucho más «global», y por tanto, mucho más susceptible de poder aplicarse en muchas zonas agrícolas del mundo en la búsqueda de índices de calidad del suelo.

La metodología que se vaya a emplear deberá ser una metodología contrastada y recogida en algún documento, para que los datos que se obtengan sean válidos y comparables con los obtenidos en otros estudios.

5.2. Interpretación de los indicadores

La interpretación de los indicadores consiste en relacionar cada indicador con la calidad del suelo, para lo que Karlen y Stott (1994) sugieren emplear funciones que pueden ser del tipo «más es mejor», «valor óptimo» o «menos es mejor». Esto se realiza mediante la elaboración de «curvas de evaluación» de los indicadores (*scoring curves*). Este es un proceso que implica la generación de curvas y la identificación de los algoritmos que mejor definan la relación entre el indicador y la función del suelo que se quiere evaluar (Andrews et ál., 2002; Andrews et ál., 2004). Debe asignarse a cada indicador un tipo de función, y un mismo indicador puede adoptar una función diferente en función del objetivo del trabajo.

Aunque la mayoría de los indicadores tienen en realidad un valor óptimo teórico, pueden describirse curvas de diferentes tipos dentro de las condiciones normales de manejo de cada suelo. Por ejemplo, Andrews et ál. (2002), muestran las funciones construidas para algunos indicadores. A la materia orgánica (MO) del suelo le asigna una función del tipo «más es mejor», a la densidad aparente (Da) la de «menos es mejor», y al pH la de «valor óptimo» (ver figura 3). La finalidad es poder puntuar los valores de cada indicador con valores que vayan del 0 al 1, ó del 0 al 10, de manera que se conviertan en valores adimensionales que se pueden integrar en un índice de calidad. Esto permite combinar indicadores biológicos, químicos y físicos con unidades de medida diferentes. Aunque el tipo de función que adopta cada indicador sea algo extrapolable a diferentes condiciones, los umbrales, los valores óptimos para cada indicador son específicos de cada lugar (ejemplo: 5% de MO es un valor aceptable en muchas condiciones, pero en otras puede ser un valor inalcanzable). Por lo tanto, trabajos y estudios realizados en condiciones diferentes pueden ser útiles, pero siempre se deberán adaptar a las condiciones específicas de trabajo.

Una crítica evidente a este sistema recae en la dificultad (a veces imposibilidad) de realizar correctamente la valoración de los indicadores (Sojka y Upchurch, 1999). Es posible que un mismo indicador no «encaje» en una única función de evaluación de tipo (más es mejor, más es peor; o valor óptimo), incluso si se considera una única función del suelo. La complejidad del sistema hace que además muchas veces, las funciones de «evaluación» de los indicadores se «adaptan» de otros trabajos de investigación, lo que contradice el espíritu de este sistema (la dependencia del análisis respecto al lugar en que se realiza) de evaluación de la CS.

Esto no quiere decir que el sistema no sea válido, sino que su complejidad debe tenerse en cuenta en todo momento, intentando evitar simplificaciones generalistas y/o interpretaciones subjetivas del valor de los indicadores.

5.3. Integración de los indicadores

El último paso en la evaluación de la CS consiste en la integración de los indicadores en un índice de calidad. Su cuantificación debe hacerse tanto en el tiempo como en el espacio, a fin de monitorizar correctamente la CS y su evolución.

Los índices de calidad son el resultado de fórmulas matemáticas que integran todos o varios de los parámetros seleccionados como indicadores. Este tipo de índices puede obtenerse de varias maneras:

A partir del análisis estadístico de los datos, bien utilizando los componentes de un análisis factorial como índices de calidad (Wander y Bollero, 1999), bien seleccionando los indicadores con mayor peso en cada componente (Shukla et ál., 2006).

Andrews et ál. (2002) proponen un sistema «mixto» en el que cada variable seleccionada es primero evaluada individualmente (ver más adelante lo referente a las *scoring curves*), y después «ponderada» según el % relativo de varianza¹⁵ explicado por el factor en el que quedó incluida en análisis de componentes principales. La suma ponderada de los valores obtenidos por cada variable evaluada individualmente (de 0 a 1), constituye su índice de calidad del suelo. A cada indicador hay que darle un peso en la función, aspecto también específico de cada situación.

A partir de las llamadas ecuaciones de edafotransferencia, que combinan propiedades relacionadas entre sí para «deducir» unas propiedades de otras, y/o integrar varias propiedades relacionadas.

El sistema propuesto por Yemefack et ál. (2006) prescinde de este tipo de índices, y se limita a estudiar la evolución en el tiempo y el espacio de sus indicadores, a los que «asigna» una representatividad general (p.ej., el pH «contribuye a definir» las propiedades biológicas del suelo y los umbrales de disponibilidad de nutrientes, la Da «influencia» la porosidad y la infiltración, contribuyendo al potencial de lavado y erosión, etc.).

Finalmente, pueden desarrollarse curvas de evaluación de los índices de calidad, siguiendo un proceso similar al utilizado para realizar las de los indicadores que los componen.

¹⁵ El % de varianza explicado por el factor en que se incluyó la variable en relación al % de varianza explicado por todos los factores seleccionados en el análisis de componentes principales (i.e., todos los que tienen autovalor >1).

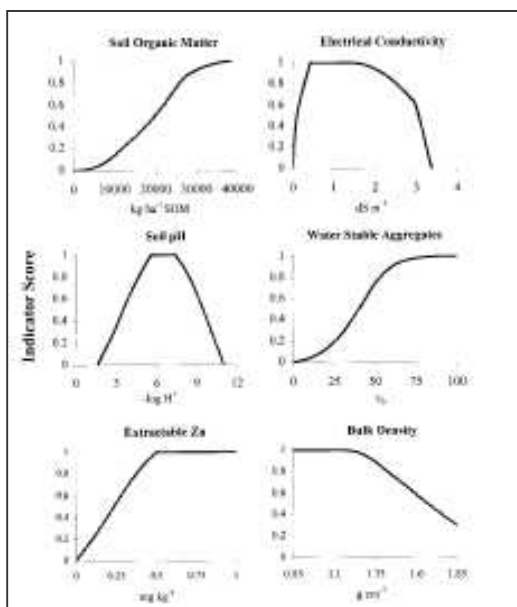


FIGURA 3. Interpretación de los indicadores de calidad realiza por los autores Andrews et ál. (2002)

6. Distintas escalas en la evaluación de la calidad del suelo

La evaluación de la calidad del suelo se debe realizar en diferentes escalas.

Por un lado se encuentra el trabajo a escala experimental: a este nivel la información que se obtiene es necesaria y fundamental para la elección de indicadores y el desarrollo de índices. Las consideraciones tenidas en cuenta hasta ahora se refieren a la evaluación de la CS a nivel experimental y los índices se pueden emplear para valorar la CS a escalas mayores.

Cuando la CS se quiere evaluar en zonas más extensas o en una región entera, hay que plantear una estrategia de muestreo y recogida de datos seleccionando zonas similares y adaptando el CMD y los índices de calidad a las distintas situaciones que se pueden encontrar (Arshad y Martin, 2002). Además de una cantidad importante de datos, es necesario que estos sean de calidad, para lo que la época de muestreo, el manejo y almacenamiento de las muestras, la metodología y los análisis estadísticos deben estar bien definidos (ver caso práctico).

Existen numerosos trabajos que siguen el modelo propuesto por Andrews et ál. (2002 y 2004), y que realizan la valoración de la CS a escala de explotación

agrícola, empleando los índices de calidad desarrollados por ellos mismos a escala experimental. Este sistema es relativamente flexible, puesto que permite considerar diferentes funciones del suelo (productividad, reciclaje de residuos o protección ambiental), aunque no varias funciones simultáneamente (Sojka y Upchurch, 1999).

Para mejorar la CS de los suelos de uso agrícola se debe plantear una estrategia a diferentes escalas, y los resultados de la investigación se deben trasladar a escalas mayores contando con la participación de todos los agentes afectados, es decir, trasladar la ciencia a la práctica (Doran, 2002; Wander et ál., 2002). No debe olvidarse que la finalidad última del estudio de la CS es el desarrollo de técnicas de manejo del suelo sostenibles desde todos los puntos de vista (ambiental, económico, social, etc.). En este sentido, es importante considerar las limitaciones que el estudio únicamente científico de la CS conlleva. Es necesario considerar los siguientes puntos (Herrick, 2000) si se quiere alcanzar un uso óptimo de los estudios de CS:

- Demostrar relaciones de causalidad entre la CS y el funcionamiento de los ecosistemas.
- Obtener indicadores de la CS con poder de predicción de la respuesta del suelo a la degradación.
- Elaborar sistemas de monitorización de la CS accesibles a los agentes reales del manejo del suelo (*land managers*).
- Integrar la CS con otros indicadores socio-económicos.
- Integrar el estudio de la CS en un contexto general de “calidad del sistema” (*landscape*).

Más adelante se plantea un caso práctico (caso 4.1.), en el que se describen los primeros pasos de la evaluación de la calidad del suelo. Los primeros pasos son los más importantes ya que normalmente no se puede retroceder y corregir los posibles errores. La recogida de muestras, elección de los parámetros y realización de las determinaciones no se pueden repetir. Hay que idear bien estas etapas para poder seleccionar un CMD de calidad que permita una correcta evaluación de la CS.

7.- Bibliografía

- ANDREWS, S.S., KARLEN, D.A., CAMBARDELLA, C.A. 2004. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. Soil Science Society of America Journal 68: 1945-1962.
- ANDREWS, S.S., MITCHELL, J.P., MANCINELLI, R., KARLEN, D.L., HARTZ, T.K., HORWATH, W.R., PETTYGROVE, G.S., SCOW, K.M., MUNK, D.S. 2002. On-

- farm assessment of soil quality in California's central valley. *Agronomy Journal* 94 (1): 12-23.
- ARSHAD, M.A. MARTIN, S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88: 153-160.
- BOLINDER, M.A., ANGERS, D.A., GREGORICH, E.G., CARTER, M.R. 1999. The response of soil quality indicators to conservation management. *Canadian Journal of soil science* 79: 37-45.
- DE LA ROSA, D. 2005. Soil quality evaluation and monitoring based on land evaluation. *Land Degradation and Development* 16:551-559.
- DORAN, J.W. 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88: 119-127.
- DORAN, J.W., PARKIN, T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. In: *Defining soil quality for a sustainable environment*. (Ed.) Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. Soil Science Society of America special publication n° 35. 3-23.
- GOVAERTS, B., SAYRE, K.D., DECKERS, J. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research* 87 (2): 163-174.
- GREGORICH, E.G., CARTER, M.R., ANGERS, D.A., MONREAL, C.M., ELLERT, B.H. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science* 74, 367-385.
- HARRIS, R.F., BEZDICEK, D.F. 1994. Descriptive aspects of soil quality/health. In: *Defining soil quality for a sustainable environment*. (Ed.) Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. Soil Science Society of America special publication n.º 35. 23-53.
- HERRICK, J.E., 2000. Soil quality: an indicator of sustainable land management. *Applied Soil Ecology* 15: 75-83.
- KARLEN, D.L., DITZLER, C.A. ANDREWS, S.S. 2003. Soil quality: why and how? *Geoderma* 114: 145-156.
- KARLEN, D.L., MAUSBACH, M.J., DORAN, J.W., CLINE, R.G., HARRIS, R.F., SCHUMAN, G.E. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of American Journal* 61. 4-10.
- KARLEN, D.L., STOTT, D.E., 1994. A framework for evaluating physical and chemical soil quality. In: *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA special publication number 35. Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A.
- LAL, R. 1999. Soil quality and food safety. The global perspective. In: *Soil Quality and soil erosion*.
- SHUKLA, M.K., LAL, R., EBINGER, M. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research* 87 (2): 194-204.
- SOJKA, R.E., UPCHURCH, D.R. 1999. Reservations regarding the soil quality concept. *Soil Science Society of America Journal* 63 (5): 1039-1045.
- WANDER, M.M., BOLLERO, G. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Science Society of America Journal* 63: 961-971.

- WANDER, M.M., WALTER, G.L., NISSEN, T.M., BOLLERO, G.A., ANDREWS, S.S., CAVANAUGH-GRANT, D.A. 2002. Soil quality: Science and Progress. *Agronomy Journal* 94: 23-32.
- YEMEFACK, M., JETTEN, V.G., ROSSITER, D.G. 2006. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems. *Soil and Tillage Research* 86 (1): 84-98.

1.8. Nuevas tecnologías de la información en la obtención de datos del territorio

A lo largo de la segunda mitad del siglo XX se produjeron importantes innovaciones en el estudio del territorio, apoyadas en el abaratamiento y accesibilidad de los medios informáticos. A todo ese conjunto de innovaciones se le suele seguir llamando nuevas tecnologías de la información y la comunicación. La sociedad las ha adoptado con rapidez y siente una gran atracción por ellas. Cada vez se dispone de más información y cada vez se demanda más, de ahí que esas tecnologías se estén aplicando en gran cantidad de disciplinas. Estas nuevas tecnologías de la información han supuesto una verdadera revolución en la forma de adquirir, manejar, analizar y diseminar la información, posibilitando el análisis integrado de la misma. Su aplicación permite captar información de calidad de forma rápida y eficiente.

En los estudios territoriales y materias relacionadas con el territorio, la disponibilidad de información espacial localizada es imprescindible. La complejidad del territorio, el carácter multidisciplinar, la variedad y diversidad de la información en cuanto a procedencia, formatos, actualización, escala, etc., hace cada vez más necesaria la incorporación de estas nuevas tecnologías de la información en estudios ligados al territorio y su gestión.

Se expone en este capítulo una breve historia de tres nuevas tecnologías de la información relevantes en la obtención de información territorial: los sistemas de posicionamiento global (GPS), la teledetección, y los sistemas de información geográfica (SIG). Algunos aspectos relacionados con el argumento del libro -el suelo- de gran utilidad en la planificación y gestión territorial, como el conocimiento de su distribución en el territorio, o la variación espacio-temporal de sus propiedades, se están abordando actualmente utilizando estas nuevas tecnologías. Por eso, se presentan también en este capítulo algunas aplicaciones en el estudio de los suelos.

La teledetección y los SIG poseen una clara orientación territorial; tienen requisitos similares, tanto de *hardware* como de *software*; se desarrollan por y para el mismo tipo de profesionales y responden a demandas de investigación similares (Chuvieco, 2006). Ambas técnicas se complementan y se utilizan, junto con los GPS, en numerosos estudios, ya que tanto la teledetección como los GPS son fuentes valiosas de información para un SIG. Su utilización conjunta permite disponer, manejar y procesar una gran cantidad de datos sobre el territorio, accesibles en ocasiones en tiempo real.

1. Los sistemas de posicionamiento global

Desde siempre el hombre ha tenido la necesidad de orientarse y conocer dónde está para no perderse, por ello a lo largo de la historia se han ido ideando diferentes sistemas e instrumentos de localización y orientación: la colocación de piedras o hacer marcas, la posición del Sol y las estrellas, la brújula, el astrolabio, los mapas y cartas de navegación, el sextante, etc.

En siglo XX, el desarrollo y lanzamiento de satélites artificiales y la aparición de los ordenadores supuso una verdadera revolución en los sistemas de posicionamiento. Un receptor en distintos lugares de la superficie terrestre podía ser localizado conforme el satélite iba variando su posición. Esto supuso el inicio de la tecnología GPS.

Los GPS (Global Positioning System - Sistemas de Posicionamiento Global) son sistemas de geoposicionamiento por satélite cuyo objetivo es conocer geográficamente en qué lugar se encuentra un objeto determinado. Surgen de la necesidad de determinar una posición absoluta y exacta, y tienen su origen en la década de los sesenta. En estos años, por intereses militares, se empieza a investigar la posibilidad de utilizar una nueva tecnología de navegación basada en satélites artificiales geoestacionarios. Finalmente, en 1974, surge en EE.UU. el sistema NAVSTARS-GPS (Navigation Satellite Timing And Ranging: Satélite de Navegación, Cronometría y Distanciometría), concebido inicialmente como un sistema militar estratégico pero abierto posteriormente a los usuarios civiles. Suele hacerse referencia a este sistema con las siglas GPS, siglas que, a su vez, se han adoptado para referirse en general a los sistemas de posicionamiento global y concretamente a los aparatos receptores.

Paralelamente, a principio de la década de los ochenta se desarrolló la constelación rusa de satélites GLONASS (Global Orbiting Navigation Satellite System) cuyas características, fines y capacidades son muy similares a los del sistema estadounidense. En Europa, a iniciativa de la Comisión Europea y de la Agencia Espacial Europea, y con objeto de evitar la dependencia del NAVSTARS-GPS y GLONASS, se decide poner en marcha un sistema global de navegación por satélite de uso civil denominado GALILEO. En diciembre de 2005, se lanzó el satélite GIOVE-A (Galileo in-orbit validation element), primero de este sistema europeo de localización por satélite. Se ha logrado que el Galileo sea operativo con la señal abierta emitida por el sistema estadounidense GPS y se tiene previsto que esté disponible en 2010. Mientras, y para mejorar la precisión de las localizaciones con GPS, entró en funcionamiento en abril de 2004 el sistema EGNOS (The European Geostationary Navigation Overlay Service).

Más información sobre estos sistemas puede encontrarse, por ejemplo, a través de la página Web de la Agencia Espacial Europea (<http://www.esa.int>).

1.1. Aplicaciones

Las aplicaciones de los GPS son muchas y variadas, destacando las relacionadas con los sistemas de navegación y las cartográficas (topografía, cartografía, geodesia, etc.). Actualmente los GPS se han implantado en nuestra sociedad siendo elementos de uso cotidiano no solo en actividades militares, sino también en actividades civiles: navegación marítima, ubicación de vehículos, excursiones, control de maquinaria, protección civil, agricultura de precisión, trabajos de campo, aplicaciones científicas, etc.

Los GPS han supuesto un importante apoyo en trabajos de campo, concretamente en la adquisición de datos y en la elaboración de cartografía. Un claro ejemplo se encuentra en agricultura. La integración de los GPS en la maquinaria agrícola ha supuesto importantes avances, al permitir entre otros el guiado automático de maquinaria y el desarrollo de la agricultura de precisión. La aplicación variable de siembra y fertilización, así como la obtención de mapas de rendimiento durante la cosecha también es posible con esta tecnología. Por otro lado, los datos recopilados con GPS pueden relacionarse con bases de datos territoriales permitiendo conocer, además de la posición, las características del medio sobre el que se va a actuar.

En lo relativo a los suelos, los GPS han abierto nuevas vías para su prospección precisa, permitiendo integrar la información recopilada en campo en los SIG y abriendo la posibilidad de cruzarla con otra información espacial del territorio. La caracterización de la variabilidad espacio-temporal del suelo a escala de parcela y de paisaje ha mejorado gracias a estas tecnologías innovadoras.

El sensor electromagnético móvil georreferenciado (SEMG) es un ejemplo de integración del GPS con aparatos de medidas en campo relacionadas con el suelo. La aparición de los sensores electromagnéticos (SEM) supuso una importante mejora en la cartografía de áreas afectadas por salinidad al evitar o reducir los muestreos de suelo (Rhoades et ál., 1999; Herrero et ál., 2003; Corwin y Lesch, 2004). Asimismo, se han utilizado para estimar la eficiencia del riego, drenaje y lavado de sales, la densidad aparente del suelo y caracterizar litosecuencias (Corwin et ál., 1995; Rhoades et ál., 1997; Triantafilis y McBratney, 1998; Triantafilis et al., 2003; Brevik y Fenton, 2004; Doolittle et ál. 2005).

El siguiente paso fue acoplar al SEM un GPS y un vehículo o sistema motorizado para poder así obtener lecturas georreferenciadas que se almacenan automáticamente en sistemas de adquisición de datos y que pueden

posteriormente tratarse fácilmente. Se agiliza y simplifica así notablemente la toma de medidas. En EE.UU. se desarrolló inicialmente un SEMG pero resultaba sofisticado y de elevado coste. Actualmente, se están buscando alternativas más sencillas y económicas. Un ejemplo es el SEMG del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón en España para uso tanto en grandes áreas tipo una cuenca o regadío como en pequeñas superficies o parcelas (Aragüés y Urdanoz, 2006).

Las lecturas obtenidas con este aparato pueden incorporarse a los ya mencionados SIG con los que se pueden tratar los datos georreferenciados y elaborar cartografía digital (Burroughs y McDonell, 2000). La utilización de SIG, junto con otros tipos de *software* específicos que facilitan y aceleran el post-procesamiento de los datos tales como el paquete informático ESAP (Lesch et ál., 2000) representan una revolución frente a los métodos tradicionales de tratamiento de estos datos.

2. La teledetección

No existe una definición única de la teledetección como lo muestra la variedad de ellas que puede encontrarse en la bibliografía (Campbell, 2002). En un sentido amplio, se entiende por teledetección cualquier medio de observación remota o de captura de información acerca de un objeto sin contacto entre el observador y el objeto observado, y el conjunto de técnicas y conocimientos necesarios para interpretar dicha información. Los aspectos que habitualmente recogen las definiciones de teledetección son la adquisición de radiación electromagnética a distancia a través de sensores localizados en plataformas móviles, sin que exista contacto material con el objeto observado, y la transformación de los datos obtenidos mediante técnicas de interpretación y reconocimiento de superficies (Sobrino, 2000).

Hay que tener en cuenta que el término teledetección o percepción remota (*remote sensing* en inglés y *télédétection* en francés) suele utilizarse en muchas ocasiones para referirse a la denominada teledetección espacial, es decir, a la captura de información de la Tierra desde sensores a bordo de plataformas espaciales.

Aunque en el siglo XIX ya se tomaron las primeras fotografías aéreas, no es hasta principios del siglo XX cuando se consiguieron estas desde avión. Es a partir de entonces cuando surge la teledetección aérea. Su desarrollo estuvo ligado a los avances en fotografía (óptica, emulsiones, cámaras) y a las aplicaciones con fines militares en la I y II Guerra Mundial (Sobrino, 2000; Campbell, 2002; Chuvieco, 2006). Sin embargo, fue con el inicio de la era espacial y el lanzamiento de los primeros satélites artificiales cuando surgió la teledetección

espacial y se empezó a disponer de forma continua y masiva de imágenes de la superficie terrestre. A los satélites meteorológicos de la serie TIROS, rebautizados NOAA desde 1979, desarrollados en la década de los sesenta por la NASA (Nacional Aeronautics and Space Administration), les siguieron en los setenta los satélites de recursos naturales de la serie Landsat (inicialmente denominado ERTS), serie que ha permanecido operativa hasta nuestros días.

A partir de entonces, diferentes agencias espaciales han desarrollado sus proyectos espaciales, como el satélite franco-belga SPOT, el indio IRS, los japoneses MOS, JERS y RADARSAT, el europeo ERS y los Rusos Soyuz y Salut (Sobrino, 2000; Chuvieco, 2006).

Actualmente, hay gran variedad de sensores y misiones espaciales, existiendo una tendencia al aumento de la resolución espacial y espectral. Los nuevos satélites comerciales como Ikonos o QuickBird, así como los sensores aeroportados, son un claro ejemplo de ello.

Los conceptos básicos de teledetección así como las técnicas para extraer información de las imágenes y de los datos provenientes de teledetección son múltiples y variadas estando descritas en diferentes manuales y libros (Belward y Valenzuela, 1991; Sobrino, 2000; Campbell, 2002; Chuvieco, 2006 Lillesand y Kiefer, 2003). Cada estudio específico requiere técnicas de teledetección específicas. Existe asimismo una variada oferta de programas informáticos para el análisis digital de imágenes. Algunos de los programas comerciales más conocidos son: *Envi*, *ERDAS*, *ERMapper*, *eCognition*, *Ilwis*, *Idris* y *PCI*, destacando, entre los de dominio público, *GRASS* y *Multispec*.

2.1. Aplicaciones

Los avances en teledetección han ido ligados al desarrollo de los sensores y de la informática, aumentando progresivamente tanto los usuarios como los campos de aplicación: meteorología, climatología, oceanografía, geografía, geología, hidrología, biología, agricultura, recursos forestales, gestión ambiental, urbanismo, cartografía, topografía, comunicación, prevención, etc.

Frente a otros medios de observación de la tierra, como la fotografía aérea o el trabajo de campo, la teledetección espacial proporciona una cobertura global, exhaustiva, sinóptica y repetitiva de la superficie terrestre; una gran homogeneidad en la toma de datos; la posibilidad de obtenerlos en regiones no visibles del espectro; y la disponibilidad de los mismos en formato digital (Sobrino, 2000; Chuvieco 2006). Ello permite tener frecuentemente datos actualizados de la superficie terrestre que son de gran utilidad en diferentes disciplinas.

La primera aplicación desarrollada con los satélites de recursos naturales fue la cartografía temática, concretamente de cultivos y usos del suelo. Desde entonces se han multiplicado las aplicaciones relacionadas con el suelo: identificación, inventario y cartografía de suelos, obtención de información relativa a la composición de las rocas y minerales de la superficie terrestre, extracción de información geológica como litología, estructura, patrones de drenaje y geomorfología, estudios de erosión y degradación del suelo, etc. (Mulders, 1987; Evans, 1990; Jensen, 2000).

La caracterización de las propiedades del suelo fue una de las primeras aplicaciones de la teledetección. Algunas propiedades del suelo como textura, contenido en materia orgánica, nivel de fertilización, humedad y salinidad, están directamente relacionadas con la respuesta espectral del mismo o pueden inferirse a partir de la respuesta de las cubiertas vegetales (Barnes et ál. 2003). Los trabajos de laboratorio han permitido determinar las características espectrales del suelo y establecer relaciones entre la reflectancia del mismo y sus propiedades químicas y físicas (Ben-Dor, 2002).

Sin embargo, debe tenerse siempre presente que el suelo es un objeto tridimensional de características complejas no siempre manifiestas en su superficie. Esto es un limitante en la aplicación de la teledetección espacial, ya que la mayoría de los sensores de los satélites de recursos naturales solo capturan información de la superficie. Otro factor limitante es la cubierta vegetal que en muchas ocasiones impide ver el suelo. En estos casos, las propiedades y características del suelo solo pueden detectarse indirectamente a través del efecto que producen en la cubierta vegetal. La utilización de sensores radar activos, que captan información en la región de las microondas y pueden penetrar unos centímetros en las superficies sobre las que inciden, puede ser una alternativa, si bien debe tenerse en cuenta que estos sensores están influenciados por la humedad y la rugosidad de la cubierta sobre la que incide su señal.

Así pues, las características intrínsecas del suelo son directamente detectables en suelos desnudos, siempre que puedan asociarse a un comportamiento espectral. Materia orgánica, caliza, hierro, pedregosidad superficial, color del suelo, rugosidad, humedad o salinidad se encuentran entre las características que clásicamente se citan como directamente detectables. La reserva hídrica, la morfología, la parcelación y la ocupación del suelo son algunos de los rasgos no siempre detectables y que pueden tener relación con las propiedades del suelo.

Por último, se debe recordar que la teledetección es una fuente inestimable de datos del territorio y que estos datos pueden integrarse con relativa facilidad en un SIG, incrementándose así su utilidad.

3. Los sistemas de información geográfica

Al igual que ocurre con teledetección, las definiciones de sistema de información geográfica (SIG, o GIS-Geographical Information System, en inglés) son múltiples y diversas (Gutiérrez y Could, 1994). Las hay que se fundan en la importancia de los SIG como Sistemas de Apoyo a la Decisión, otras en sus funcionalidades, y otras en su extensión de las bases de datos, pero todas ellas recogen el hecho de que los SIG trabajan con datos espaciales referenciados. Así, para algunos, los SIG son un tipo especializado de base de datos informatizada que contiene información espacial, mientras que para otros, son una tecnología informática para gestionar y analizar información espacial. Una definición amplia que engloba todos los aspectos que conciernen a los SIG es la dada por Burrough y McDonnell (1986), para quienes los SIG son «un conjunto de herramientas para captura, almacenamiento, selección, manipulación, análisis, visualización y cartografía de datos espaciales sobre el mundo real para la consecución de unos objetivos particulares».

Podemos decir, por tanto, que los SIG son una herramienta de análisis de información que permiten su almacenamiento espacial de forma coherente y eficiente, facilitando su actualización, manipulación y acceso directo al usuario; y que no son un programa de ordenador para hacer y almacenar mapas como algunos creen.

Actualmente, el término SIG hace referencia a sistemas de información informatizados. La principal diferencia de los SIG con otros sistemas informáticos de gestión de información (programas de cartografía asistida por ordenador y de diseño gráfico como los CAD, de gestión de bases de datos, de tratamiento de imágenes, de análisis estadístico, etc.) es su capacidad de análisis espacial de datos georreferenciadas. Los SIG combinan cartografía y bases de datos, asociándolas, relacionándolas y describiendo las relaciones espaciales entre entidades contiguas o adyacentes (topología). Existe gran variedad de bibliografía sobre los SIG en la que puede encontrarse información sobre sus componentes, funciones, aplicaciones, etc. (Aronoff, 1989; Star y Estes, 1990; Belward y Valenzuela, 1991; Gutiérrez y Could, 1994; Bosque, 1997; Burrough y McDonell, 1998; Peña, 2006).

Los SIG responden a la necesidad de almacenar, actualizar, visualizar, cuantificar y analizar espacialmente gran cantidad de datos relativos al territorio. Surgen en la década de los sesenta y se consolidan en los setenta y ochenta. Su historia es reciente y difícil de establecer según algunos autores. El primer ejemplo de SIG informatizado fue el Sistema de Información Geográfica de Canadá (CGIS) creado en 1964 y financiado por el Departamento de Agricultura.

En esta primera etapa se desarrollaron o implementaron en el sector público SIG muy específicos cuya finalidad principal era el inventario de recursos, especialmente de usos del suelo, y cuyas capacidades analíticas eran escasas (Bosque, 1997). Ya en los años setenta surgen programas en los que se incluye topología y en los ochenta, con una tecnología informática más potente, surgen los primeros SIG comerciales operativos y se desarrolla una potente industria en programas SIG liderada por Estados Unidos. A finales de los ochenta y comienzos de los noventa se produce una rápida expansión en el desarrollo, máquetin y aplicaciones de los SIG (Gutiérrez y Gould, 1994). La disponibilidad actual de ordenadores potentes que permiten afrontar los procesos de cálculo involucrados en el análisis de datos territoriales, factor limitante para el uso del SIG en épocas anteriores, ha contribuido también a la rápida expansión de los SIG. Asimismo, la aparición de Internet y el World Wide Web ha impulsado y favorecido el intercambio, la difusión, la distribución y el suministro de datos geográficos a los usuarios, constituyendo un importante impulso para el uso de los SIG.

3.1. Aplicaciones

Los SIG están ampliamente extendidos y sus campos de aplicación son muy diversos. Resulta imposible enumerar todas las aplicaciones de los SIG ya que cualquier actividad o disciplina, tanto de carácter científico como de gestión o empresaria, relacionada con el territorio los utiliza: aplicaciones medioambientales y de recursos naturales, socioeconómicas, demográficas, catastrales, cartográficas, de planificación, de ordenación del territorio, de máquetin, de transporte, etc.

Los SIG son un valioso instrumento de apoyo en cartografía de suelos. Frente a la cartografía tradicional, en la que se ofrecen documentos cartográficos normalmente en papel acompañados de una memoria, los SIG incrementan las posibilidades de contenido de información, permitiendo integrar toda la información de suelos disponible, e incrementando las posibilidades de su gestión, análisis y utilización. Una de las principales fuentes de datos de suelos integrables en los SIG aun no mencionada, son las bases de datos electrónicas de suelos. Ejemplos de ello son el sistema de información de suelos de Canadá (CanSis) que integra información de la base de datos de suelos nacional (NSDB) de dicho país (<http://res.agr.ca/CANSIS/NSDB>); el Sistema Nacional de Suelos de Estados Unidos (NASIS, <http://nasis.nrcs.usda.gov>); y el Sistema de Información de Suelos Europeo (EUSIS, <http://eusols.jrc.it/esbn/EUSIS.html>) fundamentado en la base de datos geográfica de suelos de Europa (SGDBE).

4. Bibliografía

- ARAGÜÉS, R. Y URDANOZ, V. 2006. Nuevas técnicas para la medida rápida y sencilla de la salinidad del suelo. *Surcos de Aragón*, 98: 30-34.
- ARONOFF, S. 1989. *Geographical Information Systems: A management perspective*. WDL Publications, Ottawa. 294 pp.
- BARNES, E.M.; SUDDUTH, K.A.; HUMMEL, J.W.; LESH, S.M.; CORWIN, D.L.; YANG, C.; DAUGHTRY, C.S.T.; AND BAUSCH, W.C. 2003. Remote -and Ground- based sensor techniques to map soil properties. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69 (6): 619-630.
- BELWARD, A.S. Y VALENZUELA, C.R. 1991. *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resources Managment in developing Countries*. Euro Courses, Remote Sensing, 1. Kluwer Academic Publishers for the Commission of the European Communities. The Netherlands. 506 pp.
- BEN-DOR, E. 2002. Quantitative Remote Sensing of Soil Properties. *Advances in Agronomy*, 75:173-243.
- BREVIK, E.C., FENTON, T.E. 2004. The effects of changes in bulk density on soil electrical conductivity as measured with the geonics EM38. *Soil Survey Horizons* 45 (3): 96-102.
- BURROUGHS P.A., MCDONELL R.A. 2000. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. Oxford. Gran Bretaña. 333 pp.
- BOSQUE, J. 1997. *Sistemas de información geográfica*. Ed. Rialp, S.A. 2.º edición. 451 pp.
- CAMPBELL, J.B., 2002. *Introduction to Remote Sensing*, 3.rd edition. The Guilford Press, New York. 564 pp.
- CHUVIECO, E. 2006. *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel, S.A. 2.ª edición. 592 pp.
- CORWIN, D.L. Y LESH, S.M. 2004. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. I Survey protocols. Part II. Case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46 (1-3): 103-133 (I) and 135-152 (Part II).
- CORWIN, D.L., RHOADES, J.D., VAUGHAN, P.J., LESCH, S.M. 1995. Salt-loading assessment methodology for managing soil salinity. *Conference Proceedings of the Clean Water- Clean Environment- 21st Century*, Kansas City, Missouri, March 5-8.
- DOOLITTLE, J., NEILD, S.J., SASSER, L.D., TUTTLE, J.W. 2005. Characterizing a lithosequence within the San Rafael swell of Utah with EMI. *Soil Survey Horizons* 46 (4): 169-178.
- EVANS, R. 1990. Discrimination and monitoring of soils, pp 75-95. En Steven, M.D. y Clark. 1990. *Applications of Remote Sensing in Agricultura*. Butterworths. London. 427 pp.
- GUTIÉRREZ, J. Y GOULD, M. 1994, *SIG: Sistemas de Información Geográfica*. Colección Espacios y Sociedades. Serie General, n.º 2. ed. Síntesis, S.A. 251 pp.
- HERRERO, J.; BA, A.; ARAGÜÉS, R. 2003. Soil salinity and its distribution determined by soil sampling and electromagnetic techniques. *Soil Use and Management*, 19 (2): 119-126.

- JENSEN, J. R., 2000, Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 544 pages.
- LESCH, S.M., RHOADES, J.D., CORWIN, D.L. 2000. ESAP-95 version 2.01R. User manual and tutorial guide. Research Report N° 146, June 2000. USDA-ARS. George E. Brown, Jr., Salinity Laboratory, Riverside, California.
- LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W., GHIPMAN, J.W., 2003. Remote Sensing and Image Interpretation. 5.th Edition. John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, NJ. 784 pp.
- MULDERS, M.A. 1987. Remote Sensing in Soil Science. Developments in soil science 15. Elsevier, Ámsterdam. 379 pp.
- PEÑA, J. 2006. Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio. Club Universitario, Alicante, España. 310 pp. + CD.
- RHOADES, J.D., LESCH, S.M., LEMERT, R.D., ALVES, W.J. 1997. Assesing irrigation / drainage / salinity management using spatially referenced salinity measurements. *Agricultural Water Management* 37: 147-165.
- RHOADES, J.M., CHANDUVI, F., LESCH, S. 1999. Soil salinity assessment. Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 57. FAO, Rome, 150 pp.
- SOBRINO, J.A. 2000. Teledetección. Universitat de València. 467 pp.
- STAR, J. Y ESTRES, J. 1990. Geographic Information System: An introduction. Pentice Hall. Englewood Cliffs. NY.
- TRIAANTAFILIS, J., MCBRATNEY, A.B. 1998. Development of a Mobile Electromagnetic Sensing System for soil salinity assessment in irrigated cotton fields. *Proc. 9.th Australian Cotton Growers Research Association Conference*, August 12-14, Broadbeach, Queensland, Australia, pp. 61-64.
- TRIAANTAFILIS, J., HUCKEL, A.I., ODEH, I.O.A. 2003. Field-Scale assessment of deep drainage risk. *Irrig. Sci.* 21: 183-192.

PARTE II: ESTUDIO DE CASOS

BLOQUE II.1. AGRICULTURA EN ZONAS SEMIÁRIDAS

Caso II.1.1. Aplicaciones de la información analítica de suelos. Ejemplos

Se propone la interpretación de tres observaciones de suelo de las que se ha solicitado análisis al laboratorio. Cada una de ellas va ligada a una problemática diferente y acompañada de diferentes niveles de información adicional proporcionada por el agricultor o el técnico que solicita el análisis.

1. EJEMPLO 1:

Muestra de suelo tomada con fines de cálculo de dosis de abonado para cultivo de trigo en regadío. Desde el punto de vista climático, la zona de la que procede la muestra es semiárida, con una precipitación media anual en torno a los 350 mm y una evapotranspiración media anual en torno a 1200 mm/año.

El agricultor ha constatado un problema de bajas producciones en la parcela en los últimos años, cuando la producción media obtenida años atrás estaba en torno a los 5000 kg/ha.

Se trata de una muestra compuesta que se acompaña de la siguiente información proporcionada por el agricultor:

- Profundidad de muestreo: 0-30 cm.
- Parcela en riego por aspersión.
- Situada en ladera, con pendiente inferior al 6%.
- Profundidad de suelo entre 0.5 y 1.0 m, y escasa pedregosidad.
- Rotación de cultivos: Cebada-Trigo-Guisantes-Trigo.
- Manejo: Aporte de purín, a razón de 30 m³/ha cada año, complementado con fertilizantes minerales.
- El agua de riego procede de un sondeo y contiene 25 mg/L de nitratos.

La muestra se proporciona húmeda y ha sido secada, disgregada y tamizada a 2 mm. Los resultados analíticos se muestran en la tabla 1.

DETERMINACIÓN (método)	UNIDADES	RESULTADO	INCERTIDUMBRE
GRANULOMETRÍA (USDA)			
Arena (0.05 a 2 mm)	% s.m.s.	22.90	
Limo grueso (0.02 a 0.05 mm)	% s.m.s.	14.78	
Limo fino (0.002 a 0.02 mm)	% s.m.s.	38.41	
Arcilla (menor de 0.002 mm)	% s.m.s.	23.91	
FERTILIDAD:			
pH al agua 1:2.5 (MT-SUE-003)		7.8	0.1
Prueba de salinidad, CE 1:5 (MT-SUE-002)	dS m-1 a 25° C	0.83	0.01
Materia orgánica oxidable (MT-SUE-023)	% s.m.s.	1.56	0.04
Nitrógeno mineral (N-NO3) (MT-SUE-031)	mg kg-1 s.m.s.	14.80	0.52
Fósforo asimilable (Olsen) (MT-SUE-005)	mg kg-1 s.m.s.	48.57	6.45
Potasio de cambio (ext. Acetato amónico)	mg kg-1 s.m.s.	186.0	
Magnesio de cambio (ext. Acetato amónico)	mg kg-1 s.m.s.	230.9	
SALES SOLUBLES (en extracto de pasta saturada):			
Conductividad, CE (MT-SUE-029)	dS m-1 a 25 °C	3.59	0.05
Humedad de saturación (MT-SUE-026)	% s.m.s.	41.20	
Calcio (MT-SUE-033)	cmolc L-1	27.50	1.27
Magnesio (MT-SUE-034)	cmolc L-1	6.67	0.40
Sodio (MT-SUE-032)	cmolc L-1	11.74	0.62

TABLA 1. Resultados de los análisis de la muestra 1

1.1. Examen previo de los resultados

a) Indicaciones del laboratorio.

Los resultados se han transcrito del informe de resultados de un laboratorio oficial. El laboratorio dispone de métodos internos para la determinación de varios parámetros, ha informado al cliente de que esos métodos son adaptaciones de los métodos oficiales y de que los resultados son comparables con los que se obtendrían por estos.

El laboratorio tiene un sistema de calidad implantado, siguiendo la Norma Internacional UNE-EN ISO/IEC 17025, y se ha declarado competente para realizar las determinaciones que fueron solicitadas.

El laboratorio proporciona la incertidumbre de los resultados en los casos en que la tiene disponible. Esa incertidumbre es en todos los casos compatible con el uso que se pretende dar a los resultados.

Los resultados son coherentes entre sí y con la información adicional de que se dispone.

b) Control de calidad.

Además del control de calidad que garantice el laboratorio, debe siempre evaluarse la coherencia de los resultados analíticos que se reciben. En este caso caben dos comprobaciones:

Respecto a la textura:

- La suma de fracciones debe dar el 100% de las partículas.

Respecto al extracto de pasta saturada:

- La conductividad en pasta saturada se relaciona con la prueba previa:
 - o Con carácter general se cumple aproximadamente $CE = 8 * CE_{1:5}$
 - Si en el suelo hay yeso, esa relación puede ser del orden de 6 o menor, como ocurre en este caso.
- La conductividad en pasta saturada debe también guardar relación con los cationes solubles.
 - o Aproximadamente $\Sigma \text{Cationes (cmol}_c \text{ L}^{-1}) = 10 * CE \text{ (dS m}^{-1}\text{)}$
 - Esta relación puede oscilar entre el entorno de 8 y el entorno de 12.

1.2. Interpretación de resultados

La clase textural (USDA) resulta Franco-Limosa, textura de tipo medio con predominio de la fracción limo. Es destacable la importancia del limo fino (38 % del total). Esta parte de la fracción limo USDA puede resultar especialmente desfavorable para las propiedades físicas del suelo ya que conlleva falta o debilidad de la estructura del suelo.

La reacción del suelo es moderadamente básica ligada a la presencia de carbonato cálcico, habitual en la zona.

La prueba previa de salinidad indica concentraciones de sales solubles en el suelo superiores a las normales. Para conocer el efecto y alcance de la existencia de salinidad se encargó la realización del análisis de sales solubles en extracto de pasta saturada, este revela que la concentración salina es ligeramente alta. El suelo no puede calificarse de salino pero la concentración existente podría afectar a cultivos sensibles, esa concentración puede ser mayor en determinados puntos de la parcela o en determinados momentos dada la movilidad de las sales solubles en el suelo (sin que se pueda detectar en la muestra) y puede afectar al cultivo de trigo y al resto de cultivos de la rotación.

La composición salina arroja una relación de adsorción de sodio (SAR) de 2.8 que no constituye un problema de sodificación en el momento del muestreo.

El contenido de materia orgánica es bajo para un suelo de regadío. Esto no es en sí mismo negativo, sin embargo la liberación de nutrientes que cabe esperar será relativamente baja y el grado de estructuración también se ve afectado negativamente.

La concentración de nitrógeno en forma de nitratos en el suelo es equivalente a unos 58 kg de nitrógeno por hectárea disponibles en los 30 cm superficiales.

El contenido de fósforo asimilable es muy alto (incluso contando con la incertidumbre asociada al resultado), probablemente está ligado a la práctica de reiterados aportes de purín al suelo.

El nivel de potasio es alto y el de magnesio medio-alto. La relación entre ambos (relación potasio/magnesio) es ligeramente baja.

1.3. Recomendaciones

De manejo:

Es muy posible que el problema de salinidad no se esté evaluando adecuadamente con esta muestra, por lo que sería necesario realizar un sondeo y obtener muestra de mayor profundidad, evaluar la presencia de rodales con síntomas de salinidad y muestrear en esos puntos, así como realizar un muestreo en la época más calurosa del año.

Es muy importante poder contar con un análisis completo del agua de riego ya que no se conoce su calidad.

Las condiciones de textura del suelo resultan desfavorables para las propiedades físicas del suelo, con deficiente aireación y permeabilidad.

De abonado:

La situación actual del balance de nutrientes es la siguiente:

Las necesidades de elementos nutrientes principales en el trigo (en kg por tm de grano) se muestran en la tabla 2.

DESTINO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Grano	20	10	5
Paja	8	3	15
Total	28	13	20

TABLA 2. Necesidades de nutrientes

Para una producción esperada de 5000 kg/ha de trigo, las necesidades se muestran en la tabla 3 (en UF):

DESTINO	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Grano	100	50	25
Paja	40	15	75
Total	140	65	100

TABLA 3. Necesidades de nutrientes

Aplicando el balance de elementos a este caso:

- SALIDAS (por ha) (UF):

Nitrógeno 140 kg N

Fósforo 65 kg P₂O₅

Potasio 100 kg K₂O

Si se deja la paja, las salidas son sensiblemente menores (especialmente en potasio y nitrógeno). En este caso, hay que considerar que la descomposición de la paja necesita nitrógeno que quedará inmovilizado temporalmente.

- ENTRADAS (por ha):

Purín 30 m³/ha:

Nitrógeno 5,5 kg N / t * 30 t = 165 kg

eficiencia 30 %: 165 * 0.30 = 48 kg N

Fósforo 6,0 kg P₂O₅ / t * 30 t = 180 kg

eficiencia 100 %: 180 * 1 = 180 kg P₂O₅

Potasio 3 kg K₂O / t * 30 t = 90 kg

eficiencia 100 %: 90 * 1 = 90 kg K₂O

Agua de riego

25 mg NO₃⁻/L/ (4.42 mg NO₃⁻/ mg N) = 5.65 mg N/L

5.65 g/m³ * 2000 m³ / ha = 11300 g 11 kg N

Mineralización de la materia orgánica del suelo

1.5% M.O. a ritmo del 1% anual liberará 25 kg N

Residuo cultivo anterior 58 kg N

Lluvia

Se considera 10 kg/ha y año 10 kg N

BALANCE RESUMEN (kg/ha):

Necesidades	140	65	100
Aportes	152	180	90

NECESIDADES DE FERTILIZACIÓN:

NITRÓGENO	nada (sobra 12 kg / ha)
FÓSFORO	nada (sobra 115 kg / ha)
POTASIO	10 kg / ha

La necesidad de potasio es despreciable, contando además con reserva en el suelo.

El aporte de 30 m³/ha de purín en fondo supone un enriquecimiento continuo de fósforo en el suelo. En realidad la dosis de purín, que está calculada con base a la necesidad nitrogenada, debería calcularse respecto del fósforo, puesto que los niveles de este elemento son ya muy altos.

Calculando el aporte de purín para que el aporte de fósforo sea igual a las necesidades de la producción del año, la cantidad aportada debería ser de unos 11 m³/año.

Limitaciones de esta interpretación:

No se proporciona información suficiente sobre el agua que se utiliza en el riego, solo se conoce la concentración de nitratos, pero la concentración salina total puede explicar el problema.

Una muestra compuesta da un resultado representativo de la situación media de la parcela, pero si la superficie a representar es muy heterogénea o contiene superficies diferentes puede dar resultados no representativos, y su utilidad será muy reducida.

La muestra es de superficie (0-30 cm) y no se cuenta con información sobre los horizontes subsuperficiales del suelo ni del material geológico subyacente. Ambos, según su posición, pueden modificar por completo el comportamiento de este suelo.

La información proporcionada por el agricultor es relativamente completa, mucho más de lo que es habitual, por ejemplo, respecto a geomorfología y pedregosidad, aspectos que modifican el comportamiento del suelo y que deben observarse en campo.

2. EJEMPLO 2

Muestras de suelo tomadas con fines de plantación de vid en una parcela de una zona de clima continental semiárido, con precipitación media anual en torno a 300 mm, y evapotranspiración en torno a 1200 mm anuales.

Se desea conocer la idoneidad del suelo para plantación de vid y el estado de fertilidad general de cara a ese cultivo.

Se trata de una muestra puntual que se acompaña de la siguiente información proporcionada por el agricultor:

- Profundidad de muestreo 0-40 cm.
- Parcela en riego a manta.
- Situada en fondo de valle, con pendiente inferior al 2%.
- Profundidad de suelo entre 0.5 y 1.0 m, y pedregosidad moderada.

La muestra se proporciona húmeda y ha sido secada, disgregada y tamizada a 2 mm. Los resultados analíticos se muestran en la tabla 2.

DETERMINACIÓN (método)	UNIDADES	RESULTADO	INCERTIDUMBRE
GRANULOMETRÍA (USDA)			
Arena total (0.05 a 2 mm)	% s.m.s.	22.58	
Limo grueso (0.02 a 0.05 mm)	% s.m.s.	24.01	
Limo fino (0.002 a 0.02 mm)	% s.m.s.	37.34	
Arcilla (menor de 0.002 mm)	% s.m.s.	16.07	
FERTILIDAD			
pH al agua 1:2.5 (MT-SUE-003)		8.3	0.1
Prueba de salinidad, CE 1:5 (MT-SUE-002)	dS m ⁻¹ a 25 °C	0.23	0.01
Materia orgánica oxidable (MT-SUE-023)	% s.m.s.	1.40	0.04
Fósforo asimilable (Olsen) (MT-SUE-005)	mg kg ⁻¹ s.m.s.	2.77	0.37
Potasio de cambio (ext. Acetato amónico)	mg kg ⁻¹ s.m.s.	236.0	
Magnesio de cambio (ext. Acetato amónico)	mg kg ⁻¹ s.m.s.	297.8	
Carbonato cálcico equivalente (MT-SUE-008)	% s.m.s.	29.32	2.70
Caliza activa (MT-SUE-028)	% s.m.s.	11.78	0.79

TABLA 2. Resultados analíticos de la muestra 2

2.1. Examen previo de los resultados.

a) Indicaciones del laboratorio.

Los resultados se han transcrito del informe de resultados de un laboratorio oficial. El laboratorio dispone de métodos internos para la determinación de varios parámetros, ha informado al cliente de que esos métodos son adaptaciones de los métodos oficiales y de que los resultados son comparables con los que se obtendrían por estos.

El laboratorio tiene un sistema de calidad implantado, siguiendo la Norma Internacional UNE-EN ISO/IEC 17025, y se ha declarado competente para realizar las determinaciones que fueron solicitadas.

El laboratorio proporciona la incertidumbre de los resultados en los casos en que la tiene disponible. Esa incertidumbre es en todos los casos compatible con el uso que se pretende dar a los resultados.

Los resultados son coherentes entre sí y con la información adicional de que se dispone.

b) Control de calidad.

Además del control de calidad que garantice el laboratorio, debe siempre evaluarse la coherencia de los resultados analíticos que se reciben. En este caso cabe comprobar la textura:

La suma de fracciones debe dar el 100% de las partículas.

2.2. Interpretación de resultados

La clase textural (USDA) resulta Franco-Limosa, textura de tipo medio con predominio de la fracción limo.

La reacción del suelo es moderadamente básica ligada a la presencia de carbonato cálcico, habitual en la zona.

La prueba previa de salinidad indica que la concentración de sales solubles en la solución del suelo está dentro de lo normal.

El contenido de materia orgánica es bajo. Esto no es en sí mismo negativo, sin embargo, la liberación de nutrientes que cabe esperar será relativamente baja.

El contenido de fósforo asimilable es muy bajo.

El nivel de potasio y el de magnesio de cambio son muy altos. La relación entre ambos (relación potasio/magnesio) es ligeramente baja.

Se trata de un suelo fuertemente carbonatado y el contenido de caliza activa es susceptible de provocar clorosis férrica incluso en especies tolerantes.

2.3. Recomendaciones

Respecto a la plantación:

El suelo es globalmente adecuado para el cultivo de vid pero debe elegirse un patrón resistente a clorosis, del tipo de 41-Berlandieri, 333-East Malling, 140-Ruggieri, Richter 110 o similar que resulte, a su vez, adecuado a la variedad macabeo que se desea establecer.

La textura, y en concreto el nivel de arcilla, no resulta limitante si se mantienen unas condiciones de estructura del suelo aceptables.

Respecto al manejo de la fertilidad del suelo:

El contenido de fósforo es muy bajo. Es muy probable que exista alta respuesta a la aplicación de este elemento. En esa situación y al tratarse de un suelo fuertemente carbonatado, han de tenerse en cuenta dos aspectos de manejo en concreto:

- Realizar aplicaciones muy superiores a las necesidades (al menos un 50 % más).
- Aplicarlo preferentemente localizado en la banda de plantación.
- Utilizar formas muy solubles.

Es recomendable realizar ya en plantación un aporte de unas 40 UF de fósforo (P_2O_5), en las líneas de plantación.

El contenido de potasio es muy alto y hace innecesarios aportes adicionales.

2.4. Limitaciones de esta interpretación

Una muestra puntual da un resultado representativo de ese punto en que se tomó la muestra y de un entorno más o menos amplio en función de la elección que se haya hecho del punto de observación y la variabilidad que exista en la parcela.

La muestra comprende una profundidad entre 0 y 40 cm. Puede corresponder a la profundidad de labor o al primer horizonte (ambos coincidirían) pero es una profundidad poco habitual de laboreo. Es muy probable que la profundidad sea inadecuada y en la muestra se haya obtenido mezclado material del horizonte superficial (unos 30 cm) y del horizonte inferior, en general mucho más carbonatado. Si este es el caso, la muestra no es representativa de ninguno de los dos.

No se cuenta con información sobre los horizontes inferiores del suelo ni del material geológico subyacente. Ambos, según su posición, pueden modificar por completo el comportamiento de este suelo.

3. EJEMPLO 3

Observación de un perfil de suelo en un área con clima continental semiárido. Con muestreo y determinaciones analíticas en todos los horizontes diferenciados.

Forma parte de un conjunto de observaciones realizadas por una consultora para evaluar la aptitud del suelo para la puesta en riego con agua elevada desde un curso superficial. El agua es de buena calidad para el riego.

Identificación: Nonaspe 13.

Situada en el centro de un fondo llano. Con pendiente longitudinal de aproximadamente un 3% y orientación sureste.

Uso actual: Olivar en secano.

Profundidad estudiada 160 cm, sin nivel freático.

El material originario son las lutitas yesíferas subyacentes que se pueden observar en cortes de la zona y, también, sensiblemente alteradas, en el propio horizonte C de esta observación. Sin embargo, no hay ningún síntoma de deficiencias de drenaje.

Muy escasa pedregosidad superficial, de litología caliza y algún fragmento de arenisca muy alterado.

Descripción del perfil de suelo:

Ap (0-28 cm) Seco. Sin machas. Elementos gruesos muy escasos en forma de cantos angulosos de litología caliza. Sin cementaciones. Sin acumulaciones. Textura al tacto arcillo-arenosa. Estructura débil en bloques subangulares de tamaño pequeño. Suelto. Abundantes raíces finas y muy finas en todo el horizonte, con distribución normal. Fuerte reacción al CIH 11 %. Límite gradual.

By (28-120 cm) Ligeramente húmedo. Sin manchas. Sin elementos gruesos. Acumulación masiva y generalizada de yeso distribuida en todo el horizonte. Sin cementación. Textura al tacto arcillo-limosa. Estructura muy débil, en bloques subangulares de tamaño medio. Ligeramente compacto. Frecuentes raíces finas y muy finas, que disminuyen en profundidad, disposición oblicua llegando a subhorizontal al final del horizonte. Fuerte reacción al CIH 11 %. Límite gradual.

C (120-160 cm) Ligeramente húmedo. Sin machas. Sin acumulaciones. Textura al tacto franco-arcillosa. Sin estructura. Ligeramente compacto. Sin raíces. Muy fuerte reacción al CIH 11 %. Constituido por lutitas alteradas, con presencia de cristales de yeso laminar intercalados.



FIGURA 1. Imagen del perfil de suelo

Resultados analíticos:

IDENTIFICACIÓN	PROFUNDIDAD (cm)	TEXTURA (USDA, %)				
		ARENA	LIMO GRUESO	LIMO FINO	ARCILLA	CLASE
Nonaspe-13 Ap	0-28	46,07	12,74	21,63	19,56	Fr
Nonaspe-13 By	28-120	8,80	5,24	49,71	36,25	Fr-Ac-L
Nonaspe-13 C	>120	10,64	5,43	36,78	47,15	Ac-L
IDENTIFICACIÓN	pH	CE 1:5 (dS/m a 25°C)	M.O. (%)	CARBONATO CÁLCICO EQUIVALENTE (%)		Caliza Activa (%)
Nonaspe-13 Ap	8,4 ± 0,1	0,94 ± 0.01	2,00 ± 0.04	38,76 ± 3.57		12,6 ± 0,8
Nonaspe-13 By	8,3 ± 0,1	0,99 ± 0.01	0,80 ± 0.02	41,14 ± 3.78		9,7 ± 0,7
Nonaspe-13 C	8,4 ± 0,1	2,73 ± 0.04	0,26 ± 0.01	21,21 ± 1.95		13.5 ± 0,9
Determinaciones en extracto de pasta saturada						
IDENTIFICACIÓN	CE (dS/m a 25°)	SATURA- CIÓN(%)	CATIONES SOLUBLES (cmolc L-1)			
			Sodio	Calcio	Magnesio	SAR
Nonaspe-13 Ap	3,01±0.04	37,30	2,03 ± 0.11	29,87 ± 1.37	4,18 ± 0.25	0,49
Nonaspe-13 By	5,12±0.07	50,60	5,01 ± 0.26	35,26 ± 1.62	8,49 ± 0.51	1,07
Nonaspe-13 C	4,41±0.06	38,50	3,99 ± 0.21	29,22 ± 1.34	7,61 ± 0.46	0,93

TABLA 5. Resultados analíticos

3.1. Examen previo de los resultados.

a) Indicaciones del laboratorio.

Los resultados se han transcrito del informe de resultados de un laboratorio oficial. El laboratorio dispone de métodos internos para la determinación de varios parámetros, ha informado al cliente de que esos métodos son adaptaciones de los métodos oficiales y de que los resultados son comparables con los que se obtendrían por estos.

El laboratorio tiene un sistema de calidad implantado, siguiendo la Norma Internacional UNE-EN ISO/IEC 17025, y se ha declarado competente para realizar las determinaciones que fueron solicitadas.

El laboratorio proporciona la incertidumbre de los resultados en los casos en que la tiene disponible. Esa incertidumbre es en todos los casos compatible con el uso que se pretende dar a los resultados.

Los resultados son coherentes entre sí y con la información adicional de que se dispone.

b) Control de calidad.

Además del control de calidad que garantice el laboratorio, debe siempre evaluarse la coherencia de los resultados analíticos que se reciben. En este caso caben varias comprobaciones:

Respecto a la textura:

- La suma de fracciones debe dar el 100 % de las partículas.

Respecto al pH:

- La presencia de carbonatos bloquea el valor de pH en valores en el entorno o superiores a 8 (generalmente entre 8,0 y 8,4)

Respecto al extracto de pasta saturada:

- La conductividad en pasta saturada se relaciona con la prueba previa:
 - o Con carácter general se cumple aproximadamente $CE = 8 * CE_{1:5}$
 - Si en el suelo hay yeso, esa relación puede ser del orden de 6 o menor, como ocurre en este caso.
- La conductividad en pasta saturada debe también guardar relación con los cationes solubles.
 - o Aproximadamente $\Sigma \text{Cationes (cmol}_c \text{ L}^{-1}) = 10 * CE \text{ (dS m}^{-1})$
 - Esta relación puede oscilar entre el entorno de 8 y el entorno de 12.

3.2. Interpretación de resultados.

La clase textural (USDA) resulta franca en el horizonte superficial, franco-arcillo-limosa en el segundo, y arcillo-limosa en el más profundo (C). Los horizontes B_y y C tienen textura muy fina y con elevada presencia de limo fino, especialmente el primero, en estos casos la estructura puede ser muy débil por lo que su mantenimiento será esencial. Debe tenerse en cuenta que la presencia de yeso en el horizonte B_y incrementa el contenido aparente de partículas tamaño limo, que es el tamaño de las partículas de yeso pulverulento acumulado en ese horizonte.

La prueba previa de salinidad indica que la concentración de sales solubles en la solución del suelo es superior a lo normal. Esto lleva a la realización del extracto de pasta saturada y al estudio de sales solubles. El contenido de agua a saturación es alto, especialmente en el horizonte B_y, relacionado con texturas finas.

La conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada tiene en este caso (presencia de yeso) dos componentes, por una parte, la debida a la disolución del yeso (poco soluble y no considerado «sal soluble» a los efectos de salinidad del suelo) que no aporta por sí solo más de 2,2 dS.m⁻¹ (conductividad de una disolución saturada de yeso), y, por otra, el incremento de esa conductividad que pueda producir la presencia de «sales solubles» (nombre que reciben precisamente las que lo son más que el yeso). La conductividad en extracto de pasta saturada alcanza valores elevados, en particular en el horizonte B_y, que serán tóxicos para muchos cultivos.

La composición de cationes solubles pone de manifiesto la presencia de yeso a través de la elevada concentración de calcio (la concentración de calcio en una solución saturada de yeso resulta de aproximadamente 28 cmol_c L⁻¹). La Relación de Adsorción de Sodio es baja en todos los casos. Este balance de cationes revela que la salinidad existente no representa riesgo inmediato para las propiedades físicas del suelo, ello es debido al efecto estructurante que representa el yeso a través de la acción del calcio que se mantiene continuamente en disolución.

El contenido de materia orgánica es medio. Su función es importante en cuanto al mantenimiento de la estructura y propiedades físicas del suelo.

Se trata de un suelo fuertemente carbonatado y el contenido de caliza activa es susceptible de provocar clorosis férrica incluso en especies tolerantes.

3.3. Recomendaciones

La puesta en riego de este suelo presenta tres aspectos potencialmente limitantes cuya evolución debe tenerse en cuenta:

- La salinidad del suelo.
- La permeabilidad.
- El mantenimiento de las propiedades físicas del suelo.

La salinidad debe reducirse, al menos en la zona de raíces, manteniendo un flujo dominante de agua hacia el exterior de esta zona. El lavado se verá favorecido por la capacidad flocculante del calcio. Dado que los volúmenes de agua disponibles son limitados, la opción del riego localizado es la más adecuada.

Se debe asegurar que las aguas de escorrentía subsuperficial no forzarán el desarrollo de niveles freáticos sobre la lutita impermeable subyacente. Aunque los volúmenes de agua van a estar muy controlados y no es previsible la existencia de excedentes de importancia, la formación de freáticos, aunque fuesen de poca importancia, puede incrementar los problemas de salinidad en determinados puntos donde la profundidad de suelo sea menor o la evacuación de aguas subterráneas esté más limitada. En este sentido, la utilización de riegos por aspersión o por superficie, está desaconsejada.

La estructura del suelo es muy débil, de forma general y sobre todo en el horizonte B_y. En un suelo de textura fina con predominio de la fracción limo el mantenimiento de la estructura, y su mejora si es posible, es imprescindible para mantener la capacidad de infiltración y de permeabilidad. El uso de riego por aspersión estaría desaconsejado por el efecto de desagregación de elementos de estructura en superficie, por impacto de gotas.

En cuanto a la fertilidad, no se dispone de información analítica pero la acumulación de yeso en el horizonte B_y y la elevada presencia de limo están relacionadas con una escasa capacidad de retención de nutrientes. Deberá recurrirse a sistemas de suministro localizado y mejor con posibilidad de fraccionamiento.

3.4. Limitaciones de esta interpretación

La mayor limitación puede proceder de la elección del punto en que se ubicó esta observación. Tanto la caracterización del perfil en campo como la información analítica proceden de un solo punto, que supuestamente será representativo de una «unidad de suelo». La corrección con que se haya delimitado esta unidad, su homogeneidad, y la representatividad del punto escogido son críticos en cuanto al valor que tendrá la información obtenida.

Esta observación forma parte de un estudio de los suelos de un área, y debiera contrastarse la información obtenida en este punto con la de otras observaciones de la misma unidad. Para que la información de un mapa de suelos sea de calidad

debe respetarse una densidad mínima de observaciones acorde con la escala final (de 0,25 a 1 observación por cm² de mapa final).

Sin embargo, tanto el tipo de observación como el muestreo y las determinaciones efectuadas son adecuados para el uso que se pretende. La descripción de una calicata proporciona gran cantidad de información que en su mayor parte tiene validez muy prolongada en el tiempo, cuando no indefinida (textura, presencia de yeso o carbonatos, profundidad de suelo), y solo puede hacerse en puntos concretos dentro de la «unidad de suelo». El estudio de la estructura (muy importante en este caso) no podría realizarse mediante simples sondeos.

El suelo se maneja actualmente en seco y el establecimiento del regadío supone un cambio drástico en las condiciones del equilibrio en que se encontraba. La evolución del suelo en regadío no depende solo de las medidas que se adopten en este suelo concreto o en algunas parcelas, sino que el conjunto de las superficies que se rieguen y el manejo del riego que se haga en ellas puede afectar al conjunto de la superficie regable. Escorrentías superficiales o subsuperficiales originadas por excedentes de riego o fracciones de lavado de zonas adyacentes pueden producir incremento del nivel de freáticos y redistribuir sales en disolución. Este aspecto debe estudiarse para el conjunto de la zona regable.

Caso II.1.2. Efecto de la salinidad del suelo en la producción de maíz en la ribera del Ebro en Navarra.

Resumen

En el valle del río Ebro, en el norte de España, sobre dos suelos clasificados como *Aquic Xerofluvent* se estudió el descenso de producción de maíz con la salinidad del suelo en condiciones reales de campo. El ensayo se realizó en dos fincas distintas, divididas en un total de 40 parcelas de ensayo. La salinidad se midió en el extracto de saturación a tres profundidades y también con un sensor de inducción electromagnética. La producción de maíz se expresó en función de la conductividad eléctrica del extracto de saturación, y también en función de la conductividad eléctrica aparente del suelo obtenida con el citado sensor. Se compararon ambos métodos de medición de salinidad y se establecen las ecuaciones de rendimiento relativo de maíz en condiciones reales de campo.

1. Introducción y objetivos

La salinización es un proceso de gran importancia en la degradación de suelos, ya que por cada diez hectáreas de tierra cultivable que se pierden, tres son debidas a este proceso (Buring, 1978). Diversos ejemplos de salinización de tierras cultivadas se citan en la bibliografía, uno de los más antiguos es el descrito por Gelburd (1985) en la antigua Mesopotamia. Tradicionalmente un suelo se considera salino si la conductividad eléctrica del extracto de saturación es mayor o igual a 4 dS/m (Richards, 1954), aunque los límites numéricos no deben ser rígidos, ya que al final la separación entre un suelo salino o no salino la establece la planta (Berstein, 1962).

El concepto de salinización es un concepto más dinámico que el de suelo salino. Un suelo salino está ahí, puede ser un suelo no cultivado con la vegetación propia de estos suelos. Puede ser un suelo que se haya dejado de cultivar, que en su día se pusiera en riego pero su elevada salinidad obligara al agricultor a abandonar el cultivo por falta de rentabilidad. O bien si su concentración salina lo permite, puede ser cultivado con plantas tolerantes a los niveles de salinidad que presente. La salinización, sin embargo, es un proceso en curso que puede presentarse en fincas de suelos inicialmente no salinos, con buena fertilidad y buena producción. En algunos suelos que se riegan con un manejo del agua deficiente, como sea un mal drenaje o incluso la ausencia de drenaje, puede ocurrir que aparezca un nivel freático próximo a la superficie del suelo. Si esto

ocurre en climas con elevada demanda evaporativa como xéricos, áridos o semiáridos, la evaporación del agua del suelo hacia la atmósfera, bien de forma directa o bien a través de la transpiración del cultivo, hace que se vayan concentrando las sales disueltas en el agua del suelo en los horizontes más próximos a la superficie. Este proceso puede provocar en regadíos fértiles en los que no exista un control periódico de la salinidad del suelo y no se realice un correcto manejo del agua, un proceso incipiente de salinización. Empieza apareciendo rodales en algunas partes de la finca con un mal aspecto del cultivo, producción baja o incluso sin producción, frente al resto de la superficie de la finca donde el aspecto del cultivo es bueno y la producción también. Si el proceso de salinización continúa la superficie afectada va creciendo.

En los últimos años se ha desarrollado tecnología que permite realizar controles de salinidad de suelos con una cierta periodicidad de una manera sencilla, como es el caso del sensor de inducción electromagnética. Con ello se podría detectar si existe o no este proceso de degradación de suelos agrícolas y poder actuar para corregirlo antes de que la producción baje tanto que obligue a un cambio hacia cultivos más tolerantes a la salinidad, que pueden ser menos rentables, o incluso en un futuro al abandono de la finca.

El objetivo del presente trabajo es estudiar el descenso de la producción de maíz con la salinidad del suelo en condiciones reales de campo y comprobar el comportamiento de la inducción magnética para medir la salinidad del suelo.

2. Antecedentes

La salinidad del suelo origina en las plantas sensibles un descenso en su desarrollo vegetativo en la medida que aumenta el contenido de iones en la disolución del suelo en la zona radicular. El efecto negativo más importante de una elevada concentración de sales es el descenso del potencial osmótico (Maas y Nieman, 1978), que provoca una menor disponibilidad de agua para la planta originando así un estrés hídrico que puede llegar incluso hasta la muerte de la planta.

La tolerancia del maíz a la salinidad ha sido estudiada por numerosos autores (Maas y Hoffman, 1987; Hoffman et ál., 1983). Aunque esta afección puede estimarse a simple vista, desde un punto de vista agrícola interesa cuantificarla, porque en áreas poco afectadas se pueden producir descensos de producción importantes, sin que se note a simple vista la afección. En 1983, Maas et ál. realizan un estudio en invernadero sobre distintos cultivares de maíz para comprobar cuál es el comportamiento en los distintos estados de crecimiento, para lo cual utilizan la conductividad eléctrica del agua del suelo (CEw) como medida de la salinidad. Según estos, la germinación se puede producir con CEw

superiores a 10 dS/m, sin embargo a los veintiún días de la nascencia el umbral de salinidad es para la mayoría de los cultivares inferior a 1 dS/m.

La mayoría de los estudios de tolerancia se han desarrollado bajo condiciones muy concretas de salinización artificial del suelo (Maas y Hoffman, 1977; Aragüés et ál. 1992; 1994; Royo y Aragüés, 1993; Grattan et ál. 1994), buscando que el contenido de sales solubles fuera homogéneo en toda la zona radicular. Pero estas situaciones no siempre se producen en condiciones reales, ya que la salinidad puede variar considerablemente en distancias muy cortas. Algunos autores afirman que la planta tomará mayor cantidad de agua de aquella profundidad que menos salinidad tenga (Bernstein y François, 1973). Otra de las condiciones experimentales ha sido la de salinizar el suelo, después de haber nacido la planta, puesto que hay cultivos en los que la sensibilidad a la salinidad es menor durante germinación y post emergencia que durante el período vegetativo. El maíz en cambio es más sensible en post emergencia y estados iniciales del crecimiento de la planta que durante la germinación y que durante el período vegetativo (Maas y Hoffman, 1977).

A lo largo del tiempo se ha expresado la salinidad del suelo como la conductividad eléctrica a través de distintos medios. Aunque se ha medido en distintos extractos acuosos más o menos diluidos, o en la propia solución del suelo (Richards, 1954; Rhoades, 1978; Aragüés et ál., 1986), la manera más extendida es la conductividad eléctrica en el extracto de saturación (CEe). Otra forma de expresarla, es la conductividad eléctrica medida directamente en un suelo con un contenido de humedad determinado o conductividad eléctrica aparente (CEa), (Rhoades e Ingvalson, 1971; Rhoades, 1976; 1978; Aragüés et ál., 1986). La corriente eléctrica es conducida a través de tres vías que actúan en paralelo: un medio líquido compuesto por la disolución del suelo, un medio sólido líquido formado por capas de suelo y agua alternantes y a través de los cationes adsorbidos sobre la superficie de las partículas sólidas unidas unas con otras (Rhoades, 1990).

Esta conductividad eléctrica del suelo se ha venido midiendo con sonda de cuatro electrodos (Rhoades e Ingvalson, 1971), con un sensor electromagnético (De Jong et ál., 1979; McNeill, 1980a; McNeill, 1980b; Rhoades y Corwin, 1981; McKenzie et ál., 1989; Rhoades et ál., 1990; Diaz y Herrero, 1992; Lopez-Bruna y Herrero, 1996; Cannon et ál 1994), y por último, algunos artículos hablan de la posibilidad de utilizar un aparato tradicionalmente usado para medir la humedad volumétrica, para medir la CEa, son equipos de reflectometría de dominio tiempo (TDR) (Topp et ál, 1982,1984; Dalton et ál, 1984).

El fundamento de la inducción electromagnética para medir salinidad en el suelo ha sido tratado por distintos autores (McNeill, 1980a, 1980b; De Jong et ál, 1979; Rhoades, 1990), aunque el funcionamiento del equipo de EM-38 de

Geonics fue descrito por McNeill en 1980. Este equipo mide una conductividad eléctrica aparente del suelo. A esta lectura se le denomina conductividad eléctrica aparente ponderada (CEa^*) ya que no todo el espesor del suelo contribuye de igual forma a la lectura. Cada capa del suelo en función de su profundidad contribuye a la lectura de manera diferente (Rhoades et ál., 1990). Se pueden obtener dos lecturas diferentes, una que corresponde a los primeros 0,75 m y otra a los 1,75 m (McNeill, 1992). Aunque la notación más precisa deba ser CEa^* , a partir de aquí y en el resto del texto se usará la notación CEa para expresar esta conductividad aparente.

Dentro de un mismo intervalo de humedad del suelo entre el 30 y el 85% la lectura no varía y se obtiene una respuesta constante (McKenzie et ál., 1989). Éste, junto con otros factores edáficos hacen necesaria una calibración, que permita obtener la conductividad eléctrica estimada a partir de la conductividad aparente medida por inducción electromagnética, ($CEea$), ya que todavía en la actualidad la medida de referencia de la salinidad del suelo sigue siendo la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CEe). Por esta razón, es necesario tomar muestras de suelo, realizar el extracto de saturación y medir la CEe para la calibración del aparato. La elección de los puntos de muestreo puede ser al azar (Díaz y Herrero, 1992; López-Bruna y Herrero, 1996) o bien mediante geoestadística, a través de un programa informático que optimiza la toma de muestras (Lesch et ál., 1995a, 1995b). La calibración de CEa con los valores de CEe habrá de hacerse en áreas con características de suelo y de manejo homogéneas, con el fin de que el contenido en humedad, la densidad aparente y el contenido en arcilla presenten valores similares.

Una forma de estudiar la sensibilidad o la tolerancia de un cultivo a la salinidad es establecer la relación entre la producción en zonas afectadas y no afectadas, en las mismas condiciones ambientales y de manejo agronómico.

El rendimiento relativo sería del 100% en una zona con salinidad lo suficientemente baja como para que la producción no se vea afectada. Esto ocurre por debajo de un determinado valor de salinidad denominado valor umbral. Una vez superado este, cuando aumenta la salinidad el rendimiento relativo disminuye (Maas y Hoffman, 1977). En este ensayo se ha considerado que las condiciones de manejo agronómico, ambientales, etc., son las mismas para todas las parcelas de una finca.

Llevando a un diagrama cartesiano los valores del rendimiento relativo y en abscisas los valores de la salinidad del suelo, aparece un conjunto de puntos. La respuesta de un cultivo a la salinidad viene dada por el estudio de estos. En maíz un modelo que ha dado buenos resultados es considerar que esta respuesta está formada por una línea con dos tramos rectos (Van Genuchten y Hoffman, 1984). El primer tramo, desde un valor cero de salinidad hasta el valor umbral, no tiene

pendiente, es decir, que por debajo del valor umbral la producción no varía con la salinidad. Un segundo tramo que es una línea recta con una pendiente determinada, desde el valor umbral hasta un valor de salinidad para el cual el rendimiento relativo es nulo, en este tramo el rendimiento desciende cuando aumenta la salinidad.

La ecuación del rendimiento relativo tendrá la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} Y_r &= 100 && \text{para } CE < a; \\ Y_r &= 100 - b(CE - a) && \text{para } CE > a, \end{aligned}$$

siendo «a» el umbral de conductividad y «b» el descenso de rendimiento relativo por unidad de conductividad (Maas y Hoffman, 1977). Posteriormente otros autores han ido completando el comportamiento de otros cultivos herbáceos frente a la salinidad (West y Francois, 1982; Francois, 1987; Francois et ál., 1986, 1988, 1989; Maas et ál. 1983; Hoffman, et ál., 1983).

3.- Material y metodos

El estudio se realizó durante 1996, en el norte de España, en el término municipal de Cabanillas que está situado en la zona sur de la provincia de Navarra cerca del río Ebro. La altitud es de 248 m sobre el nivel del mar. El clima es mediterráneo continental seco con una temperatura media de 14,2 °C y la precipitación media anual es de 377 mm, siendo mayor en primavera y otoño con fuerte sequía en verano. La evapotranspiración potencial según Blaney y Criddle modificado por FAO es de 871 mm. Según la clasificación de Papadakis es un clima mediterráneo templado.

Los suelos se asientan sobre la llanura de inundación del río Ebro, cuyos materiales son principalmente gravas, arenas, limos y arcillas que pertenecen cuaternario, Holoceno. Se han clasificado como *Aquic Xerofluvent* (S.T., 2006) con un régimen de temperaturas méxico y un régimen hídrico xérico. El nivel freático está a menos de metro y medio de profundidad y quizá sea esta la principal causa de salinización del suelo.

El cultivo que se estudia es el maíz (*Zea mays*), se han empleado variedades comerciales, híbridos simples de ciclo 700: Primero y Eurodis.

La conductividad eléctrica del agua de riego varía durante el año, en verano tiene un valor de 1,2 dS/m, y en invierno de 0,8 dS/m. Su calidad sería C₃ S₁. La frecuencia de riego es de 13 a 15 días y la dotación de unos 100 mm.

Para la realización del estudio se ha trabajado con dos fincas próximas, que pertenecen a agricultores particulares que cultivan maíz, son de regadío por inundación y están niveladas con láser. Se escogieron porque presentaban algún rodal con salinidad elevada, presentando valores bajos fuera del mismo.

Se realizó una calicata en cada finca PERFIL 1 en FINCA I y PERFIL 2 en FINCA II. Se describieron los perfiles y se tomaron muestras de suelo. Se determinaron, entre otros, los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica en extracto de saturación, humedad de saturación, carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico y textura.

En cada finca se fijaron veinte parcelas de ensayo dispuestas en retícula regular de 10 x 10 m. Una parcela de ensayo tiene 2 x 0,7 m, lo que corresponde a una línea de maíz de 2 metros de longitud. Para tener la mayor variabilidad en los valores de salinidad del suelo, unas parcelas de ensayo estaban dentro del rodal salino y otras fuera. Dentro de una finca, las veinte parcelas de ensayo han recibido el mismo manejo agronómico y tienen unas características edáficas muy similares, debido a la escasa distancia que las separa.

En todas las parcelas de ensayo se hizo un sondeo con barrena manual. Se tomaron muestras de suelo a tres profundidades de 0-30 cm, de 30-60 cm y de 60-90 cm, en las que se midió la conductividad eléctrica a 25 °C del extracto de saturación en laboratorio, CE_{e0-30} , CE_{e30-60} y CE_{e60-90} , respectivamente. Con esos tres valores se hizo la media y se obtuvo la conductividad eléctrica media en el extracto CE_{e0-90} . Una vez realizado este muestreo, se midió la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa) en cada punto, con un sensor EM-38 de Geonics Lmt. La lectura se hizo en posición horizontal que da lectura de los primeros 75 cm del suelo. Esta profundidad es suficiente para el cultivo de maíz, así como la calibración para la que se tomó muestra hasta los 90 cm. Para cada finca se hizo una calibración del equipo. La calibración del sensor electromagnético se hizo por regresión simple entre los valores de CEa y CE_{e0-90} . Realizada la calibración se dio a cada valor de CEa medido un valor de CEe estimado a partir de la medida en campo, a ésta se le denominará salinidad del suelo estimada CEea.

El pH se midió con un pH-metro modelo 620 de Metrhom. La conductividad eléctrica en el extracto de saturación con un conductímetro Crison micro CM 2201. La pasta saturada, la extracción del extracto y la humedad de saturación se realizaron según Richards (1954). El carbono orgánico se determinó siguiendo el método de Walkley-Black. (SCS, 1972). La capacidad de intercambio catiónico se hizo según el método 5 A 1 (SCS, 1972).

El maíz se recogió a mano, en mazorca, todas las de una misma parcela se introdujeron en una bolsa previamente identificada. Se llevaron al laboratorio donde se midió longitud y diámetro, así como el peso de cada una. Posteriormente

se efectuó el desgranado en una cosechadora experimental, *Winter Steiger nursery master elite*, se midió la humedad y peso específico en un Dickey-John Gac II, en cada parcela. A partir del peso húmedo, el contenido de humedad y las dimensiones de la parcela se calculó la producción de maíz en kilogramos por hectárea con una humedad del 14%.

4. Resultados

SUELOS

Los suelos sobre los que se realiza el presente estudio han sido clasificados como *Aquic Xerofluvent* (Soil Taxonomy, 1998). Son profundos, de textura franca y con un nivel freático a una profundidad inferior a 1,2 m. Aunque en superficie, en los primeros veinte centímetros, la salinidad en ambos suelos es parecida, el PERFIL 2 es más salino que el PERFIL 1.

En la tabla 1, se muestran los datos de los dos perfiles estudiados. En el perfil 1 la salinidad es menor en horizontes más profundos. Este presenta un perfil de salinidad invertido que es debido a la presencia de una capa freática próxima a la superficie (105 cm). El perfil 2 tiene una concentración de sales mucho mayor y su distribución varía con la profundidad pero sin guardar una relación directa. Las sales ascienden y descienden por el perfil del suelo en función del consumo o aporte de agua que haya en la superficie del suelo. Por ello influye la presencia de una capa freática próxima a superficie aportando sales a horizontes superficiales y, por otro, lado la precipitación y el riego que lavarían las sales hacia horizontes más profundos. El valor más alto de salinidad del perfil 1 es de 6,33 dS/m entre 35 y 55 cm; y en el perfil 2 es de 9,24 dS/m entre 57 y 105 cm. El nivel de salinidad en el horizonte superficial es más bajo que el subsuperficial debido a que la descripción y toma de muestras se hizo en marzo, tras un período de lluvia que pudo hacer descender parte de las sales hacia abajo.

Perfil	Hor.	Prof. (cm)	pH	CE dS/m	HS %	C.O. %	M.O. %	CIC cmol(+)/kg	Arcilla %	Textura
1	Ap	0-37	7,3	5,43	44	1,04	1,79	12,28	26,04	franca
	AC	37-55	7,5	6,33	44	0,68	1,17	12,48	24,42	franca
	C1	55-70	7,7	5,07	47	0,48	0,82	14,35	29,26	arcillos a franca
	C2	70-105	7,9	1,97	46	0,45	0,78	15,13	29,26	arcillos a franca
2		105	Capa de agua							
	Ap	0-22	7,7	4,95	44,5	0,85	1,47	10,71	24,42	franca
	AC	22-32	7,8	8,69	44,5	0,90	1,55	10,71	24,42	franca
	C1	32-57	7,6	5,76	40	0,37	0,63	10,32	22,82	franca
	C2	57-105	7,7	9,24	44	0,32	0,56	9,92	26,04	franca
	C3	105-120	7,6	6	34	0,38	0,65	9,32	19,6	franca
		120	Capa de agua							

TABLA 1: Datos de los perfiles. Perfil 1 en Finca I y Perfil 2 en Finca II.

Salinidad CEe (dS/m)	Finca I		Finca II	
	N.º	%	N.º	%
0 < CEe < 2	0	0.0	0	0.0
2 < CEe < 4	9	45.0	3	15.0
4 < CEe < 6	8	40.0	3	15.0
6 < CEe < 8	3	15.0	3	15.0
8 < CEe < 10	0	0.0	5	25.0
10 < CEe < 12	0	0.0	6	30.0
CEe > 12	0	0.0	0	0.0
Nº de parcelas	20	100	20	100

TABLA 2: Porcentaje de parcelas para cada nivel de salinidad en suelo

PARCELAS DE ENSAYO

Como se muestra en la tabla 3, las parcelas de ensayo de la FINCA I tienen un intervalo de salinidad entre 2,23 y 7,75 dS/m. De las veinte, diecisiete (85%) tiene una CEe inferior a 6 dS/m y sólo tres (15%) presenta valores entre 6 y 8 dS/m, no hay parcelas con CEe superior a 10 dS/m, (tabla 2). En la tabla 4 se puede observar que el intervalo de salinidad de las parcelas de ensayo de la FINCA II es el más amplio. Los valores de salinidad están entre 2,22 y 12,00 dS/m. Seis parcelas (30%) tienen una CEe menor de 6 dS/m, ocho parcelas están entre 6 y 10 dS/m (40%) y seis (30%) CEe superior a 10 dS/m (tabla 2).

Parcela N.º	CEe 0-30 dS/m	CEe 30-60 dS/m	CEe 60-90 dS/m	CEe 0-90 dS/m	CEa dS/m	CEea dS/m	N.º Mazor- cas	Humedad %	Peso específ. (gr/hl)	Producción kg/ha (14%)	Rendimiento relativo %
1	2,14	2,28	2,28	2,23	0,54	2,57	9	21,80	70,00	14913,0	100,00
2	2,53	2,02	2,49	2,35	0,54	2,57	11	22,00	70,10	14327,9	96,08
3	2,35	3,97	4,31	3,54	0,66	4,05	5	21,70	70,30	8305,7	55,69
4	3,78	5,55	7,38	5,57	0,74	5,04	7	23,90	67,30	9937,1	66,63
5	4,49	7,12	8,74	6,78	0,86	6,53	4	22,80	65,70	2413,7	16,19
6	2,59	4,18	5,00	3,92	0,55	2,69	6	21,10	72,00	11045,4	74,07
7	2,50	3,49	3,97	3,32	0,59	3,19	9	22,90	70,50	9770,6	65,52
8	2,87	5,50	6,23	4,87	0,75	5,17	9	23,60	68,50	10883,5	72,98
9	4,29	7,29	6,72	6,10	0,80	5,79	9	26,20	65,40	9996,8	67,03
10	3,33	4,56	5,20	4,36	0,72	4,80	9	25,60	66,60	8229,3	55,18
11	2,66	2,73	3,14	2,84	0,57	2,94	9	21,00	73,70	13252,9	88,87
12	2,70	3,67	5,27	3,88	0,66	4,05	8	22,00	70,70	9032,8	60,57
13	3,88	5,48	6,11	5,16	0,72	4,80	8	23,60	70,30	9038,8	60,61
14	3,78	5,33	5,52	4,88	0,72	4,80	7	24,60	66,80	7014,4	47,04
15	4,79	6,60	5,90	5,76	0,77	5,41	7	24,00	66,60	5393,6	36,17
16	2,46	3,65	4,98	3,70	0,66	4,05	7	21,50	71,70	9507,8	63,76
17	2,67	4,19	4,62	3,83	0,66	4,05	8	21,10	73,40	11170,9	74,91
18	3,88	4,89	5,65	4,81	0,76	5,29	8	25,30	64,50	6854,0	45,96
19	6,40	8,47	7,77	7,55	0,95	7,64	5	26,60	61,50	2701,4	18,11
20	5,09	6,41	5,80	5,77	0,80	5,79	7	26,60	63,80	6363,4	42,67

TABLA 3: Salinidad de suelo y producción de maíz en FINCA I. 1996

Par- cela N.º	CEe 0-30 dS/m	CEe 30-60 dS/m	CEe 60-90 dS/m	CEe 0-90 dS/m	CEa dS/m	CEea dS/m	N.º Mazor- cas	Humedad %	Peso específ. (gr/hl)	Producción kg/ha (14%)	Rendimiento relativo %
1	11,19	11,40	10,20	8,00	1,54	10,98	5	18,30	67,20	2120,0	15,95
2	10,37	11,29	10,08	8,58	1,37	9,45	6	18,90	67,90	2748,5	20,68
3	6,10	6,84	6,26	5,84	1,05	6,56	7	19,80	71,50	7358,9	55,36
4	2,15	2,15	2,22	2,35	0,58	2,33	7	19,50	71,50	11384,1	85,65
5	10,61	7,59	8,39	6,96	1,24	8,27	9	20,80	72,80	8115,9	61,06
6	6,72	9,53	8,45	9,10	1,23	8,18	6	17,90	73,10	3996,6	30,07
7	9,28	12,40	10,22	8,98	1,33	9,08	4	19,20	65,00	1530,2	11,51
8	9,37	10,76	9,11	7,19	1,31	8,90	8	19,20	69,30	4399,3	33,10
9	5,16	6,50	5,30	4,24	0,76	3,45	9	20,40	71,70	12056,5	90,70
10	4,38	6,04	5,37	5,68	0,95	5,66	8	20,50	74,30	10532,8	79,24
11	10,10	11,27	11,18	12,17	1,49	10,53	6	18,70	68,40	2305,0	17,34
12	11,45	12,44	12,00	12,10	1,71	12,51	4	18,50	67,30	1795,8	13,51
13	9,07	11,18	10,26	10,53	1,40	9,72	5	18,00	70,80	2769,5	20,84
14	5,69	6,62	5,82	5,15	0,95	5,66	10	20,60	72,50	11784,4	88,66
15	2,37	-	2,37	-	0,62	2,69	8	19,50	72,90	13292,1	100,00
16	7,94	7,86	8,30	9,10	1,24	8,27	2	18,70	66,10	1536,6	11,56
17	6,84	8,57	8,00	8,60	1,30	8,81	3	18,00	63,00	1416,9	10,66
18	7,59	8,40	7,61	6,85	1,26	8,45	4	18,00	69,30	2189,8	16,47
19	6,86	7,75	7,43	7,69	1,17	7,64	6	19,20	74,00	5802,0	43,65
20	2,96	3,43	3,79	4,98	0,84	4,67	7	19,00	73,10	9452,1	71,11

TABLA 4: Salinidad de suelo y producción de maíz en FINCA III. 1996

PRODUCCIÓN

El aspecto general de las plantas que crecen en los rodales de salinidad elevada es característico. Las plantas presentan un crecimiento lento, tienen menor altura, sus hojas son más pequeñas, su color verde es menos intenso, presentando amarilleamiento y en algunas tonalidades rojizas o violáceas. La panícula sale un poco antes que en plantas no afectadas. En este estado, la planta da un aspecto de enanismo puesto que es adulta pero de pequeño tamaño. La mazorca se forma, pero es muy pequeña, normalmente no tiene ningún grano de maíz, pero en ocasiones puede tener alguno que en este caso presenta un tamaño mayor al que presentan los de mazorcas de plantas no afectadas por salinidad. El zuro es de color amarillo y con mayor humedad que el resto ya que las espigas cierran por completo la mazorca. Cuando la salinidad es elevada se ven plántulas de maíz muertas, o sea que han sido capaces de germinar y de crecer unos días pero luego mueren, lo que indica que la sensibilidad en este momento del desarrollo es inferior al de germinación para este cultivo. Ya en 1959 Piruzyan

(cit. por Maas et ál., 1983) afirma que el período más sensible del maíz a la salinidad es el de emergencia y el de crecimiento inicial de la planta, siendo el más tolerante el estado de floración, posteriormente también en 1964, Ghowail (cit. por Maas et ál., 1983) considera que la fase de germinación del maíz es más tolerante a la salinidad que durante el crecimiento inicial de la planta.

La producción máxima en la FINCA I y FINCA II es de 14.913 kg/ha y 13.292 kg/ha, respectivamente (tabla 3 y tabla 4).

DESCENSO DE LA PRODUCCIÓN.

Para realizar el estudio del descenso de la producción de maíz con la salinidad, se realiza una regresión lineal entre el rendimiento relativo y la salinidad. La salinidad puede expresarse de diversas formas. Las estudiadas en el presente trabajo han sido la conductividad eléctrica en el extracto de saturación y la conductividad eléctrica aparente del suelo medida por inducción electromagnética. En cualquiera de los dos casos estudiados, si se utiliza la ecuación de rendimiento relativo de Maas y Hoffman (1977), se hace necesario fijar el rendimiento relativo igual a 100%, para lo cual hay que fijar una producción máxima, para así poder calcular el valor umbral de salinidad como punto de corte de la recta de regresión y la de rendimiento relativo igual al 100%.

Descenso de producción con la salinidad medida en el extracto (CEe)

En primer lugar, se estudia cómo desciende el rendimiento relativo del maíz con la salinidad expresada como conductividad eléctrica en el extracto de saturación. Para poder determinar qué valor de conductividad eléctrica de los estudiados (CEe₀₋₃₀, CEe₃₀₋₆₀, CEe₆₀₋₉₀, CEe₀₋₉₀ y CEa), estaba más relacionado con el descenso del rendimiento relativo, se hizo una matriz de correlación y se vio que CEe₀₋₉₀ tiene un coeficiente de correlación mayor en las dos fincas (tabla 5). Por ello la conductividad eléctrica obtenida como promedio de las tres anteriores está más relacionada con el descenso de producción que cualquiera de ellas por separado.

	Producción FINCA I	Producción FINCA II
CEe ₀₋₃₀	-0,788	-0,772
CEe ₃₀₋₆₀	-0,806	-0,836
CEe ₆₀₋₉₀	-0,792	-0,859
CEe ₀₋₉₀	-0,836	-0,861
CEa	-0,852	-0,891

TABLA 5: Coeficiente de correlación entre producción de maíz y salinidad

En la FINCA I, seis parcelas superan una producción de 10.000 kg/ha y tan solo dos no llegan a los 3.000 kg/ha. La producción máxima es de 14.913 kg/ha y

la mínima 2.413,7 kg/ha. La ecuación del rendimiento relativo, para valores de CEe_{0-90} entre 2,23 y 7,55 dS/m, es:

$$Yr = 119,812 - 13,027 \cdot CEe_{0-90} \quad (r^2 = 0,699 \text{ y } n=20),$$

El valor de conductividad eléctrica por encima del cual comienza a disminuir la producción se obtiene como punto de corte de la ecuación anterior con la ecuación $Yr = 100$, a este valor se le denomina valor umbral y en este caso es de 1,52 dS/m. La ecuación de rendimiento relativo para $CEe_{0-90} > 1,52$ dS/m, es:

$$Yr = 100 - 13,02 (CEe_{0-90} - 1,52) \quad (r^2 = 0,6996 \text{ y } n=20)$$

En la FINCA II la producción máxima es de 13.292,06 Kg/ha, la mínima es de 1.530,20 Kg/ha. La ecuación de regresión es:

$$Yr = 118,287 - 9,771 \cdot CEe_{0-90} \quad (r^2 = 0,741 \text{ y } n = 20),$$

para valores de CEe_{0-90} comprendidos entre 2,22 y 12 dS/m. El valor umbral de salinidad en esta finca es de 1,87 dS/m y la ecuación del rendimiento relativo para $CEe_{0-90} > 1,87$ dS/m, es:

$$Yr = 100 - 9,77 (CEe_{0-90} - 1,87) \quad (r^2 = 0,741 \text{ y } n = 20).$$

Por todo lo dicho hasta ahora y considerando la conductividad eléctrica en el extracto de saturación, los valores umbrales de salinidad son 1,52 dS/m y 1,87 dS/m para cada una de las fincas estudiadas. La pendiente con la que cae el rendimiento relativo de maíz por unidad de CEe_{0-90} en cada finca es de 13,02% y 9,77%.

Descenso de producción con la conductividad estimada a partir de la CEa del suelo.

El descenso de la producción de maíz se podría expresar en función de los valores de CEa por inducción electromagnética. Para ello primero se realiza una regresión simple entre estos y los valores de conductividad eléctrica en el extracto de saturación CEe . Así se podrán transformar las medidas tomadas de CEa en valores de CEe .

En la FINCA I, la recta fue:

$$CEe_{0-90} = 12,4 \cdot CEa - 4,117; \quad (r^2 = 0,912 \text{ y } n=20)$$

En la FINCA II la recta de regresión fue:

$$CEe_{0-90} = 9,006 \cdot CEa - 2,893; \quad (r^2 = 0,948 \text{ y } n=20)$$

Con estas ecuaciones se establece una relación entre los valores de CEa que da el sensor y la CEe medidas en el laboratorio. Dados los valores de r^2 que presentan ambas fincas, se puede decir que la inducción magnética para el intervalo de salinidad estudiado de 2,22 a 12 dS/m, es un buen método para medir la salinidad en estos suelos. Ahora bien, cada finca tiene una ecuación diferente por ello se hace necesario establecer una calibración para cada suelo.

Posteriormente, se ha establecido la relación entre la producción de maíz y la salinidad. En este caso mediante la CEa y el rendimiento relativo del maíz.

En la FINCA I, la ecuación de regresión es:

$$Yr = 123,721 - 13,88 \cdot CEa \quad (r^2=0,725 \text{ y } n=20)$$

El valor umbral de salinidad, esto es el valor de CEa que hace $Yr=100$, es 1,709 dS/m y la ecuación del rendimiento relativo para $CEa > 1,71$ dS/m, es:

$$Yr = 100 - 13,88 (CEa - 1,71) \quad (r^2 = 0,725 \text{ y } n=20)$$

En la FINCA II, la ecuación de regresión para las 20 parcelas es:

$$Yr = 122,925 - 10,381 \cdot CEa \quad (r^2 = 0,793 \text{ y } n=20)$$

El valor umbral de salinidad es de 2,208 dS/m y la ecuación del rendimiento relativo de la producción de maíz para $CEa > 2,21$ dS/m, es:

$$Yr = 100 - 10,381 (CEa - 2,21) \quad (r^2 = 0,793 \text{ y } n = 20)$$

De los resultados obtenidos se puede decir que en los suelos estudiados el valor umbral de salinidad en campo, para el cultivo de maíz con el actual manejo agrícola que se hace en la zona, se sitúa entre los 1,52 dS/m y 1,87 dS/m en el extracto de saturación. Este intervalo estaría muy próximo al valor umbral que cita Maas en 1990 para el maíz y es 1,7dS/m (Maas, E.V., 1990). Lo mismo ocurre con el descenso de producción por unidad de salinidad una vez superado este umbral, que en estos suelos, bajo las condiciones antes citadas, estaría entre el 9,77 % y el 13,02 %. Ambos valores están próximos a 12 % citado en la bibliografía para este cultivo (Maas, E.V., 1990).

Por otra parte, si observamos los resultados obtenidos con la conductividad eléctrica estimada a partir de la conductividad aparente del suelo (CE_{ea}) vemos que son muy similares. Según estos el valor umbral estaría entre 1,71 y 2,21 dS/m, así como la velocidad de descenso de la producción que estaría entre el 10,38% y el 13,88%.

El comportamiento del cultivo se convierte en un parámetro objetivo para valorar los dos métodos de medida de salinidad en suelo. Tanto el valor umbral como la pérdida de producción por unidad de salinidad presentan valores muy semejantes con ambos métodos. Con la tabla 6 podemos comparar ambos métodos. Se observa, en primer lugar que los valores del coeficiente de regresión r^2 son más altos cuando se expresa la salinidad como CE_{ea} que cuando se expresa como CE_e, en la FINCA I es 0,725 de frente a 0,699 y en la FINCA II de 0,793 frente a 0,741. Por lo tanto, la relación entre el descenso del rendimiento relativo de maíz y la salinidad del suelo es mayor cuando esta se expresa como conductividad eléctrica estimada a partir de la inducción electromagnética que cuando se usa la conductividad eléctrica en el extracto de saturación a tres profundidades. En segundo lugar, se puede apreciar que tanto el valor umbral de salinidad como el descenso del rendimiento relativo por unidad de conductividad es mayor que con el método tradicional.

Finca	Máx. Prod. kg/ha	n	Rendimiento relativo	r^2	Relative yield	r^2
I	14912,88	20	Yr = 100 - 13,02 (CE _e - 1,52)	0,699	Yr = 100 - 13,88 (CE _{ea} - 1,71)	0,725
II	13292,06	20	Yr = 100 - 9,77 (CE _e - 1,87)	0,741	Yr = 100 - 10,38 (CE _{ea} - 2,21)	0,793

TABLA 6: Ecuaciones de rendimiento relativo de maíz con la salinidad. Dos formas de expresar la salinidad: conductividad eléctrica media en el extracto de pasta saturada y (CE_{e 0-90}) y conductividad eléctrica aparente estimada con el sensor electromagnético (CE_{ea}).

5. CONCLUSIONES

En las condiciones estudiadas, la salinidad del suelo es la causa de la pérdida de productividad del suelo estudiada a través de la pérdida de producción de maíz.

La salinidad en los suelos estudiados presenta una variabilidad muy elevada en distancias pequeñas, esto se traduce en que puede haber zonas muy afectadas por salinidad, por tanto, poco productivas y otras próximas con producciones elevadas dentro de la misma finca.

La presencia del nivel freático próximo a la superficie puede ser la causa de la elevada concentración en sales solubles en los horizontes superficiales.

La salinidad del suelo expresada como el promedio de la conductividad eléctrica en el extracto de saturación medida a tres profundidades tiene mayor

relación con el descenso de producción de maíz que cualquiera de ellas por separado.

En el intervalo de salinidad estudiado, el sensor electromagnético empleado mide de manera efectiva la salinidad. El uso de este método obliga a muestrear algunos puntos para establecer la relación entre las medidas de conductividad eléctrica aparente del suelo y las de conductividad eléctrica del extracto.

El descenso del rendimiento relativo de la producción de maíz con la salinidad en las condiciones estudiadas, se puede expresar tanto en función de la conductividad eléctrica medida en el extracto de saturación en los primeros 90 cm del suelo, (CE_{e0-90}), como en función de la conductividad eléctrica en extracto de saturación estimada. Los resultados obtenidos muestran que con ambos métodos se obtienen valores muy similares de umbral de salinidad y descenso de rendimiento relativo que están muy próximos a los citados en la bibliografía aunque con el método de medida por inducción electromagnética se consiguen coeficientes de regresión ligeramente superiores entre rendimiento relativo y salinidad.

La presencia de rodales de salinidad en suelos de regadíos indica que es necesario establecer controles periódicos de medida de la salinidad para detectar posibles procesos de salinización.

6.- BIBLIOGRAFIA

- ARAGÜÉS R., ROYO A. Y FACI J. (1992): Evaluation of a triple line source sprinkler system for salinity crop production studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:377.
- ARAGÜÉS R.; MILLÁN M.; QUÍLEZ D. Y FERNÁNDEZ M. (1986): Métodos de medida de la salinidad del suelo. I y II. M.A.P.A. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Madrid.
- ARAGÜÉS R., ROYO A. Y GRATTAN S.R. (1994): Foliar uptake of sodium and chloride in barley sprinkler-irrigated with saline water: effect of pre-irrigation with fresh water. *Eur. J. Agron.*, 3(1), 9-16.
- BERNSTEIN L. (1962): Salt-affected Soils and Plants. United States Salinity Laboratory. Riverside. California.
- BERNSTEIN L. Y FRANCOIS L.E. (1973): Leaching requirement studies; Sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage waters. *Proceedings, Soil Science Society of America*, vol. 37. 931-943.
- BURINGH P. (1978): Food production potential of the world. Radhe Sinha. *The World Food Problem; Consensus and Conflict*. Pergamon Press. 477-485.
- CANNON M.E., MCKENZIE R.C. Y LACHAPELLE G. (1994): Soil salinity mapping with electromagnetism induction and satellite-based navigation methods.

- DALTON F.N., HERKLRATH W.N., RAWLINS D.S., Y RHOADES J.D. (1984): Time domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* 224, 989-990.
- DE JONG E., BALLANTYNE A.K., CAMERON, D.R., Y READ O.W.L. (1979): Measurement of apparent electrical conductivity of soils by electromagnetic induction probe to aid salinity surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43. 810-812.
- DÍAZ L. AND HERRERO J. (1992): Salinity estimates in irrigated soils using electromagnetic induction. *Soil Sci.* 154:151-157.
- FRANÇOIS, L.E., (1987): Salinity effects on asparagus yield and vegetative growth. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 112:432-436.
- FRANÇOIS L.E., DONOVAN T. J., LORENZ, K. Y MAAS E.V. (1989): "Salinity effects on rye grain yield, quality, vegetative growth and emergence". *Agron. J.* 81:707-772.
- FRANÇOIS L.E., DONOVAN T. J., MAAS E.V. Y RUBENTHALER G.L. (1988): Effect of salinity on grain yield and quality, vegetative growth, and germination to triticale. *Agron. J.* 80:642-647.
- FRANÇOIS L.E., MAAS E.V., DONOVAN T. J., Y YOUNGS V.L. (1986): Effect of salinity on grain yield and quality, vegetative growth, and germination of semidwarf and durum wheat. *Agron. J.* 78: 1053-1058.
- GELBURD D.E. (1985): Managing salinity lessons from the past. *Journal of Soil and Water Conservation.* 329-331.
- HOFFMAN G.J., MAAS E.V., PRICHARD T. Y MEYER J.L. (1983): Salt tolerance of corn in the Sacramento- San Joaquin Delta of California. *Irrig. Sci.* 4:31-44.
- LESCH S.M., STRAUSS D.J. Y RHOADES J.D. (1995a): Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques, 1. Statistical prediction models A comparison of multiple linear regression and cokriging. *Water Resources Research* 31: 373-386.
- , (1995b): Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques, 2. An efficient spatial sampling algorithm suitable for multiple linear regression model identification and estimation. *Water Resources Research* 31: 387-398.
- LÓPEZ-BRUNA D. Y HERRERO J. (1996): El comportamiento del sensor electromagnético y su calibración frente a la salinidad edáfica. *Agronomie* 16: 95-105.
- MAAS E.V. (1990): Crop salt tolerance. In *Agriculture Salinity Assessment and Management*. Chapter 13. pag. 262-304. American Society of Civil Engineers Manuals and Reports on Engineering Practice N.º 71. Tanji K. K. New York. USA.
- MAAS E. V., HOFFMAN G.J. CHABA G.D., POSS J.A. Y SHANNON M.C. (1983): Salt sensitivity of corn at various growth stages *Irrig. Sci.* 4:45-57.
- MAAS E.V., AND HOFFMAN G.J.(1977): Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. and Drainage Div. ASCE* 103(IR2):115-134.
- MAAS E.V. AND NIEMAN R.H. (1978); "Physiology of plant tolerance to salinity". En *Crop Tolerance to Suboptimal Land Conditions*. G.A. Jung, ed. American Society of Agronomy, Madison, pp. 277-299.

- McKENZIE R.C., CHOMISTEK W. Y CLARK N.F. (1989): Conversion of electromagnetic inductance readings to saturated paste extract values in soils for different temperature, texture and moisture conditions. *Can. J. Sci.* 69: 25-32.
- McNEILL J.D. (1980a): Survey Interpretation techniques EM-38. TN-6. Geonic Ltd. Ontario. Canadá.
- , (1980b): Survey Interpretation techniques EM-38. TN-9. Geonic Ltd. Ontario. Canadá.
- , (1992): Rapid, accurate, mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters. *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice.* Soil Science Society of America. Special Publications N.º 30.
- RHOADES J.D. (1978): Monitoring soil salinity: A review of methods. Establishment of water quality monitoring programs. *Proc. Annu. Am. Water Resour. Conf.* 2; 150-165.
- , (1990): Recent advances in the methodology for measuring and mapping soil salinity. *Proc. Int. Determining soil salinity from measurements of electrical conductivity.* *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 21: 861-901.
- RHOADES J.D. Y CORWIN D. L. (1981): Determining soil electrical conductivity-dept relation using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:255-260.
- RHOADES J.D. Y VAN SCHILFGAARDE (1976): An electrical conductivity probe for determining soil salinity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40, 647-651.
- RHOADES, J.D. Y INGVALSON, R. D. (1971): Determining salinity in field soils with soil resistance measurement. *Soil Sci. Soc. Am Proc.* 35, 54-60.
- RICHARDS L.A. (Ed.) (1954): *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* United States Salinity Laboratory Staff. U.S. Dep. of Agric. Handbook n.º 60. 160p.
- ROYO A. Y ARAGÜÉS R., (1993): Validation of salinity crop production functions obtained with the triple source sprinkler system. *Agron. J.* 85:795-800.
- SOIL CONSERVATION SERVICE (1972): *Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples.* U.S. Department of Agriculture. Washington. USA.
- SOIL SURVEY STAFF (S.S.S.) (2006): *Keys to soil taxonomy (tenth edition).* United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Services http://soils.usda.gov/technical/classification/tax_keys/keys.pdf.
- TOPP G.C., DAVIS J.L., BAILEY W.G. Y ZEBCHUK W.D. (1984): The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe. *Can. J. Soil Sci.* 64:313-312.
- TOPP G.C., DAVIS J.L., AND ANNAN A.P.(1982). Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:672-678.
- VAN GENUCHTEN MTH. Y HOFFMAN G.J. (1984): Analysis of crop salt tolerance data. *Soil Salinity under Irrigation. Process and Management.* Ecological Studies 51, Springer-Verlag, N.Y. pp. 258-271.
- WEST D.W. Y FRANÇOIS L.E. (1982): Effects of salinity on germination, growth and yield of cowpea. *Irrig. Sci.* 3:169-175.

Caso II.1.3.- Riego de almendros con agua de baja calidad

1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA (interés agronómico, medioambiental, aspectos legislativos,...) Los condicionantes climáticos en la zona limitan la productividad de los cultivos, siendo el riego la única alternativa para estabilizar producciones. Al no disponer de otras fuentes de agua que las capas freáticas con salinidad, se utiliza esta agua como un riego de apoyo, siendo el principal problema el riesgo de salinización asociado al uso de agua de baja calidad.													
2. CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO FÍSICO													
La parcela se localiza en el término municipal de Perdiguera. Longitud: 41° 43'23'' N; latitud: 0° 37'35''W, altitud: 470 m.s.n.m.													
Climáticas													
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Prec.	27.8	26.8	25.9	40.0	54.5	40.9	20.3	22.9	31.4	40.5	38.7	32.5	402.2
ET ₀ ⁽¹⁾	16.7	34.3	67.8	89.1	123.1	163.5	193.7	171.4	115	68.8	31.3	15	1089.7
T _{media}	6.2	8.0	10.2	12.8	16.8	21.1	24.3	23.8	20.6	15.4	9.8	6.5	14.6
T _{mínima}	2.3	3.2	4.7	7.2	10.6	14.5	17.3	17.2	14.4	10	5.5	2.9	9.2
T _{máxima}	10.1	12.8	15.8	18.4	23.0	27.6	31.3	30.4	26.9	20.8	14.0	10.1	20.1
Edáficas													
Principales subgrupos de suelos				Calcixerept típico, Calcigypsid xérico, Xerorthent típico									
Régimen de humedad				Xérico, Árido									
Régimen de temperatura				Mésico									
Principales características de los suelos				Suelos desarrollados sobre coluvios, con abundantes elementos gruesos y presencia de horizontes de acumulación de carbonato cálcico y, en ocasiones, también de yeso									
3. USOS DEL SUELO													
Principales usos del suelo (%)				De la superficie agraria utilizada en el municipio, el 96% se dedica a cultivos herbáceos, principalmente trigo duro, el 2,8% a almendro y el resto a olivar, viñedo y pastos.									
Rendimientos y causas de variabilidad				La producción media del trigo duro ronda los 1000 kg/ha y en almendro 300 kg/ha con una elevada variabilidad interanual debida principalmente a la distribución de las precipitaciones.									
Aspectos de manejo: tecnologías habituales y maquinaria				Es una agricultura muy mecanizada especialmente en el cereal. La recolección de la almendra también está mecanizada, pero no la poda.									
4. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS													
Población agraria (porcentaje sobre el total, edad, tenencia de la tierra,...)				La población activa dedicada a la agricultura supone el 35,2% del total , y el régimen de tenencia de la tierra mayoritario es en propiedad (55,3%) seguido del arrendamiento (43%).									
Capacidad de innovaciones tecnológicas				La falta de mano de obra es uno de los principales problemas en la zona, por lo que se valora muy positivamente cualquier innovación en cuanto a mecanización de las faenas.									
5. PROPUESTAS TECNOLÓGICAS													
Riego por goteo													

⁽¹⁾ Método FAO Penman-Monteith (Allen et ál., 1998)

Resumen

En la mayoría de las zonas semiáridas la forma más efectiva de estabilizar la producción agrícola es mediante el aporte adicional de agua con riego. Cuando el recurso agua es escaso, se trata de aprovechar al máximo cualquier cantidad de agua disponible, incluso si no se ajusta a los parámetros de calidad establecidos. En los Monegros zaragozanos, existen capas freáticas salinas que se están aprovechando como riego de apoyo en plantaciones de almendro, principalmente, y también de olivos. El objetivo de este trabajo es optimizar el uso de esta agua de baja calidad para obtener un incremento y estabilización interanual de la producción y al mismo tiempo evitar la salinización de la zona. Para ello se han calculado las necesidades hídricas del cultivo y se han comparado con la disponibilidad de agua, y se propone una actuación en función de las características edáficas. Los resultados indican que no es posible satisfacer al 100% las necesidades del cultivo, pero se puede reducir la salinización aprovechando las lluvias otoñales.

1. Introducción y objetivos

En el ámbito estatal, Aragón es considerado como una comunidad excedentaria en el recurso agua, sin embargo, a nivel de comunidad autónoma se observa que la precipitación está muy irregularmente repartida, variando desde casi 2000 mm anuales en algunas partes del Pirineo, a menos de 350 mm anuales en el centro de la Depresión del Ebro. Como además las zonas de menor precipitación son las que presentan temperaturas más elevadas y viento, la evapotranspiración es mucho más elevada, de manera que hay problemas para el suministro de agua a las plantas durante amplios períodos de tiempo (Faci, 1992).

En estas circunstancias la productividad de los cultivos es tan baja que, en la actualidad, solo se pueden conseguir explotaciones competitivas mediante las transformaciones a regadío. Aunque algunas zonas (Monegros I y II, Bardenas,...) ya han sido transformadas, todavía existen grandes extensiones de terreno que incrementarían su productividad si contasen con un plan adecuado de regadío.

En zonas agrícolas de los Monegros zaragozanos existen varios pueblos (Perdiguera, Leciñena, Farlete, Monegrillo,...) sin ningún plan activo de regadíos en marcha. Estos pueblos, tradicionalmente agrícolas, están perdiendo renta agrícola y además los nuevos cambios en la política comunitaria van a seguir perjudicándoles.

La iniciativa personal de algunos pequeños agricultores de la zona les ha llevado a la búsqueda de nuevas fuentes del recurso agua. La capa freática en algunas partes de este territorio se encuentra entre 50 y 100 m de profundidad, y el agua allí presente tiene una conductividad eléctrica de hasta 4 dS/m que supone una calidad baja o muy baja para el riego de cultivos, siguiendo varios criterios.

A pesar de la baja calidad del agua freática, algunos agricultores de la zona han decidido realizar pozos para extraer esta agua subterránea mediante bombas y almacenarla en depósitos para paliar los efectos de las condiciones ambientales de sequía aplicando riegos de apoyo en nuevas plantaciones de almendros, tecnología conocida como riego deficitario controlado (RDC) donde importa no solo la cantidad de agua aportada sino también el momento de aplicación (Girona, 1992)..

Como antecedentes, en la zona se realizó un trabajo (Usón, 2005) para evaluar la salinidad en el suelo que concluyó que la precipitación de otoño-invierno de 2002 produjo un lavado de las sales aportadas por el agua de riego, de manera que en abril de 2003 el suelo de la parcela de regadío podía considerarse no salino en el conjunto del perfil, con algunos puntos de ligera salinidad en los primeros 25 cm del suelo. El aporte de esta agua de riego durante los meses de abril, mayo y junio aumentó la salinidad de manera que en julio la media de conductividad eléctrica en pasta saturada en la superficie del suelo fue de 4,2 dS/m.

Por ello, el objetivo principal de este trabajo era optimizar el uso de agua de baja calidad en el riego de almendros para así poder incrementar la producción, obtener una estabilización interanual de la misma y evitar la salinización de la zona. Y como objetivo específico, realizar un balance de agua y sales que nos permita ajustar el manejo del riego a las condiciones meteorológicas de cada ciclo de cultivo

2. Metodología

Para conseguir el objetivo planteado es necesaria la caracterización de los medios productivos: suministro de agua, suelo y necesidades del cultivo.

2.1. Caracterización del cultivo

La plantación de 10 ha se realizó en el año 2000, con almendros de la variedad Guara en un marco de plantación de 6,5*6,5 m.

Los árboles han sido podados a lo largo de estos años para darles una formación en vaso con 3 ejes, y en la actualidad el diámetro medio de copa es de 2,5 metros.

El inicio de floración se da en la primera quincena del mes de marzo y la recolección en la segunda quincena del mes de agosto.

2.2. Disponibilidad de agua

La falta de agua se trata de paliar con el aporte de agua de riego, de la que es necesario conocer tanto la cantidad disponible como la calidad.

El agua de riego se obtiene de un pozo, se extrae con un molino de viento y se almacena en un depósito de 1500 m³. Se dispone de un máximo de unos 9000 m³, a lo largo del ciclo anual.

Se realizaron 3 muestreos de agua en junio de 2000, julio de 2003 y abril de 2006 y en ellos se analizaron: CE25 °C (dS/m), Aniones (Bicarbonatos, Cloruros, Sulfatos), Cationes (Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio), pH, nutrientes (Nitrógeno en forma de nitratos, potasio, nitritos, amonio y fosfatos) y microelementos (Hierro, Cobre, Manganeso y Zinc). Y a partir de estos datos se estimaron índices de calidad: pH calculado, SAR, SAR ajustado, Dureza total (°F) e Índice de LANGLIER. Estos análisis se realizaron en el Laboratorio Agroambiental de Zaragoza.

2.3. Caracterización edáfica

Se abrió una calicata en un punto representativo de la parcela, y se realizó la descripción macromorfológica de la misma (horizontes, profundidades, procesos formadores, color, contenido de elementos gruesos,...), se tomaron muestras de todos los horizontes que se analizaron en el Laboratorio Agroambiental de Zaragoza. Los análisis efectuados fueron: pH, salinidad en pasta saturada (CE, % humedad, aniones y cationes), materia orgánica, carbonato cálcico equivalente, textura y fertilidad.

2.4. Balance hídrico

En primer lugar, para saber las necesidades de agua del cultivo es necesario realizar un balance hídrico que permita conocer los momentos en los que es necesario el aporte con agua de riego. Los parámetros del medio y del cultivo necesarios son:

Precipitación, evapotranspiración de referencia, coeficientes de cultivo y capacidad de retención de agua del suelo.

Los datos de precipitación y evapotranspiración de referencia se han obtenido de la Oficina del regante (oficinadelregante.aragon.es) y de datos propios, se tienen datos históricos, así como valores de los últimos ciclos de cultivo (2002/03, 2003/04, 2004/05 y 2005/06). Los coeficientes de cultivo se han extraído del trabajo realizado por Franco et ál. (2000). La capacidad de retención de agua en capacidad de campo y en el punto de marchitez permanente en cada horizonte se estimaron a partir de los datos de profundidad, contenido de elementos gruesos y textura.

3. Resultados y discusión

3.1. Calidad del agua de riego

Los análisis del agua de riego (tabla 1) muestran que se trata de un agua de baja calidad según distintos sistemas de clasificación.

		12-06-2000	21-07-2003	20-03-2006
CATIONES-ANIONES	CE _{25°C} (dS/m)	4.82	5.50	5.51
	Bicarbonatos	1.28 meq/L	5.27 meq/L	1.53 meq/L
	Cloruros	15.14 meq/L	16.93 meq/L	14.74 meq/L
	Sulfatos	49.03 meq/L	48.90 meq/L	36.78 meq/L
	Ca	30.10 meq/L	32.21 meq/L	24.75 meq/L
	Mg	24.16 meq/L	26.73 meq/L	19.33 meq/L
	Na	10.12 meq/L	13.72 meq/L	14.20 meq/L
	K	0.11 meq/L	0.01 meq/L	
	pH	7.95	7.41	7.52
	pH calculado	6.97	6.34	6.96
NUTRIENTES	SAR	1.94	2.53	3.02
	SAR ajustado	4.72	7.74	7.37
	Dureza total	271.30	294.70	220.40
	°F			
	Índice de	0.98	1.07	0.56
	LANGLIER			
	NO ₃ -N	15.26 mg/L	24.35 mg/L	26.71 mg/L
	K	4.33 mg/L	0.51 mg/L	-
	NO ₂	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable
	NH ₄	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable
MICROELEMENTOS	PO ₄	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable
	Fe	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable
	Cu	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable
	Mn	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable
	Zn	Inapreciable	Inapreciable	Inapreciable

TABLA 1. Resultados de los análisis del agua de riego en tres fechas de muestreo

3.2. Caracterización edáfica

El tipo de suelo se caracteriza por ser moderadamente profundo, de textura franca o más gruesa y con abundantes elementos gruesos. Todas estas

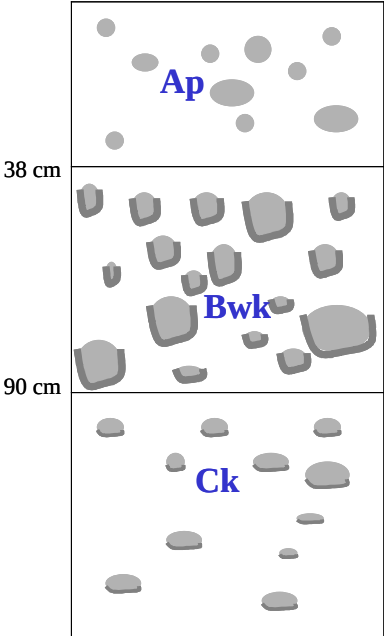
características hacen que tanto la infiltración del agua desde la superficie del suelo como el movimiento de esta agua dentro del perfil sean rápidos, con lo que también habrá un movimiento descendente de las sales cuando la humedad del suelo lo permita. La descripción detallada del perfil, así como los resultados analíticos se muestran a continuación.

INFORMACIÓN ACERCA DEL SITIO DE LA MUESTRA

Número del perfil:	Perdiguera-1
Clasificación general:	Calcixerept típico, esquelético
Soil Taxonomy (1998)	franco, mezclado, mésico
WRB (1998)	Calcisol esquelético
Fecha de observación:	17/09/03
Autor(es):	Asunción Usón
Ubicación:	Perdiguera
Altitud:	
Pendiente:	1-2%
Orientación:	
Forma del terreno:	
Posición fisiográfica:	Fondo llano
Terreno circundante:	
Microtopografía:	
Uso del suelo:	

INFORMACIÓN GENERAL ACERCA DEL SUELO

Material de partida:	Coluvial
Drenaje:	Bien drenado (Clase 4)
Condiciones de humedad en el perfil:	Ligeramente humedo
Profundidad de la capa freática:	
Pedregosidad superficial:	No se observa
Evidencias de erosión	Muy abundantes
Influencia humana:	Riego por goteo

BREVE DESCRIPCIÓN DEL PERFIL	
Suelo moderadamente profundo desarrollado sobre el material coluvial que proviene del glacis desde la sierra de Monte Oscuro. Tiene un horizonte superficial oscurecido de casi 40 cm de espesor al que subyace un horizonte con muchos elementos gruesos, que presenta acumulación de carbonatos en las partes inferiores de dichos elementos. Es de destacar la elevada actividad de la fauna en los dos primeros horizontes	 The diagram illustrates a soil profile with three distinct horizons. The top horizon, labeled 'Ap' in blue, is located between the surface and a depth of 38 cm, containing small, dark, rounded particles. The middle horizon, labeled 'Bwk' in blue, extends from 38 cm to 90 cm and is characterized by numerous large, light-colored, angular clasts. The bottom horizon, labeled 'Ck' in blue, begins at 90 cm and contains smaller, light-colored, rounded clasts. The depth markers '38 cm' and '90 cm' are positioned to the left of the horizon boundaries.

IV. DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

- Ap** De 0 a 38 cm; horizonte ligeramente húmedo, de color (matriz) en húmedo 10YR40/30 y de textura franco arenosa; sin manchas y en estado de oxidación; con muy frecuentes elementos gruesos(16-35%), de tamaño grava gruesa (2-6 cm), forma angular plana y de litología caliza. Presenta una estructura moderada en bloques subangulares de tamaño mediano y en formas debidas a la actividad de la fauna, tiene poca materia orgánica; es friable en húmedo y poco compacto. El sistema radicular es normal y presenta abundantes raíces de tamaño mediano y fino. No tiene grietas, ni acumulaciones, ni cementaciones y la reacción al HCl (11%) es muy alta. No hay revestimientos y la actividad de la fauna es abundante, rellenando cámaras y galerías. El límite inferior es gradual y plano. OCRICO
- Bwk** De 38 a 90 cm; horizonte ligeramente húmedo, de color (matriz) en húmedo 10YR60/40 y de textura franco arenosa; sin manchas y en estado de oxidación; con abundantes elementos gruesos(36-70%), de tamaño grava gruesa (2-6 cm) o mayor, forma angular plana y de litología caliza. Presenta una estructura moderada en bloques subangulares de tamaño mediano y en formas debidas a la actividad de la fauna; es friable en húmedo y compacto. El sistema radicular es normal y presenta frecuentes raíces de tamaño mediano y fino. Presenta frecuentes acumulaciones (2-20%) de carbonatos en forma de cemento geopital. No tiene grietas, ni revestimientos, ni cementaciones y la reacción al HCl (11%) es muy alta. La actividad de la fauna es abundante, rellenando cámaras y galerías. El límite inferior es neto y plano. CÁLCICO
- Ck** De 90 a más de 150 cm; horizonte de textura franco arenosa; sin manchas y en estado de oxidación; con muy frecuentes elementos gruesos(16-35%), de tamaño grava gruesa (2-6 cm), forma angular plana y de litología caliza. Presenta la estructura del material original y muy pocas raíces de tamaño fino. Presenta pocas acumulaciones (<2%) de carbonatos en forma de cemento geopital. No tiene grietas, ni revestimientos, ni cementaciones y la reacción al HCl (11%) es muy alta

V RESULTADOS ANALÍTICOS

Horizonte Genético	Profundidad (cm)	E.G. >2mm %	pH agua 1:2,5	CE _{1:5} (dS/m a 25°C)	Materia orgánica %	Carbonato cálcico eq. %	FERTILIDAD		
							N _{total} %	P _{olsen} ppm	KA _{CONH₄} ppm
Ap	0-38	16-35	8.6	0.13	1.39	34.5	0.112	14.82	98
Bwk	38-90	36-70	8.9	0.14	0.11	49.0	-	-	-
Ck	90-150	16-35	8.7	0.14	0.06	44.4	-	-	-

Arena	Limo	Arcilla	CLASE TEXTURAL USDA	SALINIDAD					
				Humedad %	CE _e (dS/m a 25°C)	CATIONES (meq/L)			
						Ca	Mg	Na	K
53.21	29.44	17.35	FAr	35.0	0.63	4.74	0.61	1.02	-
42.00	36.67	21.33	F	36.5	0.81	6.19	0.80	0.72	0.09
48.85	32.10	18.95	F	29.2	0.70	4.89	0.85	1.13	-

El suelo es altamente permeable, lo que garantiza el lavado de sales siempre que se pueda garantizar un flujo descendente de agua.

3.3. Balance hídrico

En primer lugar, se realiza el balance hídrico del año medio. Por las características de la superficie del suelo y de la pendiente, se ha considerado un 80% de la precipitación total como efectiva. La figura 1 muestra la precipitación efectiva y la evapotranspiración del cultivo para el año medio.

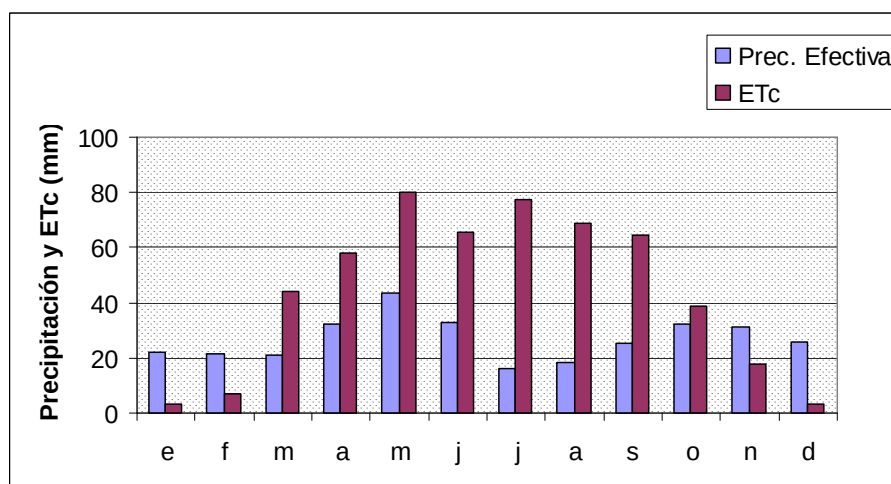


FIGURA 1. Precipitación efectiva (mm) y evapotranspiración del cultivo de almendro (mm) en Perdiguera, datos medios

Con estos datos medios, y para un suelo con una reserva de 88 L/m² calculado hasta 90 cm, la lixiviación es nula.

Se ha analizado con detalle el balance hídrico para los últimos cuatro años hidrológicos, la figura 2 muestra los datos de precipitación efectiva y evapotranspiración del cultivo durante el período de septiembre de 2002 a agosto de 2006. Destacan las marcadas diferencias hídricas de este periodo, ya que los dos primeros años fueron más lluviosos que la media, mientras que los dos últimos han sido muy secos.

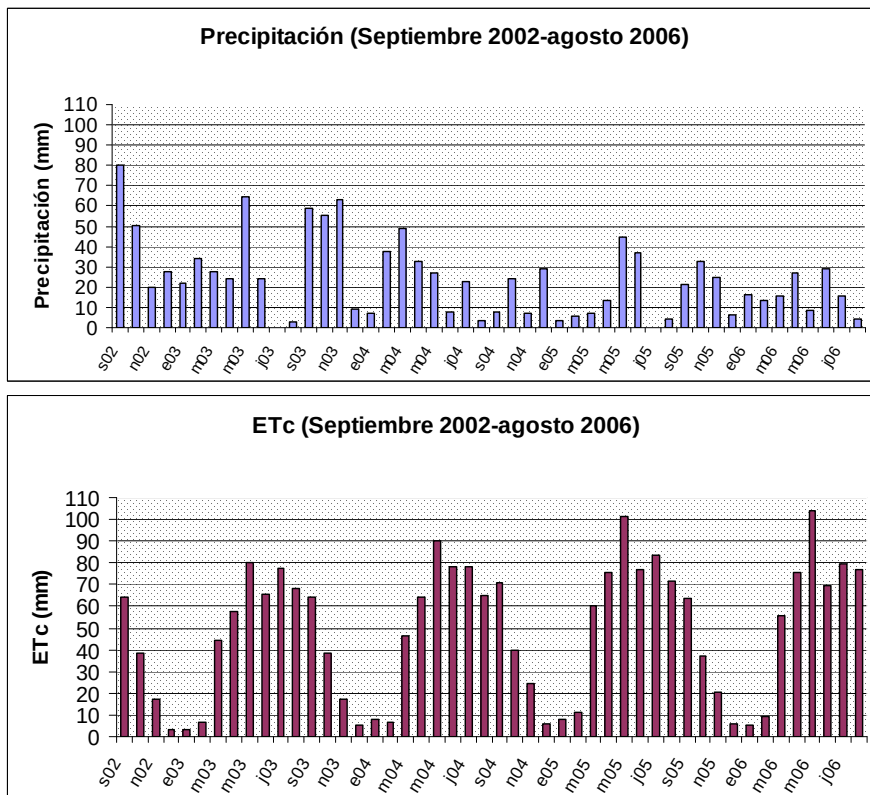


FIGURA 2. Precipitación efectiva (mm) y evapotranspiración del cultivo de almendro (mm) en Perdiguera desde septiembre de 2002 hasta agosto de 2006.

Para este período, se han calculado las pérdidas de agua por lixiviación según un balance directo de sumas y restas, en 5 supuestos:

- Sin riego.
- Con el riego habitual (70 mm entre abril y septiembre), considerando que afecta a la totalidad de la superficie del suelo.
- Con el riego habitual (70 mm entre abril y septiembre), considerando que el bulbo húmedo creado por el riego por goteo afecta a una cuarta parte de la superficie del suelo.
- Incrementando el riego habitual con dos riegos en octubre, que suponen la aplicación de 10 mm más y considerando que afecta a la totalidad de la superficie del suelo.
- Incrementando el riego habitual con dos riegos en octubre, que suponen la aplicación de 10 mm más, y considerando que el bulbo húmedo creado por el riego por goteo afecta a una cuarta parte de la superficie del suelo.

Los resultados se muestran en las figuras 3, 4, 5, 6 y 7.



FIGURA 3. Lixiviación en un perfil de suelo con una reserva de 88 mm, para un cultivo de almendro en condiciones de secano

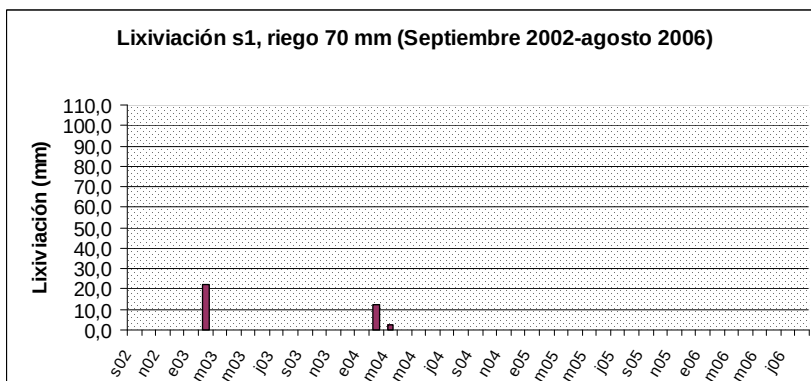


FIGURA 4. Lixiviación en un perfil de suelo con una reserva de 88 mm, para un cultivo de almendro con una dosis de riego anual de 70 mm

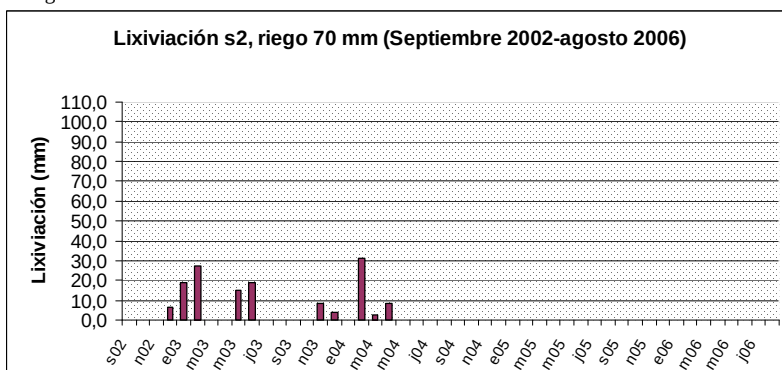


FIGURA 5. Lixiviación en un perfil de suelo con una reserva de 88 mm, para un cultivo de almendro con una dosis de riego anual de 70 mm, suponiendo que el bulbo húmedo afecta a una cuarta parte de la superficie del suelo

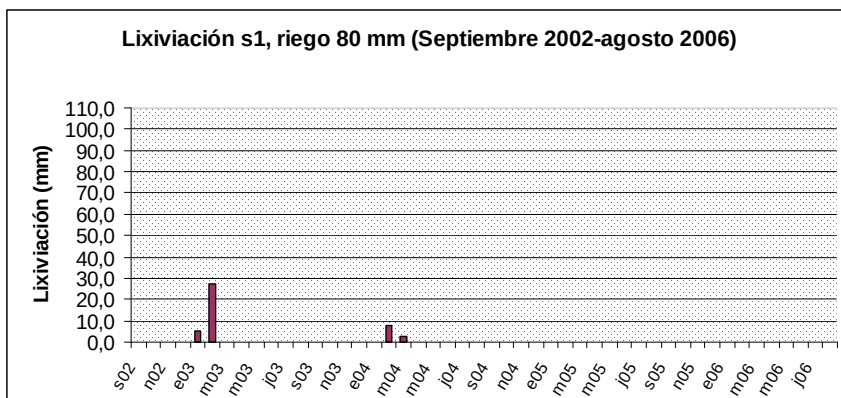


FIGURA 6. Lixiviación en un perfil de suelo con una reserva de 88 mm, para un cultivo de almendro con una dosis de riego anual de 80 mm

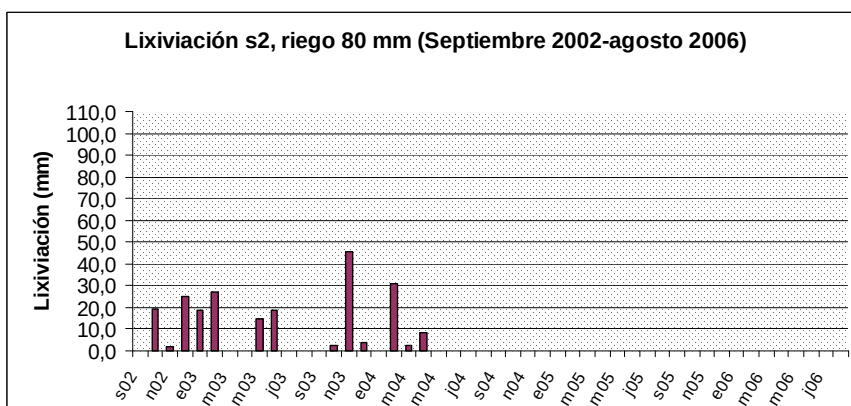


FIGURA 7. Lixiviación en un perfil de suelo con una reserva de 88 mm, para un cultivo de almendro con una dosis de riego anual de 80 mm, suponiendo que el bulbo húmedo afecta a una cuarta parte de la superficie del suelo

Según queda representado en la figura 3, a pesar de que para el año medio en condiciones de sequía no se producía lixiviación, sí que se puede llegar a producir cuando nos encontramos en años más húmedos que la media (2003 y 2004). En el resto de gráficas podemos observar que el riego supone un incremento de la cantidad de agua lixiviada, pero en ningún caso llega a producir lixiviación en los meses en que la precipitación ha sido escasa.

Esto nos lleva a considerar que en estas condiciones, con regímenes hídricos muy ajustados, el manejo del riego otoñal debe ser muy preciso y se debe basar en las condiciones meteorológicas concretas de cada año.

4. Conclusiones

Este sistema, con agua de riego de baja calidad y con riesgo de salinización, con un cultivo poco exigente en agua y un suelo altamente permeable, exige un manejo del agua muy preciso para evitar la salinización.

En dos de los cuatro últimos años no hay lavado de agua en los meses de otoño si no se aumenta el flujo descendente con un aporte de riego en esos momentos, que debe ser superior a la aplicada de manera habitual.

La disponibilidad de información meteorológica diaria en la oficina del regante permite realizar un balance diario para detectar los flujos de agua en el suelo, y así poder determinar si es necesario o no el riego de otoño para provocar el lavado de sales.

Agradecimientos

A la Institución «*Fernando El Católico*» por la financiación de parte de este proyecto de investigación.

5. Bibliografía

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. Y SMITH, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). Food and Agric. Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FACI GONZÁLEZ, J.M. 1992. Contribución a la medida y cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) en Aragón. Institución *Fernando el Católico*, Zaragoza. 125 pp.
- FRANCO, J.A., ABRISQUETA, J.M., HERNANSÁEZ, A., MORENO, F. 2000. Water balance in a young almond orchard under drip irrigation with water of low quality. *Agricultural-Water-Management*. 43: 1, 75-98.
- GIRONA, J. 1992. Estrategias de riego deficitario en el cultivo del almendro. *Fruticultura profesional*, 47, 38-45.
- MARTÍNEZ-COB, A., FACI GONZÁLEZ, J.M. Y BERCERO BERCERO, A. 1998. Evapotranspiración y necesidades de riego de los principales cultivos en las comarcas de Aragón. Institución *Fernando el Católico*. Zaragoza. 224 pp.
- USÓN, A. 2005. Evaluación de la salinidad en agua, suelo y planta de una plantación de almendro con riego deficitario. *Geórgica*, 11, 51-66.

Caso II.1.4. Diseño del drenaje en zonas salino-sódicas de Monegros

Resumen

Los regadíos de la zona de Castelflorite-S. Miguel de Cinca (sectores XVII-XVIII y XIX) están afectados por graves problemas de salinidad que limitan el cultivo de amplias zonas. Esta salinización en parte es consecuencia de grandes movimientos de tierra sin capaceo y de que carecen de drenajes subterráneos a nivel de parcela generando un tipo de agricultura no sostenible.

Mediante el presente estudio se establecen las medidas necesarias para que la prevista modernización de regadíos, se lleve a cabo de acuerdo con la realidad edáfica actual y con las necesidades de riego de los cultivos a implantar. Para ello, además de la caracterización edáfica de la zona, se analiza la salinidad actual y se calculan las necesidades de lavado y drenaje para la disminución de dicha salinidad.

Palabras clave: cartografía de suelos, salinidad, drenaje.

1. Introducción

La Comunidad de Regantes San Pedro de Castelflorite (Huesca) se encuentra inmersa en la fase previa a la ejecución del proyecto de modernización del riego de los sectores XVII, XVIII y XIX de la zona regable del Cinca. Este proyecto contempla exclusivamente la modernización de los sistemas de riego, pero no la red de drenaje.

La citada Comunidad de Regantes se puso en contacto con los profesores de la Escuela Politécnica Superior de Huesca expresando su preocupación por la presencia de suelos salinos poco productivos en la zona propuesta para la modernización de regadíos y el interés en la realización de la cartografía de: suelos y salinidad así como la medición de las propiedades más importantes a tener en cuenta en los tratamientos de mejora del suelo y diseño del sistema de drenaje, para lo que se comprometió a facilitar los trabajos y los medios necesarios.

Tras una visita a la zona, por el presidente de la Comunidad de Regantes, profesores y alumnos de la EPS, se delimitó la superficie con mayor afección por salinidad-sodicidad y es la que ha dado lugar a la elaboración de este estudio.

2. Caracterización de la zona

2.1. Situación actual

La superficie total de la zona objeto de estudio es de 1200 ha, de las cuales 38 ha son eriales y 1162 ha de cultivo. De estas, el 97,5% dispone de riego a pie, mediante acequias de hormigón en buen estado, y el 2,5% de riego por aspersión por cobertura total, ambos con agua procedente del canal de Terreu. Además cuenta con una red de colectores a cielo abierto que desembocan en un colector general y este en el barranco «Clamor Vieja». Según las observaciones realizadas, la distribución de superficies por cultivos en el año 2004 ha sido la siguiente:

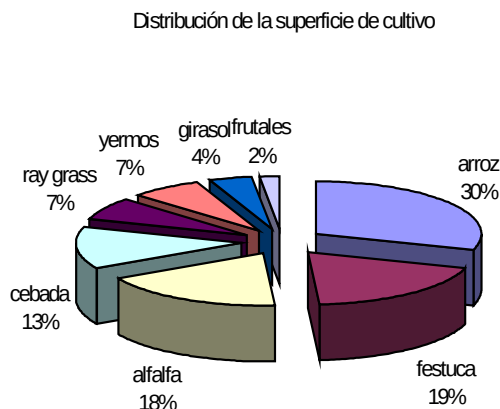


FIGURA 1. Distribución de superficies por cultivos en el año 2004

Las producciones medias no son altas debido a los problemas inherentes a los suelos salinos y sódicos, que afectan especialmente a los cultivos más rentables, como maíz o alfalfa y obliga a desplazar la rotación de cultivos hacia otros más tolerantes pero a menudo económicamente menos interesantes. El cultivo del arroz y más concretamente las labores de fangueo han agravado la situación de los problemas de suelo antes aludidos, impidiendo el saneamiento de los mismos y la posibilidad de inclusión de cultivos mejorantes en la rotación.

2.2. Delimitación del área de trabajo

La zona objeto del estudio se localiza en los sectores XVIII y XIX del Cinca, dentro de los términos municipales de Castelflorite y San Miguel de Cinca, provincia de Huesca.

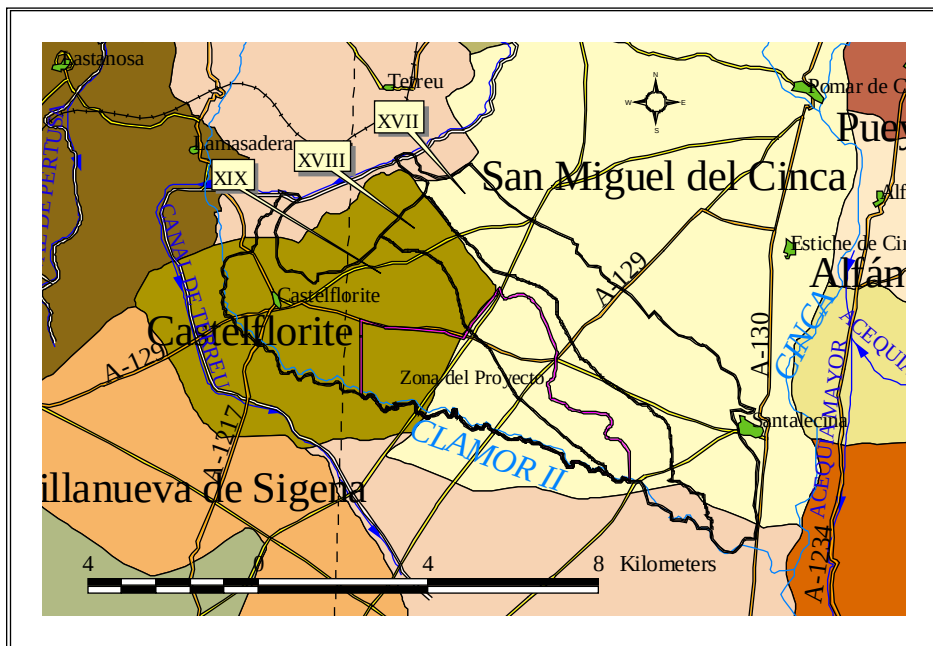


FIGURA 2. Localización del área de estudio

2.3. Geología

Al final del Terciario (Plioceno), cuando la Depresión del Ebro se abrió al Mediterráneo a través del río, se intensificaron los procesos erosivos, provocando la denudación de los terrenos terciarios más blandos y el depósito de materiales cuaternarios, generando las actuales formas del paisaje: Grandes mesas que destacan en el relieve, «sasos», superficies estructurales (relieves positivos) y glacis, terrazas, laderas que conectan las formas anteriores con las zonas de relieve negativo, como son las zonas endorreicas, «vales», cauces, etc.

Encuadre geológico

Pertenece al Sector de Plataformas Centrales situadas en el área Central o Aragonesa de la Cuenca Terciaria del Ebro. Pertenecen a las Unidades Galocha–Ontiñena (a muro) y Bujaraloz–Sariñena (a techo) ambas de edad Mioceno Inferior. Dichas unidades están incluidas en la Formación Sariñena.

Los materiales terciarios tienen una disposición subhorizontal. Formados en un dominio terrígeno de facies fluviales medias, lutítico-areniscosas, las cuales evolucionan lateralmente hacia el suroeste a facies distales con depósitos palustres-lacustres de materiales carbonáticos y lacustres salinos hacia el centro de la cuenca.

Geomorfología

Desde el punto de vista geomorfológico, las partes deprimidas del área de estudio son el resultado de la excavación de los citados materiales Terciarios por la erosión fluvial del barranco de la Clamor Vieja, afluente del Cinca por la margen derecha.

El relieve del entorno de la zona de estudio está condicionado principalmente por la disposición horizontal de los materiales y por la monotonía de sus facies litológicas aflorantes, con predominio, a muro, de términos limoso-arcillosos, poco resistentes a la erosión (parte basal de la Unidad Galocha–Ontiñena) y la existencia, a techo, de areniscas en algunos canales que condicionan el desarrollo de los pequeños relieves dispuestos alrededor de la parte central de la zona estudiada.

Dentro de la superficie dedicada al regadío en la zona de estudio no se han observado grandes contrastes litológicos en el sustrato mioceno. Es mayor el contraste entre la naturaleza del sustrato litológico y la de los depósitos de formaciones superficiales cuaternarias. Cabe destacar por su mayor contraste litológico las unidades lacustre y terraza, pero la superficie regada relacionada con ellos es muy escasa.

Tras las observaciones de campo, la zona se ha dividido en dos unidades morfológicas: ladera con pendiente en dirección suroeste, y fondo con una pendiente muy pequeña, en dirección sureste. Esta última unidad posee un mal drenaje natural, y la mitad de su superficie está ocupada por arroz.

2.4.- Clima

Características generales

En lo que se refiere a la caracterización climática de la zona, con datos obtenidos del observatorio termopluviométrico de Alcolea de Cinca, se ha efectuado la elaboración de índices climáticos, los valores más relevantes son los que se exponen a continuación:

- Pluviometría media (anual): 370 mm/(año)
- Pluviometría máxima en 24 horas: 69 mm
- Temperatura media anual: 15,6 °C
- Evapotranspiración de referencia (ET_0) calculada por el método de Hargreaves: 1.132 mm/año
- ET_0 máxima diaria (julio): 6,34 mm
- ET_0 mínima diaria (diciembre): 0,61 mm

El período frío tiene una duración de cinco meses, el período cálido de tres; y el período seco abarca 9 meses, de febrero a mediados de octubre.

Evapotranspiración de los cultivos (ET_c)

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se calcula como el producto ET₀ x K_c, donde K_c es el coeficiente de cultivo, calculado mediante la metodología propuesta por FAO (Allen et ál., 1998), la ET_c así calculada para todos los cultivos a implantar. En la tabla 1 se muestran los resultados de ET_c mensual. La duración de las fases está ajustada a las condiciones más usuales de cultivo en la comarca del Cinca Medio.

	ET _c (mm/mes)											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Maíz				27,4	83,7	181,3	235,8	168,2	19,8			
Sorgo					26,7	108,7	206,2	175,9	56,4			
Ray Grass W.(4c;s15-8)	22,9	37,8	73,6	108	145,5	181,1		86,1	113,7	63,8	28,2	19,4
Ray Grass W.(3c;s15-8)	22,9	37,8	73,6	108				86,1	113,7	63,8	28,2	19,4
Ray Grass W.(3c;s1-11)	22,8	37,8	73,6	108	145,5	181,1					27,9	19
Festuca	22,4	38,2	76,6	101,8	150,4	177,8	198,1	171,5	107,8	63,9	27,8	18,8
Sorgo x Pasto del Sudan					56,1	181,5	190,7	151,5	46,9			
Alfalfa	8,7	15,3	76,8	95,9	137,1	174,2	203,1	166,5	102,3	33,6	11,6	7,6
Guisante (industria)	19,5	41,3	83,9	118,4							14,5	11
Veza	19,5	41,3	83,9	119,3	165,8	60,6					14,5	11
Veza (forraje)	19,5	41,3	83,9	31,8							14,5	11

TABLA 1.- Evapotranspiración de cultivo mensual para los diferentes cultivos

Necesidades de agua de los cultivos

Considerando que solamente el 60% de las lluvias resultan efectivas, se estima el consumo de agua por parte de los cultivos como la diferencia entre ET_c y la precipitación efectiva Pe. Este consumo es un dato necesario para la programación de riegos por el método del balance de agua.

Frecuencia de las precipitaciones

Para el estudio de frecuencias de lluvia se han utilizado los datos diarios, correspondientes a una serie de 22 años, tomados del observatorio termopluviométrico de Alcolea de Cinca (período 1969 a 1990).

Realizado un análisis de frecuencia de precipitaciones (Pizarro 1985) en un solo día y en tres días consecutivos se concluye que la lluvia crítica diaria que es:

- Una precipitación de 20 a 25 mm en un día es igualada o superada 5 veces al año.
- Una precipitación de 30 a 35 mm en tres días consecutivos es igualada o superada 5 veces al año.

2.5.- Suelo

Localización de las observaciones

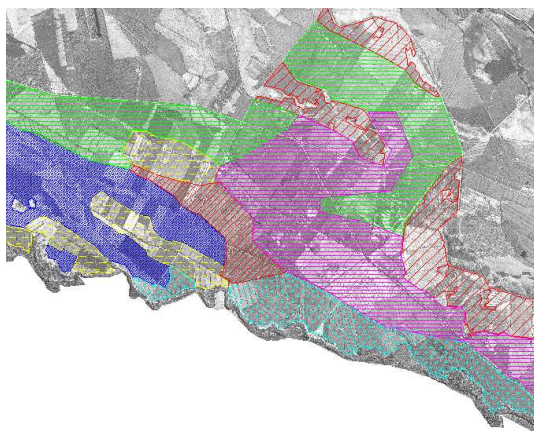
Tras el estudio de la cartografía existente (RENASA, 1976; Nogués, 2002) y la realización de vistas de campo se hizo una primera división de unidades geomorfológicas y se decidió la localización más adecuada para las observaciones de suelo. Se procedió a la apertura de ocho calicatas con retroexcavadora, 16 sondeos manuales y diversas observaciones de campo en abril de 2004. Para una superficie de 1200 ha, esta densidad de observaciones supone trabajar a nivel de reconocimiento (Porta et ál., 2003).

Definición de las unidades de tratamiento

Las informaciones recogidas en cada calicata se generalizan con el fin de establecer áreas con propiedades homogéneas que permitan dar a los suelos tratamientos distintos de acuerdo con los problemas que presenten. Estas áreas se denominan unidades de tratamiento, definidas atendiendo básicamente a la textura de los distintos horizontes, su salinidad y sodicidad, la conductividad hidráulica de sus estratos, así como la velocidad de infiltración superficial (tabla 2).

Definición de las unidades de suelo

La descripción y clasificación de los perfiles de las ocho calicatas da lugar a siete unidades de suelo cuya distribución se muestra en la siguiente figura.



UNIDADES DE SUELO		
	U _{1a}	CALCIXEREPT TÍPICO FRANCO FINO, MEZCLADO, TÉRMICO
	U _{1b}	CALCIXEREPT TÍPICO FRANCO FINO, MEZCLADO, TÉRMICO
	U ₂	XEROFLUENT TÍPICO LIMOSO FINO, MEZCLADO (CALCAREO), TÉRMICO
	U ₃	XEROFLUENT TÍPICO FRANCO GRUESO, MEZCLADO (CALCAREO), TÉRMICO
	U ₄	XERORTHENT TÍPICO FRANCO FINO, MEZCLADO (CALCAREO), TÉRMICO
	U _{5a}	XERORTHENT TÍPICO ARCILLOSO, MEZCLADO (CALCAREO), TÉRMICO FASE MODERADAMENTE Y FUERTEMENTE SALINA
	U _{5b}	XERORTHENT TÍPICO ARCILLOSO, MEZCLADO (CALCAREO), TÉRMICO FASE LIGERAMENTE SALINA

FIGURA 3. Unidades de suelo

UNIDAD DE TRATAMIENTO		UNIDAD DE SUELO		Superficie
Nº	topónimo		Clasificación (Soil Taxonomy)	(ha)
C4	Royas	U _{1A}	CALCIXEREPT TÍPICO franco fino, mezclado, térmico fase moderadamente y ligeramente salina	50
C7	Portalladas	U _{1B}	CALCIXEREPT TÍPICO franco fino, mezclado, térmico fase ligeramente y muy ligeramente salina	182
C5	Valdecaminos fondo 1	U ₂	XEROFLUVENT TÍPICO limoso fino, mezclado (calcáreo), térmico	60
C6	Valdecaminos fondo 2			31
C8	Pocetes	U ₃	XEROFLUVENT TÍPICO franco grueso, mezclado (calcáreo), térmico	313
C1	Valdecaminos ladera	U ₄	XERORTHENT TÍPICO franco fino, mezclado (calcáreo), térmico	156
C2	Longase fondo	U _{5A}	XERORTHENT TÍPICO arcilloso, mezclado (calcáreo), térmico fase moderadamente y fuertemente salina	310
C3	Longase	U _{5B}	XERORTHENT TÍPICO arcilloso, mezclado (calcáreo), térmico fase ligeramente salina	260

TABLA 2. Correspondencia entre unidades de suelo (SSS, 2006) y unidades de tratamiento

Propiedades físicas

En cada punto de observación con calicata se efectuaron seis medidas de conductividad hidráulica por el método de Porchet, tres a la profundidad del horizonte superficial, y tres a la profundidad del horizonte inferior. También se hicieron tres pruebas por calicata para determinar la velocidad de infiltración superficial de agua en el suelo, por el método de los anillos de Müntz, el resumen de las mediciones se muestra en la tabla 3.

La composición granulométrica de los suelos evaluada inicialmente “al tacto” es heterogénea, con representación de casi todas las clases texturales (USDA) incluso limosa o arcillosa. El limo es predominantemente fino, sobre todo en las texturas franco-arcillo-limosas y arcillo-limosa, donde el limo fino constituye alrededor del 50% del total de la granulometría.

La conductividad hidráulica (Herrero et ál., 1993) es mayoritariamente baja (0,05 a 0,3 m/día), exceptuando a la unidad C8, de texturas gruesas, donde es media, (0,3 a 1 m/día), y la unidad C6 en la que es muy baja (menos de 0,05 m/día).

Referencia				Granulometría					fond. Hidr.(m/día		Infiltración (mm/h)	
Unidad	n°	hor.	Prof.	Arena	Limo gr.	Limo f.	Arcilla	Clase	Profundidad (cm)			
denominación	lab.	deno	(cm)	(%)	(%)	(%)	(%)	Textural	40	75		
Valdecaminos ladera C1	2497	Ap	0-18	32.13	10.62	34.57	22.68	Fr	0.130		6.9	
	2498	Bwk	18-40	36.92	9.41	30.81	22.86	Fr				
	2499	B	40-50	58.96	8.40	14.84	17.80	Fr-Ar				
	2500	2C	50-130	5.26	0.12	43.11	51.51	ac		0.084		
Longase fondo C2									70	120	2.3	
	2501	Ap1	0-15	4.44	4.61	53.22	37.73	Fr-ac-L	0.054			0.064
	2502	Ap2	15-35	3.49	0.11	55.52	40.88	Fr-ac-L				
	2503	Bw1	35-95	20.65	0.10	40.03	39.22	Fr-ac				
2504	C	95-155	1.95	1.09	61.85	35.11	Fr-ac-L					
Longase C3									120	4.1		
	2505	Ap	0-35	4.17	1.99	52.34	41.50	ac-L	0.127			
	2506	Bw	35-120	4.21	2.70	53.83	39.26	Fr-ac-L				
	2507	C	120-162	20.62	11.32	40.52	27.54	Fr-ac				
Royas C4									65	120	0.7	
	2508	Ap	0-35	11.82	6.70	47.40	34.08	Fr-ac-L	0.128	0.270		
	2509	Bwk	35-100	37.00	12.18	25.76	25.06	Fr				
	2510	C	100-150	24.77	9.60	38.42	27.21	Fr-ac				
Valdecaminos fondo 1 C5									70	150	0.3	
	2511	Ap	0-35	4.20	3.28	51.02	41.50	ac-L	0.221	0.125		
	2512	Bwk1	35-90	13.87	5.18	48.62	32.33	Fr-ac-L				
2513	Bw	90-150	33.80	16.71	26.67	22.82	Fr					
Valdecaminos fondo 2 C6									70	150	0.5	
	2515	Ap	0-40	4.80	11.20	55.97	28.03	Fr-ac-L	0.073	0.037		
	2516	Bw	40-85	1.94	1.74	63.30	33.02	Fr-ac-L				
	2517	Bw	85-140	12.33	13.35	51.65	22.67	Fr-L				
2518	Ck	140-180	11.01	14.74	48.91	25.34	Fr-L					
Portalladas C7									60	85	8.9	
	2520	Ap	0-25	26.89	12.18	36.16	24.77	Fr	0.075	0.078		
	2521	Bw	25-60	35.42	10.29	33.28	21.00	Fr				
	2522	Ck	60-85	19.88	10.90	43.72	25.50	Fr-L				
2523	C	85-150	23.13	11.75	40.65	24.46	Fr-L					
Pocetes C8									85	150	1.2	
	2524	Ap	0-40	61.77	18.17	11.28	8.77	Fr-Ar	0.669	0.404		
	2525	C1	40-90	32.42	15.32	33.99	18.27	Fr				
	2526	C2	90-100	10.13	28.18	45.06	16.63	Fr-L				
	2527	C3	100-120	61.58	19.76	9.93	8.73	Fr-Ar				
2528	C4	120-170	14.24	30.52	37.91	17.33	Fr-L					

TABLA 3. Propiedades físicas de las unidades

Determinaciones físico-químicas en laboratorio

Una vez obtenidas las muestras, las determinaciones analíticas fueron encargadas por la Comunidad de Regantes al Laboratorio Agroambiental del Gobierno de Aragón. Las determinaciones solicitadas fueron: pH, granulometría, prueba previa de salinidad, magnesio de cambio, materia orgánica, cationes del extracto de pasta saturada, fósforo y potasio asimilables, según los métodos oficiales de análisis.

Propiedades químicas. Salinidad y sodicidad

Estudio de unidades

Los resultados de los análisis muestran que existe una gran variación en las condiciones químicas de los suelos, principalmente, en cuanto a su salinidad y sodicidad. La figura 4 muestra la distribución de los horizontes de las 8 unidades analizadas según su conductividad eléctrica (CEs) y relación de adsorción de sodio (RAS).

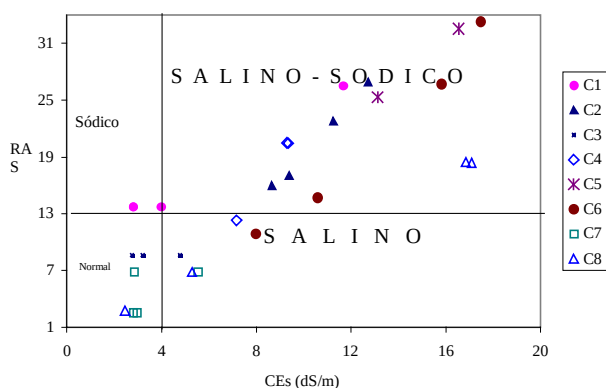


FIGURA 4. Características de salinidad y sodicidad de todos los perfiles

Salinidad

Siendo la salinidad el problema básico a solucionar, se cartografió la fase salina utilizando un sensor electromagnético (SEM), que facilita la obtención de más medidas en cada unidad. La prospección se llevó a cabo según el método de muestreo de malla regular de 20 hectáreas (García y Virgili 1996).

Para calibrar el SEM se estableció una regresión lineal entre las lecturas del SEM y las Cesmax, como el máximo de las CE de pasta de saturación de las muestras de suelo a 4 profundidades: 0-25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm, y 75-100 cm, pertenecientes a cada uno de los 15 sondeos, escogidos como puntos de calibración.

Las correlaciones entre las medidas de conductividad aparente, medida de SEM vertical (EMv) y horizontal (EMh) y la conductividad eléctrica de pasta saturada del horizonte más salino son:

$$CEs_{max} = f * (0,0415 * EMv + 1,71456) \quad r^2 = 0,93 \quad n = 15$$

$$CEs_{max} = f * (0,0462 * EMh + 1,9193) \quad r^2 = 0,94 \quad n = 15$$

Calculada la regresión lineal que ajusta los valores de las medidas realizadas con el SEM con los de conductividad del extracto de pasta saturada, es posible relacionar los valores obtenidos con los niveles de referencia más utilizados. Las unidades de suelo U1B, U3 y U5B presentan, en general, niveles de salinidad inferiores a 8 dS/m; los niveles de salinidad más alarmantes se dan en las unidades U2 y U5A, cuyos valores superan los 8 dS/m en la práctica totalidad de sus 400 ha.

Se observa una gran variabilidad espacial de la salinidad incluso dentro de una misma parcela, siendo mayor la concentración de sales en la zona de desmonte que en la de terraplén.

De los 350 puntos de observación se asignó a cada una de las parcelas centrales de 20 ha el valor de CE_{smax}, del punto de mayor CE_{smax} de los 5 pertenecientes a cada cuadrícula. Éste valor de CE_{smax} junto con el de cada calicata se trasladó sobre las fotografías aéreas (E1:25 000), obteniendo así el mapa de salinidad del área afectada por el presente proyecto. Con esta información se procedió a asignar la fase salina final a cada unidad de suelo. En algún caso se modificaron los límites de algunas unidades cartográficas.

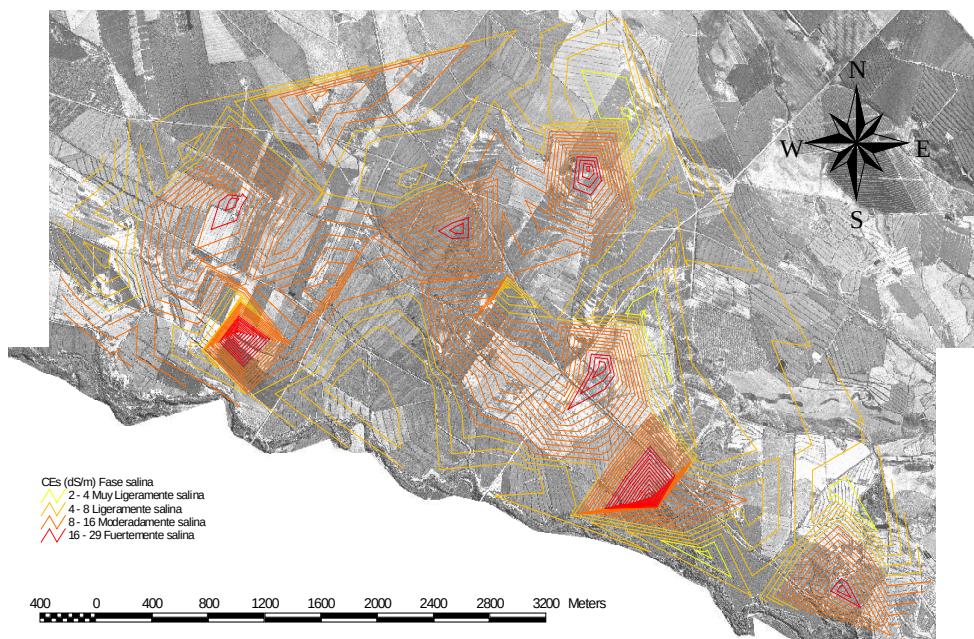


FIGURA 5. Mapa de salinidad

3. Metodología

En instalaciones de riego de alta eficiencia, como previsiblemente se equipará la zona de estudio, los excesos de agua debidos al lavado de mantenimiento serán caudales a evacuar por la red de drenaje.

3.1. Programación de riegos adaptados a los cultivos, clima y suelo de la zona

Por el método de balance de agua se ha elaborado el calendario de riegos para cada grupo de unidades de suelo con similar «déficit permisible-DP» (Villalobos et ál., 2002), optando por regar cuando se haya alcanzado este, o lo que es lo mismo consumido un 30% del agua correspondiente al Intervalo de Humedad Disponible o capacidad total de almacenamiento.

Los déficit permisibles y déficit permisibles medios utilizados para calcular el calendario de riegos, en cada unidad y para los cultivos de mayor demanda de agua: alfalfa (profundidad radical 90 cm) y maíz (profundidad radical 70 cm) se muestran en la tabla siguiente.

Unidad	Alfalfa (90 cm)		Maíz (70 cm)	
	DP (mm)	DP med (mm)	DP (mm)	DP med (mm)
C1	19,82	20	19,82	20
C7	29,01	29	29,01	29
C2	37,29	36	29,21	28
C4	35,93		28,20	
C8	36,32		27,77	
C3	38,74	38	30,18	30
C5	38,23		29,85	
C6	39,11		30,48	

TABLA 4. Resumen de los déficit permisibles y déficit permisibles medios en cada unidad y para los cultivos: alfalfa (90 cm) y maíz (70 cm)

3.2.- Lavado de mantenimiento

En la dosis de riego se debe asegurar un exceso de agua que percole a través de la zona radicular, lavando las sales del suelo y manteniendo unos niveles de salinidad que no afecten al rendimiento de los cultivos.

Las necesidades de lavado de mantenimiento en las diferentes unidades se calculan con la ecuación de equilibrio de sales.

	ETc-Pe (mm/año)	Ce/100 (dS/m)	R : necesidades de lavado (mm/año)							
			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Maíz	656	1,7	200	134	159	155	171	146	102	150
Alfalfa	930	2	231	177	207	204	222	194	120	202

TABLA 5. Necesidades en mm/año para lavado de mantenimiento

El riego efectivo se calcula para cada cultivo mediante la fórmula:

$$I = ETc - Pe + R - G$$

	I : riego efectivo (mm/año)							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Maíz	856	729	753	744	761	731	758	724
Alfalfa	1161	1046	1074	1066	1086	1053	1050	1051

TABLA 6. Riego efectivo en mm/año

El porcentaje de lavado respecto al riego efectivo es la «Fracción de Lavado» (FL), y sus valores para cada unidad se presentan en la tabla 7.

Las necesidades de lavado de mantenimiento en las diferentes unidades se calculan con la ecuación de equilibrio de sales

Unidad de Suelo	F _L							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Maíz	0.23	0.18	0.21	0.21	0.22	0.20	0.13	0.21
Alfalfa	0.20	0.17	0.19	0.19	0.20	0.18	0.11	0.19

TABLA 7. Fracción de lavado (Relación entre lavado de mantenimiento y el riego efectivo)

3.3. Dosis de riego efectivo

La dosis de riego efectivo en (mm/riego), es igual al déficit permisible DP más las necesidades de lavado de mantenimiento R, parámetros que vienen determinados por cada unidad de suelo y cultivo, y se calcula según la formula siguiente:

$$I = R + DP = \frac{DP}{(1 - F_L)}$$

Los resultados que se obtienen se muestran en la tabla 8:

Unidad	Alfalfa (90cm)		Maíz (70cm)	
	DP (mm)	I (mm)	DP (mm)	I (mm)
C1	20	25	20	26
C2	37	45	29	36
C3	39	48	30	38
C4	36	44	28	36
C5	38	48	30	38
C6	39	48	30	38
C7	29	33	29	34
C8	36	45	28	35

TABLA 8. Dosis de riego efectivo

3.4. Cálculo de los caudales máximos a evacuar por la red drenaje

De la diferencia entre el riego efectivo (I) y el déficit permisible (DP) se obtienen las pérdidas de lavado (R) (en mm/riego).

Con las pérdidas de lavado de los dos cultivos de mayor riego efectivo y teniendo en cuenta las máximas frecuencias de riegos (t =días entre riegos) calculadas para el mes de julio se obtiene el caudal unitario de diseño (R') (en l/s ha).

Unidad de suelo	Alfalfa					Maíz				
	(mm/riego)			t	R'	(mm/riego)			t	R'
	I	DP	R	(días)	(l/s ha)	I	DP	R	(días)	(l/s ha)
C1	25	19,82	5,18	3	0,2	26	19,82	6,18	3	0,24
C2	45	37,29	7,71	5	0,18	36	29,21	6,79	4	0,2
C3	48	38,74	9,26	5	0,21	38	30,18	7,82	5	0,18
C4	44	35,93	8,07	5	0,19	36	28,2	7,8	4	0,23
C5	48	38,23	9,77	5	0,23	38	29,85	8,15	5	0,19
C6	48	39,11	8,89	5	0,21	38	30,48	7,52	5	0,17
C7	33	29,01	3,99	4	0,12	34	29,01	4,99	4	0,14
C8	45	36,32	8,68	5	0,2	35	27,77	7,23	4	0,21

TABLA 8. Pérdidas de lavado (l/s ha) en alfalfa y maíz para cada unidad de suelo

Para los cálculos en cada unidad, se toma el mayor valor de R' (caudal unitario de diseño), en l/s ha.

Sobre plano altimétrico se delimitaron las parcelas que, por su situación topográfica, podrían drenar agua como consecuencia de sus pérdidas de lavado, a

cada pozo o tramo de la red de drenaje. Después se calculó la superficie de las mismas (superficie regable) que, multiplicada por los caudales unitarios de diseño, permite obtener los caudales máximos a evacuar en cada superficie.

3.5. Dimensionado de los drenajes

Para calcular los diámetros de los drenajes, se considera que el calado alcance como máximo la mitad del diámetro.

El diámetro teórico, con el cual el calado es igual a la mitad del diámetro, se obtiene con la siguiente fórmula despejada de Manning:

$$d = \left(\frac{8}{\pi} \times 4^{\frac{2}{3}} \times \frac{Q \times n}{\sqrt{i}} \right)^{\frac{3}{8}}$$

Donde:

d : diámetro teórico (m)

Q : caudal (m³/s) = Superficie regable (ha) x R' (l/s ha)

i : pendiente motriz del dren (m/m)

n: coeficiente de rugosidad de Manning n = 0,008 para PVC interiormente liso

El diámetro elegido es el diámetro comercial más próximo superior al teórico. Para este se calcula la velocidad con la fórmula de Manning:

$$V = \frac{Rh^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{i}}{n}$$

Donde:

V: velocidad media de la sección de agua (m/s)

Rh: radio hidráulico del dren

$$Rh = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right) \times d_0$$

Donde:

θ: ángulo formado por los límites del calado y vértice en el centro del dren (radianes)

d₀: diámetro interior comercial (m)

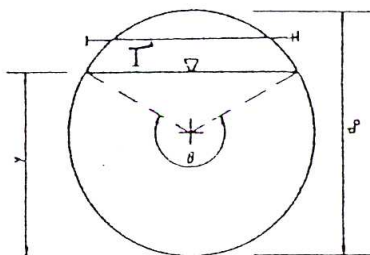


FIGURA 5.- Sección de la tubería de drenaje

El valor del ángulo θ se obtiene de:

$$\frac{Q \times n \times 8 \times 4^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{i} \times d_o^{\frac{8}{3}}} = (\theta - \text{sen} \theta) \times \left(1 - \frac{\text{sen} \theta}{\theta}\right)^{\frac{2}{3}}$$

Para evitar la colmatación de los drenes por efecto de la sedimentación de los limos presentes en el agua de lavado, se diseña el trazado de los tramos de modo que la velocidad del agua que circula por el tubo de diámetro comercial elegido para cada tramo sea superior a 0,35 m/s.

4. Resultados

Se elije el colector de tubo perforado de plástico enterrado, que recogerá el agua de lavado en 49 tramos que suman una longitud total de 43.124 m.

El material del tubo será PVC. Se proyecta en tubo perforado con la pared interior lisa y la exterior nervada, y con la suficiente resistencia mecánica para evitar deformaciones.

4.1. Diámetros de los drenes y secciones de la zanja

Los desagües en tubo de plástico enterrado se prevén con diámetros de 0,200 m (39.708 m) y 0,250 m (3.416 m). Se ha desechado la construcción de tubos con diámetros inferiores a 0,200 m, pese a ser más baratos, por no encontrarse de pared interior lisa, lo que dificultaría el cumplimiento de la velocidad mínima adoptada.

El tubo descansará sobre una capa de gravas seleccionadas de 5 cm de espesor y será recubierto del mismo tipo de gravas hasta 20 cm por encima de la generatriz superior del tubo. La función de estas gravas es doble: por una parte aumenta la resistencia de los tubos al aplastamiento y, por otra, ejerce la función de filtro facilitando al mismo tiempo la captación de agua hacia el tubo.

El talud de la zanja de excavación será 1:3.

La rasante se ha trazado de forma que la generatriz superior esté a una profundidad mínima de 1 m de forma que la presencia del tubo no interfiera en las labores agrícolas.

4.2. Características de los tubos de drenaje

El material elegido es Policloruro de Vinilo (PVC) corrugado e interiormente liso, doble pared, diámetros interiores 196 mm. y 244 mm. Correspondientes, respectivamente, a los diámetros nominales 200 y 250, perforados en el valle del corrugado a lo largo de un arco de 220°.

Coeficiente de rugosidad (n) 0.008

Velocidad máxima permitida (m/s) 2.5-3

4.3. Características de los pozos drenantes (areneros)

La entrada del agua a la red de drenajes se produce esencialmente por los pozos drenantes, ya que es en estos donde se conectan los drenajes de parcela a la red y vierten el agua de lavado. A parte de recoger el agua, también harán la función de «saltos» en los puntos de rotura de pendiente de la rasante del drenaje.

Los pozos se construirán en los vértices del trazado. El pozo drenante consiste en un tubo de 80 cm de diámetro, perforado en todo su arco, del mismo material que el constituyente del drenaje (PVC perforado), que está colocado verticalmente sobre el terreno. En la parte inferior se realizará una abertura para poder entroncar el dren o drenes.

La separación entre pozos drenantes oscila entre 100 y 200 m, dependiendo de las características topográficas y de los límites de las propiedades por las que discurre el dren, ya que debe servir de conexión de los drenajes de parcela, y todos los propietarios deben tener acceso a la misma por medio de un pozo drenante. El número total de pozos es 344.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN R., PEREIRA L., RAES D., Y SMITH M. 1998. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. FAO Roma.
- GARCÍA J.F. Y VIRGILI J.M. 1996. Utilización del sensor electromagnético en la cartografía detallada de suelos: determinación de fases salinas. IV Congreso de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo, Comunicaciones. Universitat de Lleida. 231-236.
- GISBERT J.M. 2002 Taxonomía de suelos Soil Taxonomy-99 U.P.V. Valencia.
- HERRERO C., BOIXADERA J., DANÉS, R. Y VILLAR, J.M. 1993. Mapa de sòls de Catalunya 1:25 000. Bellví 360-1-2 (65-28). Direcció General de Producció e Indústries Agroalimentàries. Institut Cartogràfic de Catalunya. Generalitat de Catalunya. Barcelona.

- IRYDA. 1985. Normas para proyectos de riego por aspersión. MAPA (IRYDA). Madrid.
- MARTÍNEZ BELTRÁN J. Bases técnicas de diseño de sistemas de drenaje. MAPA (IRYDA). Madrid.
- NOGUÉS J. 2002 Mapa de suelos (E 1/25 000) de Barbués y Torres de Barbués (Huesca) Consejo de la Protección de la Naturaleza de Aragón Zaragoza.
- PIZARRO F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Agrícola española S.A. Madrid.
- PORTA J.; LÓPEZ-ACEVEDO M. Y ROQUERO C.. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa. 3.^a ed.
- RENASA. 1976. Estudio de suelos de los sectores I al XXII de la zona regable del Cinca (Huesca). Madrid
- SOIL SURVEY STAFF. 2006. Keys to Soil Taxonomy, 10th ed., USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/Soil_Taxonomy/keys/keys.pdf
- URBANO P. 1995. Tratado de Fitotecnia General. Mundi Prensa. Bilbao
- URBANO P. 1995. Aplicaciones fitotécnicas. Mundi Prensa. Bilbao
- VAZQUEZ A. 1999. Saneamiento y drenaje construcción y mecanización. Agrícola Española S.A. Madrid
- VILLALOBOS F.J., MATEOS L., ORGAZ F. Y FERERES E. 2002. Fitotecnia: bases y tecnología de la producción agrícola. Mundi Prensa. Madrid.

Caso II.1.5. Quema y manejo de rastrojos en cultivos de la precordillera de la VIII Región de Chile.

1. Introducción

La precordillera andina de la VIII Región se encuentra visiblemente deteriorada por la actividad agrícola tradicional que se ha desarrollado en el área. Por ser suelos ondulados en su mayoría, con pendientes variables, la erosión hídrica ha estado permanentemente deteriorando la capa arable de los suelos derivados de cenizas volcánicas, durante la época invernal, que es donde se concentra la mayor pluviometría. Por ejemplo, en pendientes del 11%, cultivadas con cereales bajo condiciones de manejo convencional, se han registrado pérdidas de suelo anuales de 35 ton ha^{-1} (Peña, 1995).

Hace más de una década, un número importante de productores de esta zona ha introducido en sus siembras, la práctica de la cero labranza. Esta técnica ha significado un avance importante en lo que implica un menor deterioro del suelo. No obstante, la quema de rastrojos continúa siendo una práctica habitual entre estos mismos productores y está muy extendida en Chile. Algunas de las razones que se mencionan para realizar quemas son la rápida eliminación de un gran volumen de residuos y facilidad para la posterior siembra directa.

A nivel mundial, el uso creciente de fertilizantes químicos en las últimas cuatro a cinco décadas ha significado un menor uso de coberturas vegetales y materia orgánica (Power y Papendick, 1985). El incremento de rotaciones cada vez más intensivas y el alto uso de fertilizantes y pesticidas para lograr un buen crecimiento vegetal, ha resultado en un gran incremento de los rendimientos y una alta eficiencia de producción. Sin embargo, estas prácticas de manejo han significado una declinación de la materia orgánica del suelo (MOS), incremento de la erosión y contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

Recientemente, se están reconociendo las consecuencias de este manejo sobre el reciclado de nutrientes y productividad de los suelos (Goh y Nguyen, 1992). También, en los últimos años se ha incrementado la preocupación en aspectos ambientales relacionados con la calidad de suelos y producción de cultivos, lo que ha producido un renovado interés en los residuos vegetales, abonos verdes y otras fuentes de materia orgánica y nutrientes para los cultivos.

Los residuos vegetales o rastrojos son un importante recurso natural que no se debería despreciar. Los rastrojos están recibiendo gran atención debido a sus diversos efectos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Las cantidades de nutrientes que pueden retornar anualmente al suelo como residuos vegetales son considerables, por lo cual requieren mayor atención. En

Chile, los residuos producidos por los tres principales cereales sembrados (trigo, avena, maíz) se estiman en cuatro millones de toneladas por año y la cantidad total de los principales nutrientes ($N+P_2O_5+K_2O$) alcanza una cifra de 113 000 ton año⁻¹.

El objetivo del presente trabajo ha sido cuantificar el rendimiento de trigo, avena, colza y lupino sembrados bajo cero labranza, empleando diferentes sistemas de manejo y niveles de rastrojos y, además, medir algunos aspectos relacionados con fertilidad, retención de agua y temperatura del suelo. Cabe señalar, que la información presentada ha sido generada en dos temporadas agrícolas (2000-1 y 2001-2) y debe ser complementada con los resultados de un tercer año, que es período de duración del proyecto FONDEF 9911081.

2. Materiales y métodos

2.1. Sitios experimentales y tratamientos empleados.

Se establecieron ocho sitios experimentales, los cuales se indican en la tabla 1 y figura 1. La mitad de estos se orientaron a estudiar el efecto del factor de manejo de residuos, y en los otros sitios, se midió la influencia de diversos niveles de residuos sobre el rendimiento de los cultivos trigo, avena, colza y lupino.

La mayor parte de los sitios están ubicados en suelos de la serie Sta. Bárbara (*Typic Haploxerands*). Son suelos poco evolucionados, formados sobre cenizas volcánicas recientes depositadas sobre sustratos fluvio-glaciales o materiales fluviales difícilmente detectables por la profundidad en que se encuentran. Son suelos profundos a muy profundos, bien drenados, de texturas franca a franco limosa en el primer horizonte y franco limosa en profundidad, bien estructurados, de buen arraigamiento, muy porosos y sin gravas en los primeros 160 cm. Las pendientes superiores a 30% se asocian a una erosión moderada; sectores con un 50% muestran erosión moderada a severa.

Sitio	Productor	Factor estudio	Suelo	Ubicación geográfica Lat S Long W	Comuna	Cultivos	Año siembra
IM1	I. Martínez	Manejo residuos	Sta. Bárbara, franco limoso	36°56'52'' 71°59'39''	El Carmen	Trigo	2000
						Avena	2001
JM2	J.G. Martínez	Manejo residuos	Sta. Bárbara, franco limoso	36°58'23'' 71°56'02''	El Carmen	Avena	2000
						Trigo	2001
JH3	J. Harismendy	Manejo residuos	Sta. Bárbara, franco limoso	37°34'45'' 71°59'56''	Sta. Bárbara	Raps	2000
						Trigo	2001
FC4	F. Cruz	Manejo residuos	Collipulli, franco arcillo limoso	37°43'33'' 72°11'30''	Mulchén	Avena	2000
						Trigo	2001
WS5	W. Solar	Niveles residuos	Sta. Bárbara, franco limoso	37°38'31'' 71°59'56''	Sta. Bárbara	Avena	2000
						Trigo	2001
OR6	J. Rojas	Niveles residuos	Collipulli, franco arcillo limoso	37°45'51'' 72°08'54''	Mulchén	Trigo	2000
						Avena	2001
JR7	J. Rodríguez	Niveles residuos	Sta. Bárbara, franco limoso	37°48'8'' 72°09'33''	Mulchén	Raps	2000
						Lupino	2000
						Trigo	2001
JA8	J.C. Allende	Niveles residuos	Arrayán, franco limoso	36°48'14'' 72°11'50''	Bulnes	Trigo	2000

TABLA 1. Ubicación de los sitios experimentales, nombre del productor, factor de estudio, cultivo y año de siembra

El suelo Collipulli (*Typic Rhodoxeralfs*) corresponde a un suelo evolucionado, desarrollado a partir de cenizas volcánicas antiguas, descansando sobre un sustrato constituido por un conglomerado fluvioglacial, parcialmente meteorizado de composición andesítico-basáltica. Moderadamente profundo, de textura fina en superficie y fina a muy fina en profundidad. Presenta drenaje bueno a imperfecto en los sectores bajos, siendo su permeabilidad moderada. Ocupa una posición de lomajes remanentes de topografía ondulada y es altamente susceptible a la erosión hídrica.

Por último, el suelo Arrayán (*Typic Melanoxerands*), que cubre solamente un sitio experimental, es un suelo formado sobre cenizas volcánicas recientes depositadas sobre un sustrato constituido por tobas, materiales fluviales, materiales fluvioglaciales que se presentan compactados y que son lentamente permeables. Son suelos profundos, bien drenados, de texturas medias, bien estructurados en superficie y abundante porosidad. Se ubican en una topografía plana a casi plana.

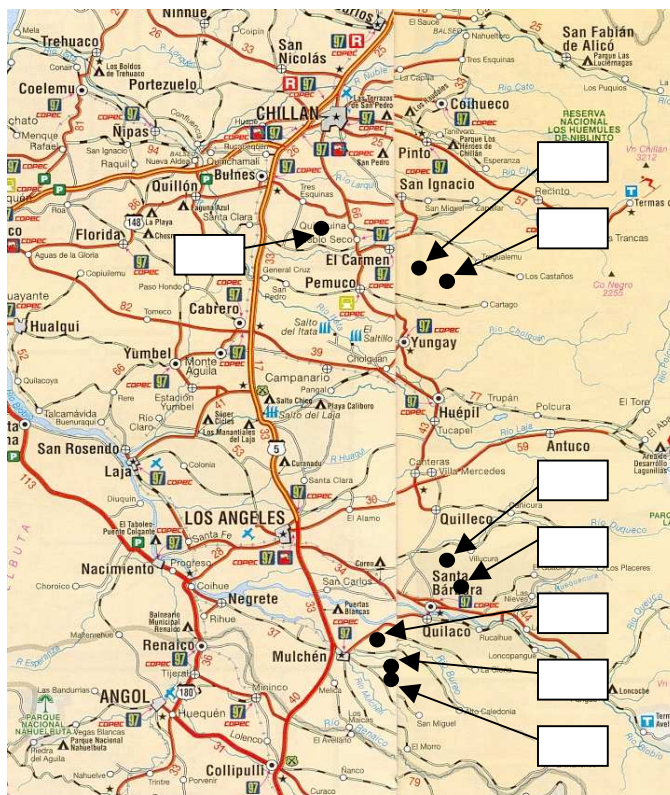


FIGURA 1. Ubicación de los sitios experimentales (300-450 m sobre nivel del mar)

Los tratamientos aplicados en los sitios referentes a manejo de residuos corresponden a:

- I(a). Quema
- II(a). Rastrojo hilerado
- III(a). Rastrojo picado
- IV(a). Rastrojo parado

En el tratamiento I(a), se quemó la totalidad de los rastrojos del cultivo anterior en los meses de marzo a abril. En el tratamiento II(a), se procedió a hiliar los rastrojos del cultivo anterior con un rastrillo, dejando una franja libre para cultivo que varió entre los sitios de 9 a 15 metros de ancho, quedando una superficie sin siembra equivalente a un 8 a 13% de la superficie total. En el

tratamiento III(a) se procedió a picar y distribuir los rastrojos del cultivo anterior con segadora de cuchilla horizontal alrededor de un mes antes de siembra. En los sitios que se cosechó con automotriz, con aditamento picador y distribuidor, no se efectuó ninguna labor posterior. En tanto, en el tratamiento IV(a) se cosechó el cultivo más alto (40-50 cm) y se dejó la caña parada sin intervención.

En aquellos sitios donde se estudió el efecto de diferentes niveles de residuos, se aplicaron los siguientes tratamientos:

I(b). Quema: Se quemó la totalidad del rastrojo del cultivo anterior.

II(b). Nivel bajo: se enfardaron los residuos que deja la máquina cosechera

III(b). Nivel medio: se enfardó el 50% de los residuos que deja la máquina cosechera.

IV(b). Nivel alto: se dejó la totalidad del residuo del cultivo anterior.

En todos los tratamientos, con excepción de la quema, se procedió a triturar y distribuir la paja con ayuda de una máquina segadora horizontal.

2.2. Manejo de cultivos y cantidad de rastrojos

Las unidades experimentales se establecieron con la misma maquinaria que emplean los productores en sus siembras comerciales y siguiendo sus pautas de manejo en cuanto a dosis de semilla, fecha de siembra, variedades y fertilización (tabla 2). Todos los sitios recibieron una aplicación de herbicida de presiembrar correspondientes a 2,5-3,0 l ha⁻¹ de Roun-up. Posteriormente, en post-emergencia, se aplicaron herbicidas de acuerdo al cultivo y tipo de malezas presentes. El tamaño de cada sitio experimental varió de 1,5 a 8 has. No se establecieron repeticiones, considerando el propósito fundamentalmente demostrativo de los ensayos y por la dificultad que hubiese significado su establecimiento con el empleo de la maquinaria disponible. Además, se estimó importante disponer de información a una escala más real, respecto al costo y tiempo empleado en las labores adicionales que implicaban los diferentes tratamientos de manejo de residuos empleados, tales como hilerado, picado y enfardado.

Las cantidades de residuos que quedaron en cada sitio experimental y el modelo de la máquina sembradora de cero labranza empleada, en ambas temporadas agrícolas, se indican en las tablas 3 y 4.

Sitio	Cultivo	Año	Variedad	Fecha siembra	Dosis semilla (kg ha ⁻¹)	Fertilización (kg ha ⁻¹)			
						N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Otros
IM1	Trigo	2000	Crak	29 may	160	203	150	44	1000 cal
	Avena	2001	Plutón	17 may	150	160	104	34	
JM2	Avena	2000	Llaofén	6 may	160	170	119	35	
	Trigo	2001	Crak	18 jun	180	210	150	134	2000 cal
JH3	Raps	2000	Lysabeth	18 abr	8.3	190	180	56	500 yeso, 700 cal
	Trigo	2001	Crak	15 may	205	174	168	66	
FC4	Avena	2000	Plutón	27 may	190	180	95	30	500 yeso, 1000 cal
	Trigo	2001	Dalcahue	16 jun	240	230	118	77	
WS5	Trigo	2000	Crak	17 may	195	180	150	50	
	Avena	2001	Llaofén	16 may	150	160	95	30	
OR6	Avena	2000	Plutón	24 may	165	170	116	39	500 yeso, 300 cal
	Trigo	2001	Crak	5 may	225	197	149	63	
JR7	Raps	2000	Lysabeth	14 abr	8.5	187	173	0	400 yeso
	Lupino	2000	Danya	17 may	140	9	77	0	
	Trigo	2001	Barredor	7 may	190	161	147	8	
	Trigo	2001	Barredor	7 may	190	161	147	8	
JA8	Avena	2000	Plutón	20 may	160	160	90	30	

TABLA 2. Antecedentes sobre cultivo, variedad, fecha de siembra y fertilización efectuada en los sitios experimentales en las temporadas agrícolas 2000-1 y 2001-2

Sitio	Factor en estudio	Tipo rastrojo	Cultivo sembrado	Máquina siembra	Tratamiento Rastrojo	Cantidad (ton ha ⁻¹)
IM1	Manejo	Avena	Trigo	John Deere 752	Hierbado	2.5
					Picado	6.7
					Pasado	6.7
JM2	Manejo	Trigo	Avena	John Deere 752	Hierbado	3.5
					Picado	7.7
					Pasado	7.7
JH3	Manejo	Trigo	Raps	Great Plane	Hierbado	2.2
					Picado	7.2
					Pasado	7.2
FC4	Manejo	Trigo	Avena	Baldan SP F/A 2200	Hierbado	1.6
					Picado	4.0
					Pasado	4.0
WS5	Niveles	Avena	Trigo	Great Plane	Nivel Bajo	0.7
					Nivel Medio	2.1
					Nivel Alto	3.0
OR6	Niveles	Trigo	Avena	Great Plane	Nivel Bajo	1.9
					Nivel Medio	3.0
					Nivel Alto	4.8
JR7	Niveles	Trigo	Raps	Great Plane	Nivel Bajo	3.0
					Nivel Medio	4.4
					Nivel Alto	8.2
		Trigo	Lupino	Great Plane	Nivel Bajo	3.0
					Nivel Medio	4.4
					Nivel Alto	8.2
JA8	Niveles	Avena	Trigo	John Deere 752	Nivel Bajo	— ⁽¹⁾
					Nivel Medio	3.0
					Nivel Alto	5.9

⁽¹⁾ Se consideraron solo dos niveles de rastrojos

TABLA 3. Tipo y cantidad de residuos en cada unidad experimental en la temporada agrícola 2000-2001 y maquinaria de cero labranza empleada

Sitio	Factor en estudio	Tipo rastrojo ⁽¹⁾	Cultivo a sembrar	Máquina siembra	Tratamiento Rastrojo	Cantidad (Ton/ha)
IM1	Manejo	Trigo+avena	Avena	John Deere 752	Hilerado	3.3
					Picado	9.3
					Parado	12.6
JM2	Manejo	Avena+trigo	Trigo	John Deere 752	Hilerado	1.7
					Picado	6.8
					Parado	8.4
JH3	Manejo	Raps+trigo	Trigo	Great Plane	Hilerado ⁽²⁾	8.0
					Picado ⁽²⁾	7.9
					Parado ⁽²⁾	9.1
FC4	Manejo	Avena+trigo	Trigo	Baldan SP F/A 2200	Hilerado	2.9
					Picado	3.9
					Parado	5.8
WS5	Niveles	Trigo+avena	Avena	Great Plane	Bajo	3.8
					Medio	4.6
					Alto	6.9
OR6	Niveles	Avena+trigo	Trigo	Great Plane	Bajo	4.0
					Medio	5.5
					Alto	6.2
JR7	Niveles	Raps+trigo	Trigo	Great Plane	Bajo	2.5
					Medio	2.9
					Alto	4.6
		Lupino+trigo	Trigo	Great Plane	Bajo	1.7
					Medio	2.2
					Alto	4.0
P1 ⁽³⁾		Trigo	Avena	John Deere 752		
P2 ⁽³⁾		Avena	Trigo	Baldan SP F/A 2200		
P3 ⁽³⁾		Avena	Trigo	Great Plane		

TABLA 4. Tipo y cantidad de residuos en cada unidad experimental en la temporada agrícola 2001-2002 y maquinaria de cero labranza empleada. El sitio JA8 no fue sembrado y se incluyeron 3 sitios satélites

⁽¹⁾ El primer tipo de rastrojo indicado corresponde al cultivo del año anterior y el segundo tipo de rastrojo corresponde al remanente del cultivo del primer año.

⁽²⁾ En la segunda temporada se dejó la totalidad del rastrojo de raps sin alteración (parado), por lo tanto, el tratamiento de manejo de residuos corresponde a lo que se hizo el 1.º año.

⁽³⁾ El año 2001 tres productores sembraron un potrero considerando el tratamiento de rastrojo picado.

2.3. Evaluaciones.

Se consideraron las siguientes evaluaciones en los diferentes sitios experimentales y tratamientos:

- Caracterización física y química del suelo.
- Registro climático con estaciones meteorológicas automáticas marca Davis.
- Análisis químico de suelo antes de siembra y después de cosecha.
- Temperatura de suelo en un evento de quema de rastrojo (un solo sitio).

- Análisis de N disponible en el perfil de suelo (0 a 90 cm) en el 2.º año.
- Análisis químico de plantas y rastrojo.
- Determinación de humedad en el perfil de suelo a través del ciclo de crecimiento con el equipo Diviner 2000.
- Determinación de la temperatura del suelo en tres estratos de suelo.
- Porcentaje de germinación del cultivo.
- Componentes de rendimiento.
- Determinación de clorofila.

Cabe señalar que la información de análisis físicos, químicos, temperatura, clorofila y humedad del suelo, bajo los diferentes tratamientos de manejo de residuos, no se consideran en el presente artículo, puesto que serán materia de un informe separado.

Los datos fueron sometidos a análisis de varianza considerando los sitios experimentales como repeticiones, además. se realizaron regresiones simples y múltiples con las diferentes variables estudiadas.

2.4. Información climática del área de estudio

En las figuras 2 y 3 se presenta el registro de precipitación y temperatura media mensual de las estaciones meteorológicas instaladas en la comuna de Mulchén (36°40'09'' lat S y 72°08'18,6'' long.W) y El Carmen (36°54'39,2'' lat S y 71°53'48'' long W).

El régimen térmico de esta zona se caracteriza por una temperatura media anual de 14 °C, con una máxima media del mes más cálido (enero) de 28,8 °C y una mínima media del mes más frío (julio) de 3,5 °C. El período libre de heladas aprovechable es de 5 meses, noviembre a marzo. La suma anual de temperaturas, base 5 °C, es de 3.300 grados-días y base 10 °C, de 1.600 grados-días. Las horas de frío, de marzo a diciembre, llegan a 1.400. La temperatura media mensual se mantiene sobre 8 °C, excepto en julio que es de 7,9 °C.

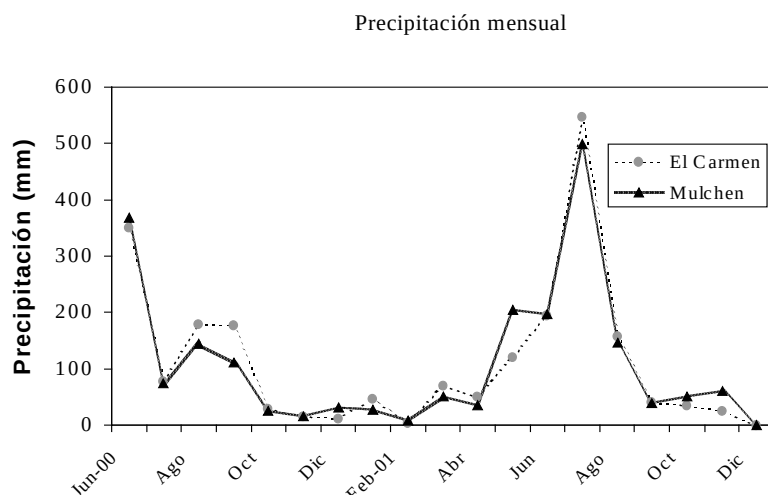


FIGURA 2. Precipitación mensual en la comuna de El Carmen y Mulchén, en el período junio 2000 a diciembre 2001

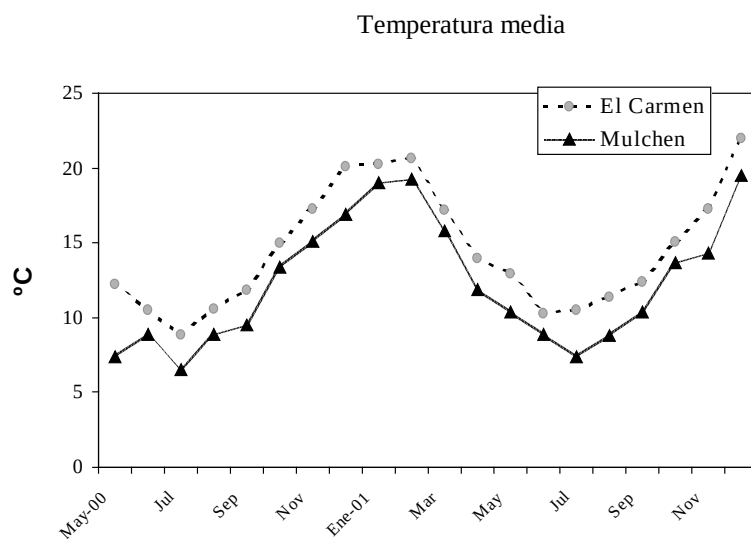


FIGURA 3. Temperatura media en la comuna de El Carmen y Mulchén en el período junio 2000 a diciembre 2001

El régimen hídrico se caracteriza por una precipitación anual de 1.025 mm, siendo el mes de junio el más lluvioso, con 217 mm. La lluvia de lixiviación alcanza a 644 mm. La evaporación de bandeja llega a 1.331 mm anuales, con un máximo mensual en enero de 245 mm y un mínimo en junio, de 16 mm. La estación seca es de 4 meses, diciembre a marzo inclusive.

2.5. Análisis químicos del suelo al inicio de los ensayos

N.º sitio	Profundidad (cm)	pH	MO (%)	N (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)	S-SO ₄ (mg kg ⁻¹)	Suma de bases (cmol kg ⁻¹)
1	0-5	5.97	16.6	4	43	210	9	13.1
	5-10	5.86	14.5	4	32	206	16	8.7
	10-20	6.04	11.8	3	8	242	16	5.9
2	0-5	5.71	15.6	49	23	436	21	13.6
	5-10	5.46	13.9	16	9	203	25	5.1
	10-20	5.7	12.8	15	6	175	8	6.1
3	0-5	5.23	14.1	64	27	470	10	8.3
	5-10	5.15	13.5	63	24	413	8	7.0
	10-20	5.27	12.7	37	9	390	15	6.1
4	0-5	5.86	9.8	30	62	943	30	25.0
	5-10	5.15	5.6	17	39	655	19	10.1
	10-20	5.04	4.8	12	24	569	18	7.2
5	0-5	5.85	16.6	39	20	354	15	14.3
	5-10	5.52	15.0	34	20	230	26	9.6
	10-20	5.44	12.9	20	8	257	37	7.5
6	0-5	5.65	7.4	18	41	756	4	16.2
	5-10	5.22	5.8	8	16	347	7	8.1
	10-20	5.30	5.7	8	13	351	7	8.4
7	0-5	5.56	12.7	23	20	460	31	17.3
	5-10	5.64	11.7	15	16	370	42	16.9
	10-20	5.67	11.2	13	11	320	35	17.4
8	0-5	5.54	12.6	51	37	503	13	12.8
	5-10	5.75	12.2	29	36	390	12	13.4
	10-20	6.12	10.1	14	12	405	14	16.4

TABLA 5. Niveles iniciales de pH, materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S-SO₄) y suma de bases a diversas profundidades de suelo al comienzo de los experimentos en el año 2000. Promedio de 3 determinaciones

3. Resultados

3.1. Rastrojos y sus usos

Los rastrojos, en general, se definen como las fracciones de las plantas que quedan en el campo después que el cultivo ha sido cosechado. En la tabla 6, se

presentan las cantidades de nutrientes contenidos en este tipo de material, después de cosecha, para los cultivos de trigo, avena, colza y lupino.

Nutriente	Contenido (kg ton^{-1} rastrojos)			
	Trigo	Avena	Colza	Lupino
Nitrógeno	5.8	5.5	7.2	7.8
Fósforo	0.4	0.3	0.5	0.4
Potasio	11.4	15.1	13.8	6.0
Azufre	1.2	1.0	1.6	2.4
Calcio	5.1	4.2	10.0	15.6
Magnesio	0.9	0.8	1.2	3.4
Zinc	0.005	0.004	0.008	0.015
Boro	0.007	0.004	0.013	0.041
Hierro	0.040	0.025	0.011	0.044
Manganeso	0.020	0.040	0.022	0.385
Cobre	0.009	0.010	0.018	0.014

TABLA 6. Cantidades de nutrientes presentes en una tonelada de rastrojos de algunos cultivos. Datos promedios de los sitios experimentales

A partir de la tabla 6 se puede inferir que los rastrojos tienen importantes implicaciones en la cantidad total de nutrientes removidos desde el suelo. Los cereales se destacan por poseer mayor contenido de elementos monovalentes como potasio. En tanto colza y lupino poseen mayor concentraciones de iones divalentes, como Calcio y Magnesio. En general, los principales elementos que contienen los diferentes cultivos son Potasio, Nitrógeno y Calcio y pueden significar un aporte importante en la rotación. Cabe señalar que estos materiales muchas veces son considerados como desechos que se deben eliminar del potrero. No obstante, tomando en cuenta su aporte nutricional, deberían ser reconocidos como un recurso natural y no como desechos.

De acuerdo a las cifras de la tabla 6 se puede inferir que una cantidad de rastrojos de trigo equivalentes a 10 ton ha^{-1} , que corresponde a un rendimiento de 7 ton ha^{-1} , aportarían 58 kg de N, 114 kg de K, 12 kg de S, 51 kg de Ca y 9 kg Mg. Al valorar solamente el precio de estos macronutrientes, considerando los fertilizantes más económicos en el mercado, se llega a una cifra de US\$ 90-100 ha^{-1} .

Al dejar este material en el suelo, se puede ahorrar una considerable cantidad de fertilizantes y, adicionalmente, agregar alrededor de 400 kg de carbono (C) por tonelada de rastrojos, lo cual puede ser un importante aporte de MO. En consecuencia, los rastrojos pueden ser usados para mejorar la calidad del suelo y su productividad, con el consiguiente ahorro en fertilizantes.

3.2. Descomposición del rastrojo y factores que influyen

En la figura 4, se presenta la cantidad de rastrojo presente al cabo de la segunda temporada de cultivo, en relación al tratamiento a que fue sometido el rastrojo el primer año. Se observó que cuando los residuos están picados, presentan una mayor velocidad de descomposición, lo cual puede incidir favorablemente a largo plazo. Al cabo del segundo año, en algunos sitios, el tratamiento con picado presentó hasta 3 ton ha⁻¹ menos de rastrojos en comparación con el rastrojo parado.

Ello puede tener como consecuencia que trozos más pequeños pueden tener mayor velocidad de descomposición que trozos de mayor tamaño, debido al incremento en el área superficial y mejor contacto con el suelo, lo que incrementa la susceptibilidad al ataque microbiano por reducción de las barreras de tejidos lignificados. A su vez, al quedar una fracción importante de rastrojos parados, se dificulta la penetración de bacterias, hongos y fauna del suelo. Cabe señalar que, aunque la fauna del suelo es responsable de una pequeña proporción (<10%) de la respiración del suelo (Juma y McGill, 1986), ellos juegan un importante papel en la tasa de descomposición por el picado y redistribución de la MO, haciéndola más accesible al ataque microbiano. Por ejemplo, Curry y Byrne (1992) informaron de un 26-47% de menor tasa de descomposición de rastrojo cuando se excluyeron las lombrices del sistema por un período de descomposición de 8 a 10 meses.

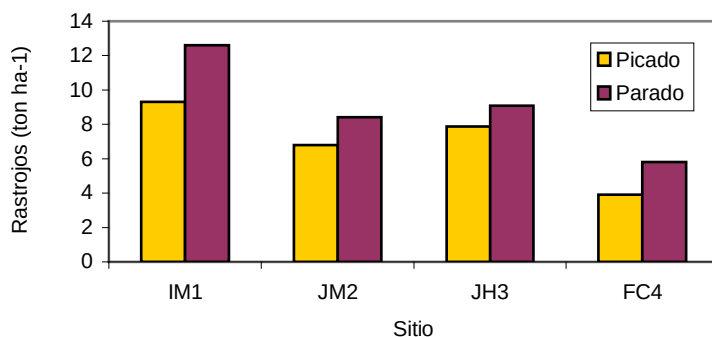


FIGURA 4. Cantidad de rastrojo presente al cabo de la segunda temporada de cultivo de acuerdo con el tratamiento a que fue sometido el rastrojo el primer año

Según algunos autores, el picado puede conducir a un aumento en la exposición de los tejidos con alto contenido de carbohidratos insolubles, lo que puede aumentar la inmovilización de N (Van Scherevan, 1964), e incrementar la

presencia de sustancias fenólicas que se caracterizan por inhibir la descomposición (Fox y otros, 1990). Ambus y Jensen (1997) informaron de que el picado produce un contacto más íntimo entre el suelo y el rastrojo, lo que incrementa la actividad microbiana en la etapa inicial de la descomposición. Estos mismos autores comprobaron que, a largo plazo, el picado no tiene efecto significativo sobre la dinámica del N. El efecto del tamaño del material sobre la dinámica del N (inmovilización-mineralización) puede ser el efecto combinado de la interacción entre contenido de arcilla y limo del suelo, composición química del rastrojo, tiempo de descomposición y actividad de la fauna y microorganismos del suelo.

Cabe señalar que la tasa de descomposición de los residuos es controlada por tres factores principales: (i) tipo de residuos, (ii) características del suelo, y (iii) manejo de los residuos. Los factores relacionados con el suelo son determinantes en áreas donde las condiciones climáticas son desfavorables, en tanto el tipo de residuos y su manejo presentan un importante papel en la regulación de la descomposición bajo condiciones climáticas más favorables. Muchos de estos factores no son independientes y el cambio en uno de ellos puede afectar a los otros. Por ejemplo, un alto contenido de agua del suelo puede resultar en una baja temperatura y aireación, en tanto, la presencia de residuos en la superficie del suelo puede afectar su contenido de humedad y temperatura, simultáneamente. Debido a estas fuertes interacciones, es muy difícil aislar el efecto de factores ambientales específicos sobre la tasa de descomposición.

Por otro lado, la composición química de los cultivos cambia drásticamente durante su período de desarrollo (Luna-Orea y otros, 1996). En plantas maduras, el contenido de proteína y constituyentes solubles al agua decrece considerablemente, mientras que la cantidad de hemicelulosa, celulosa y lignina, se incrementa.

En general, la fracción soluble al agua (azúcares, ácidos orgánicos, proteínas y parte de carbohidratos) se degrada primero (Reber y Scharer, 1971, Knapp y otros, 1983), seguida por polisacáridos estructurales (celulosa y hemicelulosa) y, posteriormente, lignina (Collins y otros, 1990). Consecuentemente, los residuos verdes de los cultivos se descomponen más rápidamente que aquellas partes de plantas más maduras (Wise y Schaefer, 1994; Cortez y otros, 1996) y como resultado liberan más nutrientes.

La dureza física de las hojas y tallos también afecta a la descomposición y es un tema que ha recibido poca atención. Gallardo y Merino (1993) desarrollaron un índice de dureza de los residuos como índice de calidad de sustrato. El contenido de Sílice es responsable de la dureza del material y afecta su descomposición (Goering y Van Soest, 1970; Ma y Takahashi, 1989). En general, se ha comprobado que un mayor contenido de Sílice retarda la descomposición.

Componente	Sitio, tipo rastrojo						
	IM1, avena	JH3, trigo	FC4, trigo	OR6, trigo	JR7, trigo	JA8, trigo	PB ⁽¹⁾ , trigo
Agua, %	5.55	5.53	6.23	6.02	5.51	5.81	5.00
Carbono, %	46.2	44.0	47.0	46.3	47.6	45.9	45.3
Nitrógeno, %	0.40	0.51	0.53	0.46	0.48	0.67	0.53
Relación C/N	116/1	86/1	89/1	101/1	99/1	69/1	85/1
Proteína, %	2.5	3.2	3.3	2.9	3.0	4.2	3.3
NS ⁽²⁾ , %	19.0	17.9	19.2	20.0	16.8	18.0	14.9
Hemicelulosa, %	28.2	30.1	30.0	31.8	29.4	30.1	28.7
Celulosa, %	44.5	41.6	41.8	40.9	44.8	42.3	47.4
Lignina, %	8.3	10.4	9.0	7.3	9.0	9.6	9.0
Índice HLQ ⁽³⁾	0.90	0.87	0.89	0.91	0.89	0.88	0.89

TABLA 7. Composición de la rastrojos procedentes de algunos sitios experimentales. Promedio de tres repeticiones. Método Van Soest.

- (1) Predio Sr. Paulo Basterrica.
- (2) Componente no estructural
- (3) Índice HLQ = (hemicelulosa + celulosa) / (hemicelulosa + celulosa + lignina)

En la tabla 7 se presenta el análisis de algunos componentes de los rastrojos procedentes de algunos sitios experimentales muestreados la primera temporada. Los rastrojos predominantes son de trigo y solamente una muestra corresponde a rastrojo de avena. Este último tipo de material presenta mayor relación C/N y respecto a los otros componentes, no se observan mayores diferencias entre estas dos especies. En general, estas fracciones se encuentran dentro de valores normales y la lignina, que es el compuesto de más difícil descomposición, se presenta en valores relativamente bajos en comparación con otras especies. Cabe señalar que las plantas contienen 15-60% de celulosa, 10-30% hemicelulosa, 5-30% lignina, 2-15% proteínas, y las sustancias solubles tales como azúcares, aminoácidos, amino azúcares y ácidos orgánicos pueden contribuir en un 10% del peso seco total (Paul y Clark, 1989). La tasa de descomposición depende de la proporción relativa de estos componentes, tales como celulosa, hemicelulosa y lignina. De acuerdo con Hagin y Amberger (1974), la vida media de los azúcares, hemicelulosa, celulosa y lignina es de 0.6, 6.7, 14.0 y 364 días, respectivamente. También, se ha comprobado que la tasa de declinación de estas fracciones baja con el tiempo y, por lo tanto, también baja la calidad del material remanente.

De acuerdo a los datos de la tabla 7, los rastrojos de avena y trigo contienen alrededor de un 44 a 47% de carbono en base peso seco, pero el contenido de nitrógeno varía en un rango mucho más amplio (0.4 a 0.67%), produciendo una variación importante en la relación C/N. Generalmente, es aceptado que los residuos con alta relación C/N se descomponen más lentamente que los residuos con relaciones más estrechas y, por consiguiente, aquellos con mayor contenido

de nitrógeno muestran una mayor tasa de descomposición y liberación de nutrientes.

Bangar y Patil (1980) comprobaron que la adición de N con el propósito de bajar la relación C/N de un rastrojo de trigo (75/1) incrementó significativamente la actividad microbiana y su tasa de descomposición. Christensen (1986) informó que un 44% del rastrojo (0.92% N) se descompuso durante el primer mes de incubación, comparado con solo un 7% de un rastrojo con 0.4% N. Douglas y otros (1980) informaron de un 15% de pérdida de peso en 60 días cuando el contenido de N del residuos de trigo era menor de 0.55% N y, cuando el residuo contenía más de 0.55% N, la pérdida de peso se incrementó a un 30% en el mismo período.

Respecto a la lignina, se ha comprobado que es un inhibidor del proceso de descomposición (Hammel, 1997; Giller y Cadisch, 1997). Se sabe que la lignina es una sustancia recalcitrante, altamente resistente a la descomposición microbiana (Mellilo y otros, 1982), y solamente muy pocos microorganismos pueden degradarla y estos son exclusivamente aeróbicos (Jenkinson, 1988). Muchos investigadores han encontrado que un incremento en la concentración de lignina reduce la descomposición y la liberación de nutrientes desde los rastrojos y se incrementa la inmovilización de N (Aber y otros, 1990; Tian y otros, 1992). Muller y otros (1988) y Rutigliano y otros (1996) encontraron que la concentración de lignina fue mucho mejor indicador de la descomposición de residuos que la concentración de N.

En relación a los factores de suelo que influyen sobre la descomposición, cabe señalar los siguientes: pH, temperatura, contenido de humedad, disponibilidad de nutrientes, N disponible, textura y estructura del suelo y biomasa microbiana. El pH es uno de los factores más importantes que influyen la velocidad de descomposición, pero todos los factores indicados influyen sobre el tipo y tamaño de la población de microorganismos y, por ende, en su velocidad de descomposición.

Respecto al manejo de los rastrojos: la cantidad agregada, el método de aplicación y accesibilidad son factores que influyen la velocidad de descomposición. Existen experiencias de laboratorio y campo que demuestran que la velocidad de descomposición de los rastrojos es proporcional a la cantidad inicialmente presente. También, existen otros estudios que indican que la velocidad de descomposición es independiente de la cantidad agregada, siempre que esta no exceda un 1,5% del peso seco del suelo. Sin embargo, muchos de estos estudios se han efectuado mezclando el suelo con el rastrojo, que no es el caso de la cero labranza con residuos sobre el suelo. Para residuos sobre el suelo, Stott y otros (1990), estudiando tres niveles de rastrojos sobre el suelo (1.680, 3.360 y 6.720 kg ha⁻¹), informaron que el nivel más bajo presentó una mayor

velocidad de descomposición. Las diferencias que se pueden manifestar respecto a la descomposición de diferentes cantidades de rastrojos pueden estar relacionadas con la disponibilidad de N en el suelo. Si en ciertas condiciones, el N es limitante, este puede ser solo suficiente para la descomposición de una pequeña cantidad de rastrojo de baja calidad, pero se puede retardar la descomposición si la cantidad de residuos es muy alta.

La accesibilidad de los residuos a la acción de los microorganismos es de primera importancia en la velocidad de descomposición. El método de aplicación, tal como tamaño de la partícula y localización, puede proveer diferente grado de accesibilidad, la cual afecta su velocidad de destrucción y los procesos de inmovilización-mineralización. Muchos estudios indican que la incorporación de los residuos en el suelo incrementa su velocidad de descomposición, en comparación con los residuos sobre la superficie del suelo (Douglas y Rickman, 1992; Buchanan y King, 1993; Schomberg y otros, 1994). La velocidad más lenta de descomposición de los residuos sobre el suelo es consecuencia probablemente a que está sometido a condiciones más desfavorables para la descomposición, particularmente, a fluctuaciones de temperatura y humedad que limitan la actividad microbiana. La incorporación del rastrojo permite a los microorganismos tener mayor acceso a nutrientes y otros factores que favorecen su actividad.

Los factores climáticos como lluvia y temperatura, afectan considerablemente la descomposición (Schomberg y otros, 1996). La pérdida de MO en regiones cálidas son un serio inconveniente. Por ejemplo, en Nigeria (trópico húmedo) se encontró una velocidad de descomposición cuatro veces mayor que en Inglaterra (Templado húmedo) (Jenkinson y Ayanaba, 1977).

En la zona centro-sur de Chile, las bajas temperaturas en invierno y suelo seco en verano limitan la descomposición y acción de los microorganismos. Por ello, en primavera y otoño, donde predominan mejores condiciones de humedad y temperatura, deberían darse las mayores velocidades de descomposición.

3.3. Quema de rastrojos

Una de las principales ventajas de la quema es la rápida limpieza del suelo antes del establecimiento del próximo cultivo, facilitando la germinación y establecimiento. La intensidad de la quema está determinada principalmente por el contenido de humedad de los residuos. Cuando prevalecen condiciones frías y húmedas, no se logra una buena quema si los residuos también están húmedos. Felton y otros (1987) recomiendan, en casos que la quema sea inevitable, que debería procederse después de un período de lluvia, para minimizar las pérdidas por lixiviación de los nutrientes liberados.

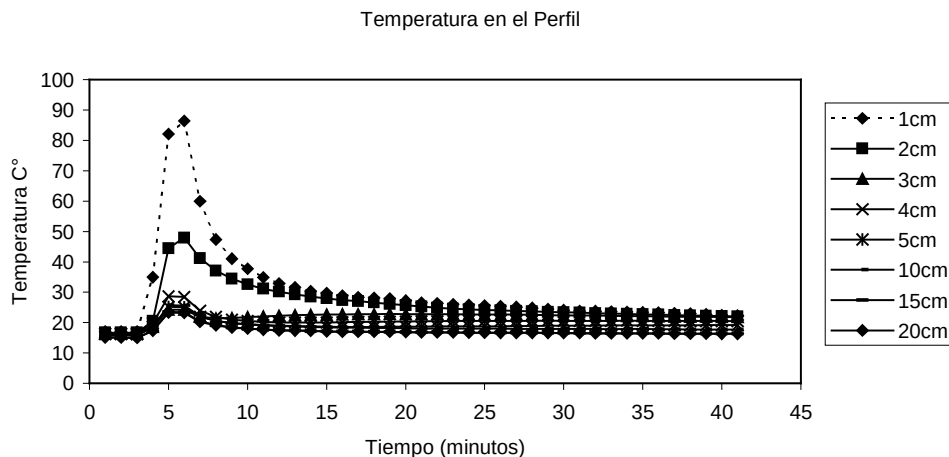


FIGURA 5. Temperatura registrada en el perfil de suelo (1 a 20 cm) después de una quema de 6.5 ton ha⁻¹ de rastrojo de avena. Contenido de agua del suelo 30% bps. Suelo Collipulli

En la figura 5 se presenta la temperatura alcanzada en el perfil de suelo con la quema de rastrojos (avena) equivalentes a 6.5 ton ha⁻¹. Se puede observar que la mayor variación de la temperatura del suelo se produjo en el primer centímetro de suelo, alcanzando alrededor de 90 °C. Sin embargo, el período de ocurrencia de esta temperatura no superó los 2 minutos. El 2.º centímetro de suelo alcanzó 50 °C en este mismo período y bajo los tres centímetros de profundidad prácticamente no se produce mayor variación en la temperatura. Se puede inferir que el efecto directo de la quema de rastrojos, con este nivel de paja, no debería afectar a la población de los microorganismos del suelo ni a sus propiedades físicas.

Por otro lado, la quema puede provocar pérdidas importantes de nutrientes como resultado del flujo convectivo directo de las cenizas y como consecuencia de la acción de arrastre por agua y viento. Simultáneamente, se pierde prácticamente la totalidad del C, S y N en la combustión. No obstante, existe poca información acerca del efecto de la intensidad y frecuencias de las quemas sobre las pérdidas de nutrientes y su dinámica.

También, después de una quema pueden ocurrir altas pérdidas por volatilización de N a la forma de amonio, debido a la alcalinidad de las cenizas y al incremento de la actividad de la ureasa (Bacon y Freney, 1989). En el Reino Unido, en el año 1981, se estimaron pérdidas por emisión de amonio desde los rastrojos quemados equivalentes a 20.000 toneladas N año⁻¹ y en 1991 esta cantidad bajó a 3.300 ton año⁻¹ debido a la prohibición impuesta a esta práctica (Lee y Atkins, 1994). Si la combustión de la paja es completa, la mayoría del C, H, O, N, S y P orgánico son transferidos al aire, y el resto de los cationes son

solubles al agua y disponibles para las plantas (Raison, 1979). Cuando la combustión es inhibida por alguna razón, las cenizas quedan ennegrecidas y contienen MO residual (Jordan, 1965).

El nivel de pérdidas depende de la temperatura que se alcanza en la quema. Pérdidas de P y K por volatilización ocurren sobre los 500 °C. Sin embargo, como se observa en la figura 5, estas temperaturas no se alcanzan durante la quema de residuos de cereales y la mayoría de estos elementos queda en las cenizas. Otra situación corresponde a la quema de residuos, ramas, maderas en sistemas forestales, donde pueden alcanzarse muy altas temperaturas y perderse una cantidad importante de nutrientes. También, los elementos que quedan en las cenizas son altamente solubles al agua y se producen pérdidas por escurrimiento y lixiviación.

Se ha demostrado que quemas intensas reducen la población de microorganismos y la permeabilidad del suelo. Pero el nivel de daño está directamente relacionado con la temperatura que alcanza el suelo en el proceso y la duración de la quema. Con la excepción de fuegos con gran cantidad de material combustible acumulado y donde se produce una alta generación de calor (quemadas forestales), la situación más común es que solamente alrededor del 5% de la energía calórica liberada en el proceso sea absorbido por el suelo (Packman, 1969), y por consiguiente, las máximas temperaturas normalmente no ocurren en la superficie, sino que a una altura variable de la vegetación quemada. La temperatura bajo la superficie nunca puede exceder los 100 °C, hasta que la totalidad del agua retenida se haya evaporado.

3.4. Efecto del manejo de residuos sobre la emergencia, población final de plantas y rendimiento de trigo, avena y colza

En la tabla 8 se presenta el efecto del manejo de residuos sobre el porcentaje de germinación, población final de plantas y rendimiento de grano para los cultivos de trigo, avena y colza. Se puede inferir que la germinación de las diferentes especies estudiadas se afecta en forma significativa por la presencia de residuos sobre el suelo. Sin embargo, al observar la población final de plantas, especialmente para el caso del trigo, no se manifiestan diferencias significativas entre los tratamientos. Esto deja de manifiesto la gran capacidad de compensación de esta especie, que al haber menor plantas germinadas induce un mayor número de hijuelos. Estos resultados difieren con respecto al cultivo de colza, donde queda de manifiesto su mayor susceptibilidad a la presencia de rastrojos. La germinación y población final de este cultivo se redujo en los tratamientos con residuos, lo cual afectó negativamente el rendimiento final, comparado con el

tratamiento con quema. Cabe señalar que los resultados de colza corresponden a un solo sitio experimental.

En los cultivos de trigo y avena, los menores rendimientos se obtuvieron en el tratamiento con el rastrojo hilerado. Ello fue principalmente consecuencia de la superficie que queda sin siembra, correspondiente a lo que ocupa la hilera de rastrojo y que equivale al 8-13% de la superficie total. No hubo diferencias significativas entre los tratamientos de rastrojos picados y parado.

La quema presentó los mayores rendimientos en todos los cultivos, pero para el caso de trigo y avena, estadísticamente no hubo diferencia significativa ($P < 0.05$) con los tratamientos de rastrojo picado y parado. Estos resultados son de dos años de experimentación y en este tipo de investigación es recomendable hacer seguimientos a más largo plazo, para observar los efectos de la adición de MO sobre los cultivos, lo cual debería manifestarse en un período de tiempo más prolongado.

Por otro lado, desde el punto de vista mecánico-operativo, existen ciertos aspectos que es conveniente evaluar en futuras investigaciones. Entre estos factores, y con el propósito de mejorar la implantación de estos cultivos y su tasa de germinación, se pretende implementar una sembradora John Deere con cuchillas de corte turbo (VHB Repuesto Agrícolas S.R.L), los cuales permitirían cortar y remover los rastrojos en la línea de siembra. Además, se evaluará la acción de esparcidores de granza y picadores de paja como aditamento de la máquina cosechadora automotriz.

En la tabla 9, se presentan los resultados de rendimiento en tres potreros pilotos que se establecieron con cero labranza y retención de los residuos de la temporada anterior. Los resultados obtenidos fueron considerados satisfactorios por parte de los productores que adoptaron esta práctica en parte de sus predios.

Tratamiento	Trigo			Avena			Colza ^(*)		
	Germinación (plantas m ⁻²)	Población final (ejes m ⁻²)	Rendimiento (ton m ⁻²)	Germinación (plantas m ⁻²)	Población final (ejes m ⁻²)	Rendimiento (ton m ⁻²)	Germinación (plantas m ⁻²)	Población final (ejes m ⁻²)	Rendimiento (ton m ⁻²)
Quema	368	440	6.75	373	383	5.73	117	74	3.35
Hilerado	348	429	5.20	336	398	4.67	114	86	2.31
Picado	318	436	6.37	254	337	4.85	66	57	2.25
Parado	307	400	6.17	271	337	4.95	55	51	2.30
DMS 0.05	38	NS	0.70	91	NS	0.97	-	-	-

TABLA 8. Efecto del manejo de residuos sobre el porcentaje de germinación, población final de plantas y rendimiento de grano en los cultivos de trigo, avena y colza

(*) A los resultados de raps no se les efectuó análisis estadístico, puesto que son datos que proceden de un solo sitio experimental y una temporada.

Productor	Residuos (ton ha ⁻¹)	Cultivo	Rendimiento (ton ha ⁻¹)
Jaime Rodríguez	9.0	Trigo	5.99
Felipe Cruz	4.8	Trigo	4.70
Pablo Basterrica	5.2	Avena	5.35

TABLA 9. Resultados de rendimiento en potreros pilotos

3.5. Efecto de la cantidad de residuos sobre el rendimiento de los cultivos.

En las figuras 6 y 7 se presenta el efecto de la cantidad de rastrojos sobre el rendimiento de los cultivos trigo, avena, lupino y colza, respectivamente.

De acuerdo con la figura 6, no se manifestó una relación directa entre contenido de rastrojos con respecto al rendimiento de trigo y avena. Solo se observa una ligera tendencia de reducción de rendimiento equivalente a 17-34 kg de grano, por tonelada de residuo. De acuerdo con la dispersión de valores que se presentan, se puede inferir que existen otros factores más determinantes en la producción de estos cultivos, que la presencia de residuos sobre el suelo. Estos factores no estarían asociados a los rastrojos y pueden ser de índole físico-químicos del suelo y/o de manejo del cultivo.

Respecto a los cultivos de lupino y raps, cabe señalar que se dispone de poca información y los datos son procedentes de solo un sitio experimental, en el caso de lupino, y dos para colza. Se observó un claro efecto depresivo del rastrojo sobre el rendimiento de ambos cultivos. Para el caso de lupino, la emergencia fue adecuada, pero posteriormente se produjo una gran caída de plantas y ataque de hongos (*Rhizoctonia* y *Fusarium*) que produjo gran mortalidad. El grado de incidencia de esta enfermedad se acentuaba con mayor cantidad de residuos sobre el suelo. La reducción de rendimiento alcanzó un nivel de 265 kg grano ha⁻¹ por ton de residuos presentes sobre el suelo. Este efecto negativo se podría también asociar a efecto alelopático de los rastrojos, lo cual debería ser materia de una futura investigación.

Para el caso de la colza, el rendimiento bajó 88 kg ha⁻¹ por cada tonelada de rastrojos presentes. Estos resultados se atribuyen a problemas mecánicos observados en la siembra y que afectan a la germinación de esta especie con una semilla muy pequeña y con bajo nivel de reservas. En efecto, el suelo Sta. Bárbara presenta una baja resistencia, lo que dificulta el corte del rastrojo por parte de la máquina sembradora. Una gran proporción de paja solamente se dobla por la acción de la cuchilla cortadora, quedando una cantidad importante de semillas sobre el rastrojo y no incorporadas o en contacto con el suelo. Estas semillas no germinan o se mueren al no tener posteriormente un adecuado anclaje y suministro de agua y nutrientes sobre el suelo. Es conveniente en futuras investigaciones, tal como se señaló precedentemente, evaluar ciertos aditamentos

que pueden mejorar la acción de las máquinas en sembrados de cero labranza. En primer término, disponer de una buena distribución y picado del rastrojo por parte de la máquina cosechera automotriz y tratar de mejorar la acción de los discos de siembra con la introducción de aditamentos especiales como cuchillos cortadores turbo y/o barredores de paja.

En la figura 7, se presentan los rendimientos en términos relativos respecto al tratamiento de quema. Se observan las mismas tendencias señaladas anteriormente, siendo el cultivo de trigo y avena los más resistentes a la presencia de rastrojos, en tanto colza y lupino son las más susceptibles. El porcentaje de descenso en rendimiento con respecto a la quema, expresado en porcentaje por cada tonelada de rastrojo sobre el suelo, fue de 0.3%, 1.5%, 2.6% y 6.9% para trigo, avena, colza y lupino, respectivamente.

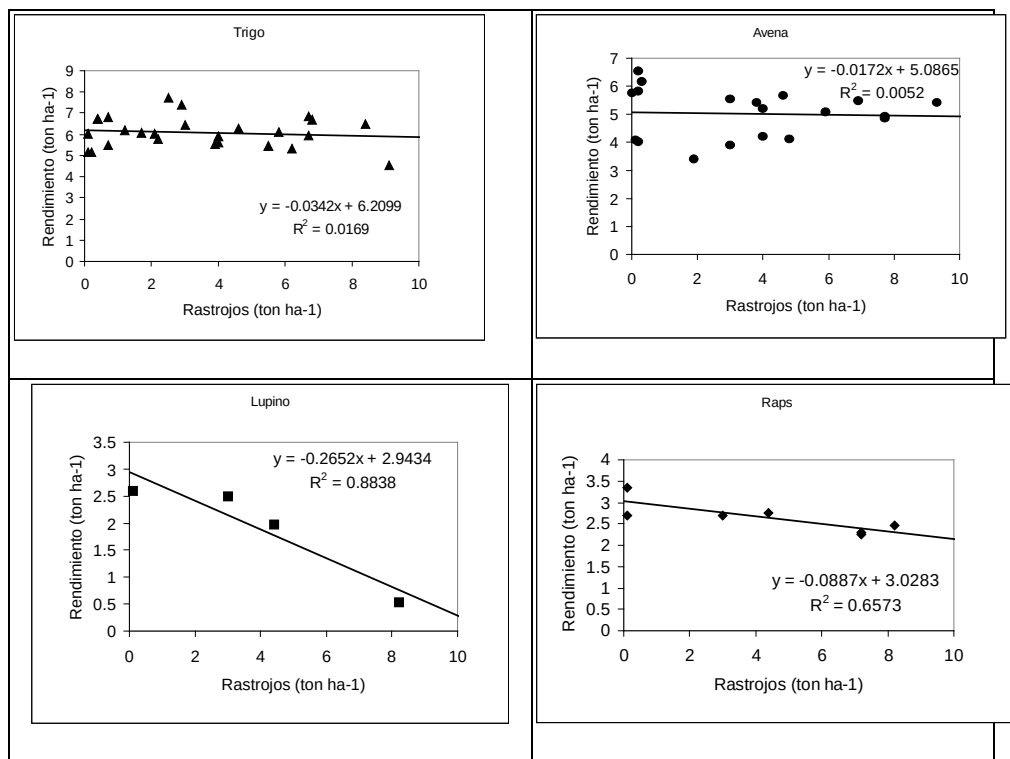


FIGURA 6. Relación entre el rendimiento de trigo, avena, lupino y raps, obtenidos en los diferentes sitios experimentales y cantidad de rastrojos presentes sobre el suelo

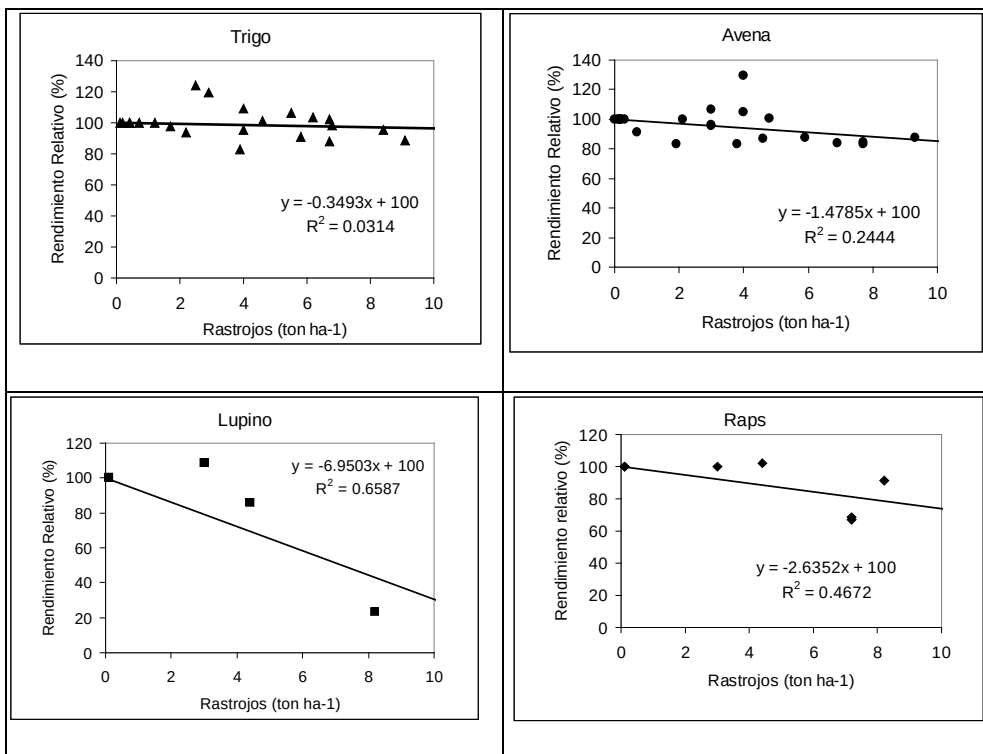


FIGURA 7. Relación entre el rendimiento relativo de trigo, avena, lupino y colza y cantidad de rastrojos sobre el suelo. Los datos se expresan en relación a tratamiento con quema que se considera un 100%

4. Consideraciones finales

De acuerdo con los resultados obtenidos durante los dos primeros años de ejecución del proyecto FONDEF, se pueden inferir las siguientes conclusiones preliminares:

Al dejar los rastrojos sobre el suelo, se puede ahorrar una considerable cantidad de fertilizantes y, adicionalmente, aportar materia orgánica. Los rastrojos pueden ser usados para mejorar la calidad del suelo y su productividad. No deben ser considerados como desechos, sino como un importante recurso natural que permite mayor sustentabilidad en el proceso productivo.

Los residuos picados presentan una mayor velocidad de descomposición, lo cual puede incidir favorablemente a largo plazo. Al cabo del segundo año, en algunos sitios, el tratamiento picado presentó hasta 3 ton ha⁻¹ menos de rastrojos comparado con el rastrojo parado sin picar.

La temperatura que se alcanza en el perfil de suelo con la quema de rastrojos de cultivos, no es considerable, y no debiera afectar la población de los microorganismos del suelo ni sus propiedades físicas. La mayor variación de la temperatura del suelo se produjo en el primer centímetro de suelo (90 °C) por un periodo de ocurrencia que no superó los 2 minutos. El segundo centímetro de suelo alcanzó 50 °C en este mismo período y bajo los tres centímetros de profundidad prácticamente no se produce mayor variación en la temperatura. La temperatura bajo la superficie nunca puede exceder los 100 °C, hasta que la totalidad del agua retenida se haya evaporado.

La quema generar pérdidas importantes de nutrientes como resultado del flujo convectivo directo de las cenizas y como consecuencia de la acción de arrastre por agua y viento. Simultáneamente, se pierde prácticamente la totalidad del C, S y N en la combustión.

En los cultivos de trigo y avena, la quema de rastrojos no presentó diferencias significativas ($P < 0.05$) en rendimiento con respecto a los tratamientos de rastrojo picado y parado. El tratamiento hilerado fue el que presentó el menor rendimiento, como consecuencia de la superficie ocupada por la franja de rastrojo que queda sin siembra.

La cantidad de rastrojos no afectó el rendimiento de trigo y avena, por lo cual se puede inferir que existen otros factores más determinantes en la producción de estos cultivos. Estos factores no estarían asociados a los rastrojos y pueden ser de índole físico-químicos del suelo y/o de manejo del cultivo.

Respecto a los cultivos de lupino y colza, se observó un claro efecto depresivo del rastrojo sobre el rendimiento de ambos cultivos, incluso cuando los datos son procedentes de solo un sitio experimental, en el caso de lupino, y dos para colza.

Con los antecedentes disponibles hasta el momento, se sugiere incorporar gradualmente la práctica de manejo de rastrojos en los predios sembrados con trigo/avena, considerando en primer término aquellos suelos de mayor potencial productivo y donde se hayan solucionado aspectos de deficiencias nutricionales y acidez.

Estos resultados son de dos años de experimentación y en este tipo de investigación es recomendable hacer seguimientos a más largo plazo, para observar los efectos de la adición de materia orgánica sobre los cultivos, lo cual debería manifestarse en un período de tiempo más prolongado.

Para la próxima temporada se evaluarán ciertos equipos que pueden mejorar la acción de las máquinas sembradoras de cero labranza. Por una parte, es conveniente incorporar esparcidores de granza y picadores de paja como aditamento de la máquina cosechadora automotriz y, por otro lado, tratar de

mejorar la acción de los discos de siembra con la introducción implementos especiales como cuchillos cortadores turbo y/o barredores de paja.

Agradecimientos: Se agradece especialmente a los productores que facilitaron sus predios, maquinarias e insumos para llevar a cabo el presente trabajo: Sres. Jaime Rodríguez, Juan Harismendy, Walter Solar, Ignacio Martínez, Juan Guillermo Martínez, Hernán Martínez, Juan Carlos Allende, Pablo Basterrica, Felipe Cruz, Jorge Rojas y Óscar Rojas.

Al personal técnico del Departamento de Suelos, Sres. Pablo Ainardi y Juan Fuentes, por su importante colaboración en la instalación de los ensayos y evaluaciones.

5. Literatura citada

- ABER, J.D., MELLILO, J.M. Y MCCLAUGHERTY, C.A. 1990. Predicting long-term patterns of mass-loss, nitrogen dynamics and soil organic matter from initial litter chemistry. *Can. J. Bot.* 68, 2201-2208.
- AMBUS, P. Y JENSEN, E.S. 1997. Nitrogen mineralization and denitrification as influenced by crop residue particle size. *Plant Soil* 197, 261-270.
- BACON, P.E. Y FRENEY, J.R. 1989. Nitrogen loss from different tillage systems and the effect on cereal grain yield. *Fert. Res.* 20, 59-66.
- BARGAR, S.G. Y PATIL, P.L. 1980. Effect of C:N ratio and phosphatic fertilizer on decomposition of wheat straw. *J. Ind. Soc. Soil Sci.* 28, 543-546.
- BUCHANAN, M. Y KING, L.D. 1993. Carbon and phosphorus losses from decomposing crop residues in no-till and conventional till agroecosystems. *Agron. J.* 85, 631-638.
- CHRISTENSEN, B.T. 1986. Barley straw decomposition under field conditions: Effect of placement and initial nitrogen content on weight loss and nitrogen dynamic. *Soil Biol. Biochem.* 18, 523-529.
- COLLINS, H.P., ELLIOT, L.F., RICKMAN, R.W., BEZDICEK, D.F. Y PAPENDICK, R.I. 1990. Decomposition and interactions among wheat residue component. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 780-785.
- CORTEZ, J., DEMARD, J.M., BOTTNER, P. Y MONROZIER, L.J. 1996. Decomposition of Mediterranean leaf litters : A microcosm experiment investigating relationships between rates and litter quality. *Soil Biol. Biochem.* 28, 443-452.
- CURRY, J.P. Y BYRNE, D. 1992. The role of earthworms in straw decomposition and nitrogen turnover in arable land in Ireland. *Soil Biol. Biochem.* 24, 1409-1412.
- DOUGLAS, C.L. Y RICKMAN, R.W. 1992. Estimating crop residue decomposition from air temperature, initial nitrogen content and residue placement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 272-278.
- FELTON, W.L., FREEBAIL, D.M., FETTELL, N.A. Y THOMAS, J.B. 1987. Crop residue management. In «Crop Residue Management: Tillage: New Directions in

- Australian Agriculture» (P.S. Cornish and J.E. Pratley, eds.) pp. 171-193. Inkata Press, Melbourne.
- FOX, R.H., MYERS, R.J.K. Y VALLIS, I. 1990. The nitrogen mineralization rate of legume residues in soil as influenced by their polyphenol, lignin and N contents. *Plant Soil* 129, 251-259.
- GALLARDO, A. Y MERINO, J. 1993. Leaf decomposition in two Mediterranean ecosystems of south-west Spain: Influence of substrate quality. *Ecology* 74, 152-161.
- GILLER, K.E. Y CADISCH, G. 1997. Driven by nature? A sense of arrival and departure? In *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*. (G. Cadisch and K.E. Giller, eds.) pp. 393-399. CAB International, Wallingford, UK.
- GOERING, H.K. Y VAN SOEST, P.J. 1970. *Forage Fibre Analyses: Apparatus Reagents, Procedures and Some Applications*. USDA Handb. N.º379. U.S. Govt. Printing Offices. Washington, DC.
- GOH, K.M. Y NGUYEN, M.L. 1992. Fertiliser needs for sustainable agriculture in New Zealand. *Proc. Int. Conf. Sustainable Land Manag.*, Napier, N.Z., pp. 119-133.
- HAGIN, J. Y AMBERGER, A. 1974. Contribution of Fertilizers and Manures to a N- and P-Load of Water. A computer Simulation Model, Final report to the Deutsche Forischangs Gemeinschaft. Technicon, Israel.
- HAMMEL, K.E. 1997. Fungal degradation of lignin. In: *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*. (G. Cadisch and K.E. Giller, eds.) pp. 33-45. CAB International, Wallingford, UK.
- JENKINSON, D.S. 1988. Soil organic matter and its dynamics. In *"Russel's Soil Condition and Plant Growth"* (A. Wild, ed.), 11 th. ed., pp. 564-607. Longman, London.
- JENKINSON, D.S. Y AYANABA, A. 1977. Decomposition of carbon-14 labelled plant material under tropical conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 912-915.
- JORDAN, C.F. 1965. Fire influence in old fields of New Jersey Piedmont. *Bull. N.J. Acad. Sci.* 10, 7-12.
- JUMA, N.G. Y MCGILL, W.B. 1986. Decomposition and nutrient cycling in agroecosystems. In: *Microfloral and Faunal Interactions in Natural and Agro-Ecosystems*. (M.J. Mitchell and J.O. Nakas, eds.), pp. 74-136. Martinus Nijhoff, Dordrecht, The Netherlands.
- KNAPP, E.B., ELLIOT, L.F. Y CAMPBELL, G.S. 1983. Microbial respiration and growth during the decomposition of wheat straw. *Soil Biol. Biochem.* 15, 319-323.
- LEE, D.S. Y ATKINS, D.H.F. 1994. Atmospheric ammonia emissions from agricultural waste combustions. *Geophys. Res. Lett.* 21, 281-284.
- LUNA-OREA, P., WAGGER, M.G. Y GUMPERTZ, M.L. 1996. Decomposition and nutrient release dynamics of two tropical legume cover. *Agron. J.* 88, 758-764.
- MA, J.F. Y TAKAHASHI, E. 1989. Release of silicon from rice straw under flooded conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.* 35, 663-667.
- MELLILO, J.M., ABER, J.D. Y MURATORE, J.F. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology* 63, 621-626.

- MULLER, M.M., SUNDMAN, V., SOININVAARA, O. Y MERILAINEN, A. 1988. Effect of chemical composition on release of nitrogen from agricultural plant material decomposing in soil under field conditions. *Biol. Fertil. Soils* 6, 78-83.
- PACKHAM, D. R. 1969. Heat transfer above a small ground fire. *Austr. For. Res.* 5, 19-24.
- PAUL, E.A. Y CLARK, F.E. 1989. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press. Orlando, FL.
- PEÑA, L. 1995. Conservación de suelos. Universidad de Concepción, Vicerrectoría Académica, Dirección de Docencia. 167 p.
- POWER, J.F. Y PAPENDICK, R.I. 1985. Organic sources of nutrients. In: *Fertilizer Technology and Use*. (O. P. Egelsham, ed.) 3rd ed., pp. 503-520. Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.
- RAISON, R.J. 1979. Modification of the soil environment by vegetation fires, with particular reference to nitrogen transformation: A review. *Plant Soil* 51, 73-108.
- REBER, H. Y SCHARER, A. 1971. Degradation sequence in wheat straw extracts inoculated with soil suspensions. *Soil Biol. Biochem.* 3, 381-383.
- RUTIGLIANO, F.A., DE SANTO, A.V., BERG, B., ALFANI, A. Y FIORETTO, A. 1996. Lignin decomposition in decaying leaves of *Fagus sylvaticus* L. and needles of *Abies alba* Mill. *Soil Biol. Biochem.*, 28, 101-106.
- TIAN, G., KANG, B.T. Y BRUSSAARD, L. 1992. Effects of chemical composition on N, Ca, Mg release during incubation of leaves from selected agroforestry and fallow species. *Biogeochemistry* 16, 103-119.
- STOTT, D.E., STROO, H.F., ELLIOT, L.F., PAPENDICK, R.I. Y UNGER, P.W. 1996. Wheat residue loss from fields under no-till management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 92-98.
- SCHOMBERG, N.H., STEINER, J.L. Y UNGER, P.W. 1994. Decomposition and nitrogen dynamics of crop residues: Residue quality and water effect. *Soil Sci. Soc. Am.* 58, 372-381.
- SCHOMBERG, N.H., STEINER, J.L., EVETT, S.R. Y MOULIN, A.P. 1996. Climatic influence on residue decomposition prediction in the wind erosion prediction system. *Theor. Appl. Climatol.* 54, 5-16.
- VAN SCHERREMAN, D.A. 1964. A comparison between the effect of fresh and dried organic material added to soil on carbon and nitrogen mineralization. *Plant Soil* 20, 149-165.
- WISE, D.H. Y SCHAEFER I.M. 1994. Decomposition of leaf litter in a mull beech forest: Comparison between canopy and herbaceous species. *Pedobiology* 38, 269-288.

Caso II.1.6. Agricultura de conservación en Navarra

1. Introducción

El término *agricultura de conservación* utilizado por FAO desde la década de los setenta, consiste en un conjunto de prácticas agronómicas basadas en el uso de cubiertas vegetales y residuos de cosechas anteriores así como una serie de técnicas de laboreo que incluyen los sistemas de laboreo reducido, no-laboreo y siembra directa. El objetivo principal es reducir total o parcialmente la erosión del suelo, junto a un uso sostenible de agua y nutrientes.

La aplicación de estas técnicas en muchas zonas del mundo está demostrando que es posible compatibilizar la agricultura intensiva con el mantenimiento de los recursos naturales. Con los denominados «sistemas de conservación» se obtienen importantes beneficios medioambientales que incluyen tanto la conservación del suelo, como la disminución en gran medida de la contaminación de las aguas superficiales y del consumo de combustibles fósiles con la consiguiente reducción en la emisión de CO₂ a la atmósfera. Esta última es una importante contribución de la agricultura de conservación para mitigar el efecto invernadero.

A esta reducción del CO₂ atmosférico también puede contribuir el laboreo de conservación «secuestrando» carbono en el suelo y por ello en España la agricultura de conservación se ha declarado como actividad sumidero de CO₂ en el RD 1866/2004, si bien no se le asigna un potencial específico de captura de este gas (González et ál., 2005)

Los sistemas de laboreo de conservación reducen de forma efectiva el consumo de energía y de trabajo, con un ahorro de entre el 15-50% de los costes. Este hecho ha contribuido de forma determinante a la extensión de estas técnicas, que se adaptan muy bien al cultivo de cereal de invierno.

La agricultura de conservación en España se inició a principios de los ochenta en algunas zonas de Andalucía y Castilla. En Navarra también en esa década comenzaron diversas experiencias llevadas a cabo por técnicos del Departamento de Agricultura, si bien ya antes algunas explotaciones en la Comunidad Foral comenzaron a realizar la preparación del suelo sin volteo mediante cultivadores, gradas, etc. A partir de 1984, en el Instituto Técnico y de Gestión Agrícola (ITGA) se han realizado numerosos ensayos y demostraciones en diversas zonas agroclimáticas de Navarra, con especial incidencia en el estudio de costes y la rentabilidad económica de estos sistemas (Enrique et ál., 2001).

Los resultados han sido transferidos al sector (Arnal, 1987; 1988; 1991; Perez de Ciriza et ál., 2002) y han tenido una lenta pero continua progresión (Arnal 1998), sobre todo por su rentabilidad y por la reducción del tiempo de trabajo.

En la actualidad Navarra, es una de las zonas de España donde se registra una mayor aplicación proporcional de sistemas de laboreo de conservación, ya que de la superficie dedicada al cultivo de cereal (unas 245 000 ha) un 70% se encuentra bajo sistemas de conservación (el 10% como siembra directa, el 50% como laboreo reducido y otro 10% bajo otras prácticas), y solo un 30% permanece bajo el sistema tradicional de laboreo con vertedera. Hay que destacar la extensión que se está produciendo en los últimos años en el regadío, en la zona dedicada a maíz, buscando la disminución de los costes de producción de maíz y la obtención de 2 cosechas/año o al menos, de cuatro en tres años. También existen experiencias en cultivos forrajeros y algunos cultivos hortícolas como habas, guisante y espinaca.

2. Cambios en el suelo

Con la implantación de los sistemas de laboreo de conservación se producen cambios en muchas propiedades del suelo, favorables en general aunque alguno puede afectar negativamente.

Dentro del primer grupo se encuentra la fertilidad, ligada al aumento cuantitativo (Dalal y Bridge, 1996; Ismail et ál., 1994) y a los cambios cualitativos (Arshad et ál., 1990) en la materia orgánica del suelo, así como un conjunto de propiedades relacionadas con el desarrollo de una estructura estable (Dalal, 1989) que favorecen la retención (Pelegrín et ál., 1990; Mahboubi et ál., 1993; Norwood, 1994; Lampurlanés et ál., 2001) y el movimiento del agua en el suelo (Shipitalo et ál., 2000).

En las zonas semiáridas, de todos los cambios positivos introducidos en el suelo, el de mayor incidencia en la producción del cultivo, es el aumento del contenido de agua almacenada en el suelo. Este comportamiento es consecuencia de la reducción de las pérdidas de agua por evaporación debida al efecto mulch de los restos de cosecha en superficie (Blevins et ál., 1984; Phillips, 1984; Munawar et ál., 1990) pero también por los cambios producidos en el sistema de poros (Diiwu et ál., 1998; Bescansa et ál., 2006) que aumentan la capacidad de almacenamiento de agua útil (CRAD) del propio suelo.

La reducción del laboreo produce una compactación del suelo (Tebrügge, 2001), disminuyendo la porosidad total. Este es uno de los aspectos negativos del laboreo de conservación para el suelo, aunque en muchos suelos esta es sólo una condición transitoria que se ve posteriormente compensada por la estructura que se va desarrollando. También contribuye a esta evolución el desarrollo de la mayor actividad de las lombrices de tierra que se produce al aumentar la disponibilidad de alimento con los restos dejados sobre el suelo y al reducir la

alteración mecánica de los horizontes superiores. La actividad de estas especies mejora la estructuración, así como la aireación, circulación y drenaje de agua (Lee, 1985) gracias al desarrollo de galerías, que puede llegar a compensar los problemas derivados de la compactación (Bescansa et ál., 2005).

3. Porosidad

La disminución de la porosidad total (f) se puede determinar a través de la medida de la densidad aparente (ρ_b), usando la ecuación $f = (\rho_s - \rho_b) / \rho_s$; donde, ρ_s es la densidad real.

Sin embargo, la ρ_b por sí sola no basta para determinar el grado de compactación alcanzado, pues es una medida que no informa del tamaño de los poros. De hecho, la compactación afecta al volumen total de poros y sobre todo al de los poros grandes, pero no se suele modificar el de los más pequeños (Hillel, 1998).

La medida directa de la porosidad resulta más compleja que la de la densidad aparente, sin embargo, se considera un indicador mucho más adecuado para conocer la compactación.

Para evaluar los cambios en la distribución del tamaño de poros se puede recurrir a técnicas morfométricas (estudio de láminas delgadas, análisis de imagen, tomografía) o mediante un porosímetro (Carter y Ball, 1993), pero son métodos tediosos en tiempo y medios.

Una alternativa a estos métodos directos, es el uso de las curvas de retención de agua en el suelo que permite realizar una estimación de la cantidad de poros de diferentes clases, establecidas según su diámetro.

En física de suelos se asume que los poros del suelo son aproximadamente cilíndricos y que, por tanto, se puede asignar un «radio equivalente» a cada clase de poros debido a su analogía con tubos capilares.

Se han desarrollado diferentes ecuaciones que relacionan el tamaño de poro con la fuerza de succión con la que el agua es retenida por el suelo. Los modelos (Van Genuchten, 1980; Carter y Ball, 1993) que relacionan el potencial de agua y el diámetro equivalente de poro (epd) se basan en la ecuación de Rose (1966) $pF = \log_{10}(A) - \log_{10}(r)$; donde A es constante ($=3,4725$) y r es el radio de poro equivalente en μm ($= epd/2$).

De acuerdo con estos modelos, a una fuerza de retención de -33 kPa le corresponde un diámetro equivalente de poro de $9 \mu m$, para -50 kPa será de $6 \mu m$ y para -1500 kPa de $0,2 \mu m$.

4. Ensayo de sistemas de laboreo de conservación en la zona semiárida de Navarra

El ensayo de sistemas de laboreo de conservación vs laboreo convencional, está situado en el término municipal de Olite ($42^{\circ}27'19''\text{N}$; $1^{\circ}41'10''\text{W}$; altitud: 402 m) localidad que se encuentra en el tramo medio del valle del Ebro a su paso por Navarra (figura 1). Este ensayo forma parte de la red experimental del Instituto Técnico de Gestión Agrícola (ITGA) y se puede considerar representativo de la zona semiárida de cultivo de cereal de invierno en Navarra.

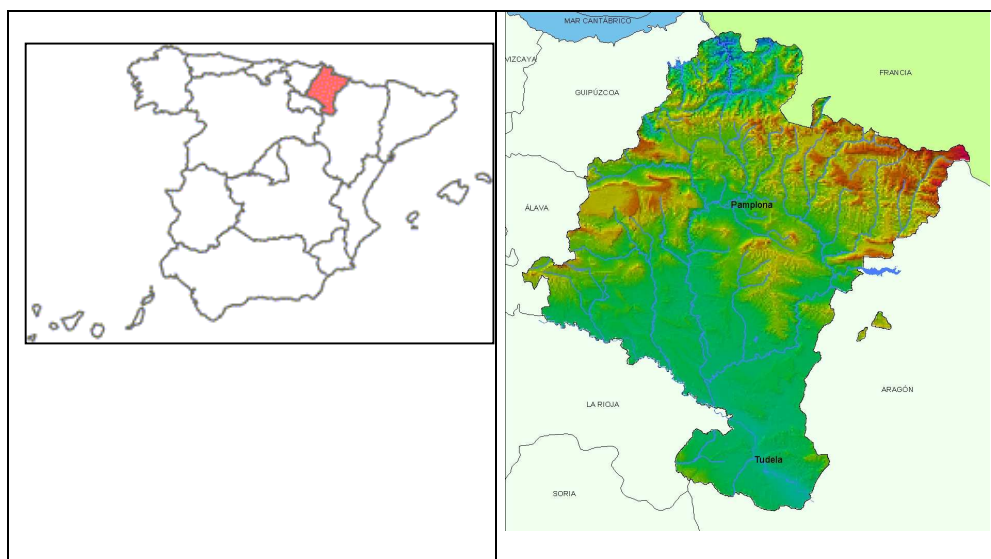


FIGURA 1. Situación de la zona de estudio

El objetivo de este caso práctico es valorar el efecto de los sistemas de laboreo de conservación, siembra directa y laboreo mínimo, en la compactación y porosidad del suelo, estimando la porosidad total y la distribución del tamaño de poros mediante las curvas de retención de agua en el suelo; también se pretende comprobar la influencia de estos cambios en el funcionamiento del suelo.

4.1. Material y métodos

Clima

La ficha climática de la estación meteorológica de Olite (Gobierno de Navarra, 2001) se encuentra en la figura 2. Se trata de una zona con un clima mediterráneo y continental, con una temperatura media anual de $13,5^{\circ}\text{C}$.

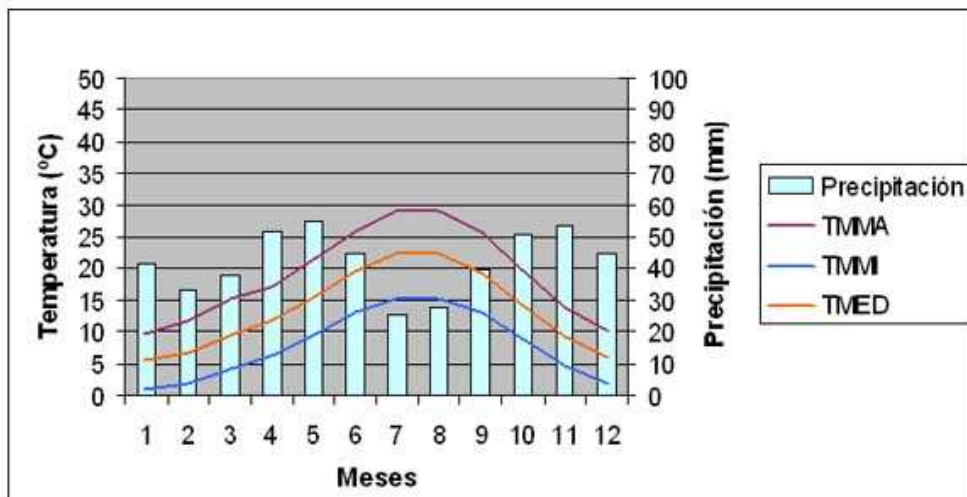


FIGURA 2. Ficha climática de la estación meteorológica de Olite, Navarra (Gobierno de Navarra, 2001)

La precipitación media anual es de 508 mm. La escasez de lluvias y su irregular distribución a lo largo del año así como la presencia del *cierzo*, viento seco y racheado característico del valle del Ebro, producen unas condiciones semiáridas, con una ETo (Penman-Monteith) de 1.100 mm, por lo que el balance hídrico de la zona es claramente deficitario.

De acuerdo al sistema Thornthwaite se clasifica como un clima *Seco Subhúmedo* ($C_1B'_2d\ b'_4$) y en el sistema Agroclimático Papadakis es *Mediterráneo templado* ($Me, TE_1 av, M$)

Tipo de Suelo

La parcela del ensayo se encuentra situada en el fondo de una amplia vaguada con escasa pendiente. Litológicamente se trata de una zona de limos y arcillas terciarios y depósitos cuaternarios de fondo de valle.

El suelo, en el metro superior, se caracteriza por tener una textura franco arcillosa y por la ausencia de elementos gruesos. Presenta al inicio del ensayo una estructura moderada/fuerte en bloques subangulares que desarrolla grietas en superficie de hasta 0,02 m de anchura y que alcanzan hasta 0,25 m de profundidad. Tiene un elevado contenido de CaCO_3 en todo el perfil. Estos y otros datos generales de caracterización se incluyen en la tabla 1.

Se ha clasificado de acuerdo al sistema Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 1998) como un *Calcic Haploxerepts*, familia *arcillosa fina*.

Propiedad	Profundidad (m)		
	0-0,30	0,30-0,75	0,75-1,05
Granulometría (g kg ⁻¹):			
Arena (50-2000 µm)	291	315	277
Limo (2-50 µm)	362	322	328
Arcilla (< 2 µm)	347	363	395
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	1,48	1,76	1,79
CRAD ^a (m ³ m ⁻³)	0,169	0,191	0,193
Materia orgánica (g kg ⁻¹)	10,1	6,0	5,0
CaCO ₃ (g kg ⁻¹)	359	360	335
pH	8,25	8,5	8,2
CE (dS m ⁻¹)	0,58	1,52	4,54

TABLA 1. Datos generales del suelo de la parcela de ensayo

^aCRAD= Capacidad de retención de agua disponible: contenido de humedad entre -33 y -1500 kPa

Cultivo

Monocultivo de cebada (var. Tipper), cuya siembra se realiza en octubre con una densidad de 158 kg·ha⁻¹. La fertilización y los tratamientos fitosanitarios son iguales para todos los tratamientos y son los empleados habitualmente en la zona, a excepción del tratamiento herbicida con Glifosato aplicado exclusivamente a las parcelas con siembra directa. Las características específicas del manejo agronómico del cultivo se encuentran detalladas en la tabla 2.

Práctica		Producto/dosis	Fechas
Siembra:	Cebada (var. Tipper)	Dosis 158 kg·ha ⁻¹	octubre
Fertilización:	Fondo	Superfosfato 45% (120 kg/ha)	años alternos (septiembre)
	Cobertera	Urea (100 U/ha)	anual (febrero)
Herbicidas		Glifosato (1,5 l/ha) ^a	septiembre ^a
		IP-50 (3 l/ha) + Yard (1,25 l/ha)	diciembre
Insecticidas		Karate (1 l/ha)	diciembre
		Clorpirifos	marzo-abril

TABLA 2. Datos generales del manejo agronómico del ensayo

^aEl tratamiento con Glifosato solo se aplica en SD

Los tratamientos de laboreo en el ensayo:

El ensayo de sistemas de laboreo, implantado en 1994, tiene un diseño de bloques aleatorizados con cuatro repeticiones. Cada parcela individual es de 9*24 m.

El tratamiento principal es el sistema de laboreo con los siguientes tipos:

- Siembra directa (SD), utilizando una sembradora específica con apertura de línea de siembra de 0,03 a 0,05 m de profundidad.
- Laboreo mínimo (LM), labor vertical realizada con un arado chisel de 0,15 m de profundidad.
- Laboreo tradicional (LT), labor con volteo realizada con un arado de vertedera que alcanza 0,25 m.

Métodos

La recogida de muestras de suelo se realizó con barrena tipo Edelman a 0-0,05; 0,05-0,15 y 0,15-0,30 m de profundidad, transcurridos cinco años del comienzo del ensayo.

El contenido de carbono orgánico se determinó por oxidación con dicromato potásico en medio ácido, después de la molienda, pulverización y posterior homogeneización de la muestra polvo ($< 0,2$ mm).

Para determinar la densidad aparente (ρ_b) se recogieron muestras inalteradas con cilindro biselado, a las profundidades 0-0,05, 0,05-0,10 y 0,15-0,30 m. El muestreo se realizó seis meses después de las labores de preparación y siembra.

También se recogieron muestras inalteradas a la profundidad 0-0,15 m, para medir la capacidad de retención de agua en el suelo (CRA) a los potenciales matriciales de 0 y -33 kPa. Para la medida de la CRA a -50 kPa y -1500 kPa se utilizaron muestras tamizadas (< 2 mm). La CRA se determinó para cada muestra por triplicado en placas extractoras de 5 y 15 bar de presión, de acuerdo con la metodología descrita en Dirksen (1999). Los valores volumétricos θ_v fueron calculados a partir de los volumétricos usando la ρ_b . La capacidad de retención de agua útil (CRAD) se calculó por diferencia entre el contenido volumétrico de humedad a capacidad de campo (-33 kPa) y el del punto de marchitez (-1500 kPa).

El tratamiento estadístico de los datos ha sido el análisis de la varianza (ANOVA) y el test post-hoc de Duncan ($P < 0.05$).

4.2.- Resultados

El cambio de sistema de laboreo produce cambios significativos en el contenido de materia orgánica de los 0,15 m superiores del suelo (tabla 3). Los sistemas de laboreo de conservación (SD y LM) tienen un contenido más alto, un 13% de media, que el laboreo tradicional (LT). Estas cifras no son tan espectaculares como las que se producen en otros climas más húmedos, sin embargo, su efecto es especialmente importante en estos suelos de climas semiáridos, donde la descomposición y mineralización de la materia orgánica es muy rápida y donde este pequeño incremento puede influir en la capacidad de retención de agua en el suelo.

Propiedades suelo en 0-0,15 m	Sistema de laboreo		
	SD	LM	LT
Materia orgánica (g kg ⁻¹)	18,8 b	18,2 b	16,3 a
Densidad aparente (Mg m ⁻³)	1,62 b	1,50 a	1,52 a
Potencial matricial (kPa)	Contenido de agua (m ³ ·m ⁻³)		
0	0,383 a	0,435 b	0,431 b
-33	0,366 b	0,322 a	0,326 a
-50	0,319 b	0,291 a	0,287 a
-1500	0,230	0,219	0,217

TABLA 3. Cambios en propiedades del suelo

La eliminación del laboreo (SD) produce una compactación gradual en los 0,15 m superficiales como se observa en los valores de la ρ_b incluidos en la tabla 3. Esta compactación se produce a expensas de una reducción en el volumen total de poros.

En efecto, la porosidad total (f) estimada a través de la densidad aparente, es un 38% en siembra directa (SD), frente al 43% de los sistemas LM y LT. Es interesante destacar que al reducir la intensidad del laboreo (LM) no se produce compactación respecto al LT.

Si la estimación de la porosidad se realiza mediante la curva de retención, el valor de f corresponderá al contenido de agua del suelo a saturación (0 kPa) y se obtienen resultados similares. En esta estimación es conveniente descartar los poros menores de 0,2 μm que no participan en la retención de agua útil del suelo, y, por tanto, se calcula:

$$\text{Porosidad total } >0,2 \mu\text{m} (\%) = \theta_v (0 \text{ kPa}) - \theta_v (-1500 \text{ kPa})$$

Los resultados (tabla 4) muestran que la siembra directa produce una disminución del volumen total de poros cercana al 30%, a la vez que el laboreo mínimo no modifica esta condición respecto al laboreo con vertedera.

	Sistema de laboreo		
	SD	LM	LT
Total poros $>0,2 \mu\text{m}$	0.153 a	0.215 b	0.214 b
Diámetro equivalente de poro:	Frecuencia relativa (%)		
$> 9 \mu\text{m}$	11.3 a	51.2 b	48.2 b
6-9 μm	30.3 b	15.5 a	17.4 a
0,2-6 μm	58.4 b	33.3 a	34.4 a

TABLA 4. Volumen total de poros $> 0,2 \mu\text{m}$ (m³ m⁻³) y frecuencia relativa del tamaño de poros en los 0,15 m superiores del suelo

Si se utilizan los restantes puntos de la curva de retención (tabla 3) se podrá valorar si se han producido cambios en la distribución del tamaño de poros. Se consideran los siguientes intervalos:

$$\text{Poros } > 9 \mu\text{m} = \theta_v(0\text{kPa}) - \theta_v(-33\text{ kPa})$$

$$\text{Poros } 6 - 9 \mu\text{m} = \theta_v(-33\text{ kPa}) - \theta_v(-50\text{ kPa})$$

$$\text{Poros } 0,2-6 \mu\text{m} = \theta_v(-50\text{ kPa}) - \theta_v(-1500\text{ kPa})$$

La expresión del volumen de poros de cada intervalo en forma de frecuencias relativas respecto a la porosidad total (tabla 4), permite comprobar que la distribución del tamaño de los poros está muy afectada por el sistema de laboreo utilizado. Nuevamente se observa que las diferencias solo se producen con la ausencia de labores (SD), y que los poros más gruesos, $> 9 \mu\text{m}$, ocupan la mayoría del espacio poroso (50%) en LM y LT, mientras que en SD los poros más abundantes (58%) son los de menor tamaño ($0,2-6 \mu\text{m}$).

Consecuencia de esta redistribución del tamaño de poros, es que el tratamiento SD tiene una capacidad de retención de agua útil ($\text{CRAD} = 0,204 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) mayor que los de LM ($0,154 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) y LT ($0,163 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$).

Estos cambios se pueden atribuir también (Bescansa et ál., 2005) a la actividad de las lombrices de tierra que altera el sistema de poros del suelo, no solo al crear sus propias galerías, sino que también afecta a la distribución del tamaño de poros al modificar la estructura y, por tanto, el propio sistema de poros.

4.3. Conclusiones

Los resultados obtenidos proporcionan diversas conclusiones. Por una parte, los sistemas de laboreo de conservación (SD y LM) producen un aumento del contenido de materia orgánica en el horizonte superficial del suelo con respecto al sistema con vertedera (LT).

Sin embargo, se observan diferencias con significación estadística, entre los dos sistemas de laboreo de conservación en lo que se refiere a la porosidad total del suelo. La siembra directa produce una reducción del volumen total de poros, compactación que no se produce en el tratamiento de laboreo mínimo, que se comporta igual que el laboreo con vertedera.

Asimismo, en el tratamiento de SD se produce una redistribución del tamaño de poros que en consecuencia aumenta la capacidad de retención de agua útil (CRAD) de este sistema frente a LM y LT. Este cambio en la capacidad del suelo para almacenar agua es de especial importancia para los climas semiáridos, ya que proporciona un balance de agua más favorable durante el período de cultivo de la cebada.

5. Bibliografía

- ARNAL, P. 1987. Alternativas a la siembra tradicional. *Navarra Agraria* n.º 25: 23-34.
- . 1988. Sistemas de siembra de cereales. *Navarra Agraria* n.º 32: 47-54.
- . 1991. Alternativas al sistema de siembra tradicional. *Navarra Agraria* n.º 67: 13-20.
- . 1998. Evolución del “No laboreo” en Navarra. *Agricultura* n.º 794: 746-750.
- ARSHAD, M.A., SCHNITZER, M., ANGERS, D.A., RIPMEESTER, J.A., 1990. Effects of till vs no-till on the quality of soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 22, 595-599.
- BESCANSA, P., IMAZ, M.J., VIRTO, I., ENRIQUE, A., BRIONES, M.J.I. 2005. Influencia de laboreo de conservación y manejo de residuos en el desarrollo de poblaciones de lombrices en suelos semiáridos. *Actas Congreso Internacional sobre Agricultura de Conservación*, Córdoba, noviembre 2005, pp. 285-290.
- BESCANSA, P., IMAZ, M.J., VIRTO, I., ENRIQUE, A., HOOGMOED, W.B. 2006. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. *Soil Till. Res.* 87, 19-27.
- BLEVINS, R.L., SMITH, M.S., THOMAS, G.W. 1984. Change in soil properties under No-tillage. In: *No Tillage Agriculture*. R.E. Phillips and S.H. Phillips (eds.), Van Nostrand Reinhold Co. New York. 190-330.
- CARTER, M.C., BALL, B.C. 1993. Soil Porosity. In: Carter, M.R. (ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC Press, Boca Raton FL, pp. 581-588.
- DALAL, R.C., 1989. Long term effects of no-tillage, crop residues and nitrogen application on properties of a vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 1511-1515.
- DALAL, R.C., BRIDGE, B.J. 1996. Aggregation and organic matter storage in subhumid and semiarid soils. *Adv. Soil Sci.* 20, 263-307.
- DIIWU, J.Y., RUDRA, R.P., DICKINSON, W.T., WALL, G.J. 1998. Tillage and heterogeneity effects on the performance of soil water characteristics models. *J. Agric. Eng. Res.* 71, 307-313.
- ENRIQUE, A., BESCANSA, P., VIRTO, I., PÉREZ DE CIRIZA, J.J. 2001. Conservation tillage under semiarid conditions in Navarra: study of soil parameters and economical efficiency. In: Torres, G. et ál (eds.) *Conservation Agriculture a Worldwide Challenge*. Proceedings of the First World Congress on Conservation Agriculture of FAO-ECAF, vol. II, Madrid, Spain, 1-5 October 2001, pp. 721-724.
- FAO, 2001. *Conservation Agriculture, Matching Production with Sustainability*. What is the Goal of Conservation Agriculture? FAO homepage.
- GOBIERNO DE NAVARRA, 2001. *Estudio Agroclimático de Navarra*. Ed. Dpto. de Agricultura Ganadería y Alimentación, Servicio de Estructuras Agrarias.
- GONZÁLEZ, E., HOLGADO, A., MARTÍNEZ, A., GÓMEZ, M., VEROZ, O. 2005. *Agricultura de Conservación en Europa. Situación y perspectivas*. *Actas Congreso Internacional sobre Agricultura de Conservación*, Córdoba, noviembre 2005, pp. 387-396.
- HILLEL, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press, London.

- ISMAIL, I., BLEVINS, R.L. FRYE, W.W. 1994. Long-term no-tillage effects on soil properties and continuous corn yields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 193-198.
- LAMPURLANÉS, J., ANGÁS, P., CANTERO-MARTÍNEZ, C. 2001. Root growth, soil water content and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions. *Field Crops Res.* 69, 27-40.
- LEE, K.E. 1985. Earthworms. Their Ecology and Relationships with soil and land use. Academic Press, Sydney.
- MAHBOUBI, A.A., LAL, R., FAUSSEY, N.R. 1993. Twenty-eight years of tillage effects on two soils in Ohio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 506-512.
- MUNAWAR, A., BLEVINS, R.L., FRYE, W.W., SAUL, M.R. 1990. Tillage and cover crop management for soil water conservation. *Agron. J.* 82, 773-777.
- NORWOOD, D. 1994. Profile water distribution and grain yield as affected by cropping system and tillage. *Agron. J.* 86, 558-563.
- PELEGRÍN, F., MORENO, F., MARTÍN-ARANDA, J., CAMPS, M. 1990. The influence of tillage methods on soil physical properties and water balance for a typical crop rotation in SW Spain. *Soil Till. Res.* 16, 345-358.
- PÉREZ DE CIRIZA, J.J., DELGADO, J., LAFARGA, A. 2002. Los sistemas de laboreo del suelo. *Navarra Agraria* n.º 133: 31-34.
- PHILLIPS, R.E. 1984. Soil moisture. In: Phillips, R.E. and Phillips, S.H., (eds.), *No-tillage agriculture: principles and practices*. Van Nostrand and Reinhold Pub. (NY), 66-86.
- ROSE, C.W. 1966. *Agricultural Physics*. Pergamon, New York, 166 pp.
- SHIPITALO, M.J., DICK, W.A., EDWARDS, W.M. 2000. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. *Soil Till. Res.* 53, 167-183.
- TEBRÜGGE, F. 2001. No-tillage visions- Protection of soil, water and climate and influence on management and farm income. In: García Torres et al (eds.), *Conservation Agriculture, a World Wide Challenge*. Proceedings of the 1.st World Congress on Conservation Agriculture of FAO-ECAF, 1-5 October 2001, Madrid, Spain. Vol. I, 303-316.
- VAN GENUCHTEN, M.T.H. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.

Caso II.1.7. Efectos de la fertilización nitrogenada con purín porcino en cereal de secano en el valle del Ebro (Cataluña, NE España)

1. Introducción y objetivos

El purín porcino es, potencialmente, un fertilizante orgánico importante en Cataluña, comunidad autónoma del noreste de España con más de seis millones de cabezas de ganado de esta especie, en una superficie de cultivo próxima al millón de hectáreas. A esta situación inicial, aparentemente positiva, hay que añadir la concentración de dicho ganado en zonas concretas, así como la importancia que tienen otros tipos de ganadería, destacando el vacuno y las aves, ambos de engorde.

Durante el último tercio del siglo pasado la agricultura en Cataluña, al igual que en ciertas zonas de España, sufrió una serie de cambios estructurales que se han ido sucediendo hasta la actualidad. La especialización agraria se concretó en una disminución del número de explotaciones, en un aumento de su tamaño y en una desvinculación progresiva de la actividad ganadera de la actividad agrícola. Todo ello conllevó problemas de gestión de las deyecciones ganaderas y, en especial, de los purines puesto que a diferencia de otros subproductos (estiércol de vacuno, gallinaza), estos poseen un elevado contenido en agua, lo que hace inviable su transporte a zonas más alejadas para su aplicación en campo.

A pesar de que el primer intento de protección de las aguas por parte de las autoridades europeas, en referencia explícita a los nitratos procedentes de fuentes agrarias, se remonta a 1991 con la Directiva 91/676/CEE, de 12 de diciembre, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura, todavía hoy en día sigue siendo un problema. Por ello, los problemas asociados relacionados con los riesgos medioambientales plantean la cuestión de su eficiencia agronómica (Bosch y Boixadera, 2006).

Un análisis de los impactos medioambientales y del valor fertilizante de los abonos orgánicos en la investigación en Europa ha sido realizado por Brogan (1981), aunque todavía falta abordar el tema para un sistema de secano. Sin embargo, el equipo de la UdL (Boixadera, Bosch, Sió y Teira) resumió (PAM/PNUE-CAR/PP, 2004) cómo mejorar la eficiencia agronómica de los fertilizantes orgánicos en los países del Mediterráneo.

La viabilidad y el éxito de su uso como fertilizante agrícola pasan por conocer, en la medida de lo posible, su composición, su comportamiento y los efectos que producen sobre los ecosistemas sobre los que actúan (agua, suelo, aire, planta, animales).

En este sentido, el trabajo se planteó con el objetivo de cuantificar, a partir de las curvas de respuesta al abonado, los efectos residuales del nitrógeno (N) contenido en los purines porcinos tras distintas aplicaciones. Los efectos residuales se cuantifican en las variables: extracción de nitrógeno por la planta y producción obtenida y comparándolo, a su vez, con los valores de estas variables obtenidos con la fertilización nitrogenada mineral. En este capítulo únicamente se presentan los correspondientes a las producciones de grano en cereal de secano (cebada y trigo).

2. Material y métodos

2.1. Caracterización de la zona de estudio

Localización

El estudio se ubicó en el municipio de Oliola, situado en la parte occidental de Cataluña (figura 1). La principal actividad económica de la zona se halla relacionada con la agricultura y la ganadería. Puesto que se trata de una zona con abundante disponibilidad de tierras, la gestión de las deyecciones ganaderas no resulta un problema de ámbito general.

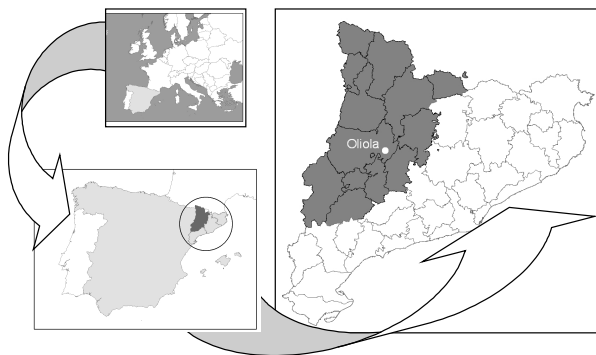


FIGURA 1. Situación del municipio en el que se realizó el ensayo

La finca en cuestión estaba ubicada en un fondo de valle de orientación norte y con una dimensión superior a las 5 ha, de las cuales el ensayo ocupaba 2 ha. Se escogió esta finca porque reunía ciertas cualidades, como el no presentar problemas de salinidad, ni pedregosidad o elementos gruesos en el perfil, tener poca pendiente y no haber recibido fertilizantes de origen orgánico en los años anteriores.

Características climáticas

El diagrama ombrotérmico (figura 2) para la zona de estudio se ha construido a partir de los registros de pluviometría y de temperatura de una estación termopluviométrica cercana correspondientes a los períodos: 1941-1980 y 1963-1980, respectivamente. El diagrama permite observar la existencia de un período seco que abarca parte de junio y agosto y el mes de julio.

El experimento estaba situado en una zona de secano de clima «Mediterráneo continental», según la clasificación de Papadakis (MAPA, 1989).

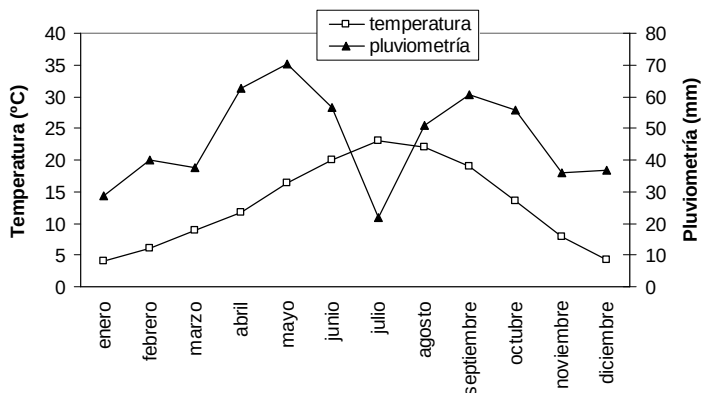


FIGURA 2. Diagrama ombrotérmico con registros de pluviometría (período 1941-1980) y de temperatura (período 1963-1980) correspondientes a la estación termopluviométrica de Ponts (Lleida, España).

Características edáficas

La zona de ensayo presenta un suelo profundo, calcáreo, no salino, de textura franco limosa y se clasificó como *Xerofluvent típico* (SSS, 2006).

2.2. Diseño experimental

El ensayo se realizó durante 4 años (2000-2004) con una rotación típica de la zona: cebada-cebada-trigo-cebada.

Los distintos tratamientos realizados (tabla 1) diferían entre ellos por el tipo de fertilizante aplicado antes de la siembra (mineral u orgánico) y por los años en que una misma parcela recibía ese fertilizante. Así pues, distinguimos entre parcelas que han recibido tratamientos minerales (distintas dosis que se repitieron durante los 4 años de ensayo) y parcelas que recibieron aplicaciones orgánicas (distintas dosis que se repitieron o no durante los 4 años).

Tratamientos (Siglas)	2000 - 2001		2001 - 2002		2002 - 2003		2003 - 2004	
	Fondo	Cobertera	Fondo	Cobertera	Fondo	Cobertera	Fondo	Cobertera
Mineral	kg N ha ⁻¹ como NA							
N0	0	0	0	0	0	0	0	0
N1	0	30	0	30	0	30	0	30
N2	30	30	30	30	30	30	30	30
N3	30	60	30	60	30	60	30	60
N4	30	120	30	120	30	120	30	120
Purín porcino	m ³ de purín ha ⁻¹ aplicado en fondo / kg N ha ⁻¹ como NA en cobertera							
P11	0	0	0	0	0	0	0	0
P23	20	60	0	0	0	0	0	0
P33	40	60	0	0	0	0	0	0
P43	80	60	0	0	0	0	0	0
P21	0	0	20	60	0	0	0	0
P31	0	0	40	60	0	0	0	0
P41	0	0	80	60	0	0	0	0
P12	0	0	0	0	20	60	0	0
P13	0	0	0	0	40	60	0	0
P14	0	0	0	0	80	60	0	0
P22	20	60	20	60	20	60	20	60
P32	40	60	40	60	40	60	40	60
P42	80	60	80	60	80	60	80	60

TABLA 1. Tratamientos con purín en fondo y tratamientos minerales en fondo y en cobertera en forma de nitrato amónico (NA) en los 4 años considerados (2000/01 a 2003/04). Cuando no se realiza la aplicación de purín en fondo y en los tratamientos con NA, se añaden 96 kg P₂O₅/ha y 107 kg K₂O/ha.

El fertilizante mineral aplicado fue el nitrato amónico (33,5% N) y las aplicaciones de fertilizante orgánico fueron de purín de porcino de engorde, todos ellos en 3 repeticiones, en un diseño en bloques al azar, sumando un total de 54 parcelas para todo el ensayo. La dimensión de las parcelas que recibían purín era de 20*12m² y la de las que recibían únicamente el tratamiento nitrogenado mineral era de 12*7m².

Todas las parcelas que recibieron la aplicación en fondo del purín de porcino fueron complementadas en cobertera con abono mineral nitrogenado puesto que en un principio se pensó que las coberteras serían imprescindibles. De la misma manera, aquellos tratamientos que no recibieron purines (tratamientos minerales y control) se fertilizaron en fondo con abono mineral fosfopotásico, con el objetivo que esos nutrientes no fuesen un limitante para el cultivo.

Una vez aplicado superficialmente el purín, este se enterraba en un plazo inferior a las 24h.

2.3. Muestreos y análisis realizados

En cada aplicación de purín se procedió a recoger una muestra para analizar su composición en el laboratorio. El traslado y conservación en nevera de dicho material se efectuó con el fin de evitar cualquier alteración posible.

Al inicio del invierno, antes de la parada vegetativa, se realizó el recuento de plántulas nacidas a partir de muestreos aleatorios. De la misma manera, periódicamente se hizo el seguimiento de la fenología del cultivo.

En primavera, a partir de la aparición del segundo nudo se procedió al uso del N-Tester o medidor de clorofila, una herramienta de manejo fácil y rápido que, mediante el uso de un método no destructivo, estima el contenido de clorofila (relacionado a su vez con el N) a partir de diferencias entre la luz absorbida a distintas longitudes de onda.

Paralelamente, en cada campaña se tomaron muestras de suelo para el posterior análisis y seguimiento de los nitratos en el suelo. Los momentos escogidos para la toma de muestras fueron tres: antes del abonado de fondo o presiembra, antes del abonado de cobertera (ahijamiento) y después de la recolección. Se tomaron muestras compuestas de tres puntos de cada parcela a partir de diversos puntos escogidos al azar, para tres profundidades distintas (0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm). Una vez extraídas se conservaron en nevera hasta su llegada al laboratorio para su posterior análisis.

Previamente a la cosecha del cereal se hicieron una serie de muestreos mediante la siega de 2 hileras de cereal de 1 m de largo con el fin de cuantificar la biomasa total y fraccionada (paja y grano) y determinar el índice de cosecha (biomasa en grano/biomasa del grano más la paja) así como para analizar la influencia de los distintos tipos de abonado sobre su valor. En laboratorio se analizó el contenido de nitrógeno en la paja.

La recolección se realizó con una cosechadora de tamaño adaptado a las parcelas experimentales. Se recolectó el grano de una fracción central de las parcelas. Durante la cosecha se tomaron muestras de grano, aproximadamente 2 kg, para determinar su contenido en nitrógeno mediante análisis en laboratorio.

2.4. Tratamiento de datos y análisis estadístico

Curvas de respuesta

Para las diferentes dosis de abonado se obtuvieron las curvas de respuesta tanto en la fertilización mineral como en la fertilización orgánica. Por comparación de estas, se obtuvieron los valores de N mineral equivalente para el

nitrógeno orgánico del purín, estudiándolo para cada campaña y fijándolo para cada producción o extracción de N.

Fueron diversos los modelos utilizados para predecir las producciones en base a la fertilización nitrogenada, entre los que destacan el modelo lineal, el modelo polinómico de segundo grado usado por Jokela (1992), así como los modelos exponenciales de Mitscherlich y Mitscherlich modificado (Klausner et ál., 1994). Dichos modelos son:

a) Lineal $\boxed{Y = ax + b}$

b) Polinómica de grado 2 $\boxed{Y = ax^2 + bx + c}$

c) Mitscherlich

$$\boxed{Y = a * \left(1 - \exp^{-c*(b+x)} \right)}$$

d) Mitscherlich modificado

$$\boxed{Y = a * \left(1 - \exp^{-c*(b+x)} \right) * \exp^{-kx}}$$

En el caso de los modelos exponenciales, «a» representa el valor de la asíntota, es decir, el rendimiento/extracción máximos; «b» representa la disponibilidad de N inicial en el suelo, equivalente al control; «c» representa la tasa de incremento de rendimiento/extracción por unidad de N; «k» es una constante obtenida con el modelo que representa el decrecimiento en las producciones o extracciones cuando se supera un determinado valor del tratamiento o variable «x». La variable producción se representa mediante la «y».

Efecto residual del nitrógeno orgánico del purín

La medida del efecto residual posterior a la aplicación del purín se ha evaluado a partir de los datos de rendimientos, y nitrógeno mineral en forma nítrica (nitratos).

El efecto residual, asociado al equivalente mineral del nitrógeno orgánico aplicado con el purín en años anteriores, se ha estudiado a partir de las curvas de respuesta obtenidas y se ha calculado en base a los resultados de rendimientos.

Con el modelo que mejor se ajustó a los valores del ensayo, y mediante los parámetros a, b, c y k obtenidos, según la ecuación, se determinó el equivalente mineral del nitrógeno orgánico del purín, aislando la variable x de la función escogida.

Finalmente, con el valor del equivalente mineral aislado (Xm) y el valor del nitrógeno orgánico (Norg), aplicado en aquel tratamiento se obtiene la relación

entre el nitrógeno disponible respecto al nitrógeno orgánico aplicado o efecto residual:

$$\text{Efecto residual} = \frac{Xm \text{ (kg N / ha)}}{Norg \text{ (kg N / ha)}}$$

Esta operación, repetida en un mismo tratamiento durante los 4 años de ensayo, permite estimar la serie decreciente.

Balance de N

El método del balance es una herramienta muy útil para la correcta gestión de las aplicaciones, siendo el balance del N el más usado por la importancia de este macronutriente en la fertilización de las plantas. La adaptación de tal método puede ser más o menos compleja en función de la información de que se disponga.

Los componentes que se incluyeron en el balance de N para el ensayo fueron el contenido en N en forma nítrica del suelo a 90 cm en dos momentos (inicio y final del experimento), el N aplicado, el N volatilizado estimado a partir de los datos de un ensayo paralelo (datos no publicados) y el N de las exportaciones del grano más la paja.

Existen otras formas de N que no se han considerado bien por no ser determinantes en las condiciones de ensayo o por la complejidad de su determinación. Entre ellas destacan el N lixiviado, el N incorporado en la materia orgánica, el N en forma amoniacal en la solución del suelo, el N fijado en el interior de las arcillas o el N desnitrificado.

3. Resultados y conclusiones

Nitrógeno aplicado

Uno de los inconvenientes de la aplicación de fertilizantes orgánicos es la irregularidad de su composición. Por ese motivo, incluso cuando los purines fueron siempre extraídos de la misma granja, en la misma época y bajo las mismas condiciones de manejo, la composición obtenida tras los análisis del laboratorio difirió sustancialmente de unos años a otros (figuras 3, 4, 5 y 6).

En los purines de cerdo utilizados como abono de fondo aproximadamente el 75% del N estaba en forma amoniacal (datos no mostrados) mientras que el resto estaba en forma orgánica (Norg).

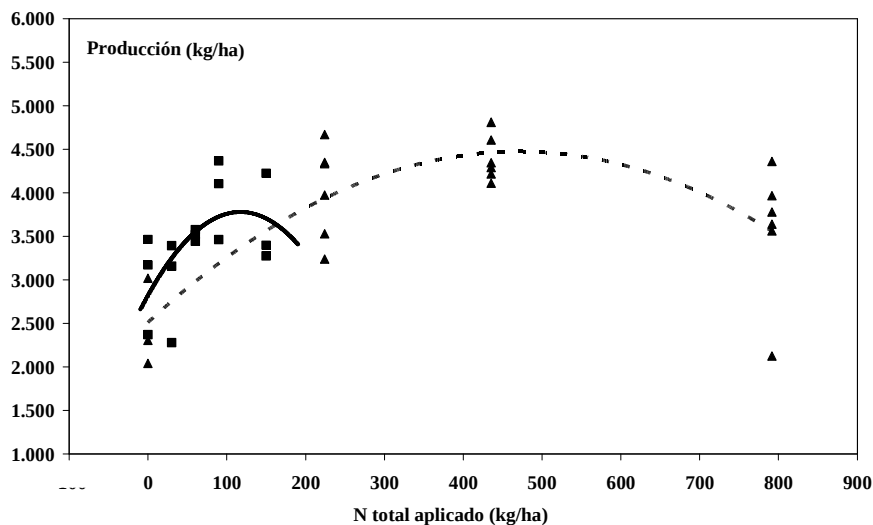


FIGURA 3. Curva de producción de grano expresado sobre materia seca (variable Y), en un cultivo de cebada, en relación al N total aplicado (variable x) para el período 2000-2001. La línea continua corresponde a la respuesta a los tratamientos minerales ($Y = -0,0697x^2 + 16,297x + 2826,6$; $R^2 = 0,37$) y la discontinua punteada a los tratamientos con purín porcino en fondo ($Y = -0,0089x^2 + 8,3472x + 2509,7$; $R^2 = 0,60$)

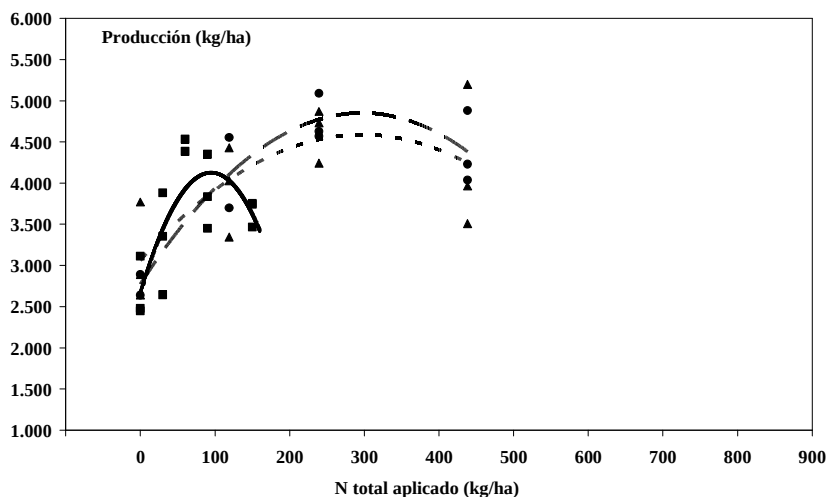


FIGURA 4. Curva de producción de grano expresado sobre materia seca (variable Y), en un cultivo de cebada, en relación al nitrógeno total aplicado (variable x) para el período 2001-2002. La línea continua corresponde a la respuesta a los tratamientos minerales ($Y = -0,1645x^2 + 30,982x + 2668,2$; $R^2 = 0,61$), la discontinua punteada a los tratamientos con purín porcino en fondo que ya recibieron purín la campaña anterior ($Y = -0,0173x^2 + 10,277x + 3062$; $R^2 = 0,54$) y la discontinua a rayas a los tratamientos con purín porcino en fondo que reciben purín por vez primera ($Y = -0,0236x^2 + 13,993x + 2773,7$; $R^2 = 0,84$)

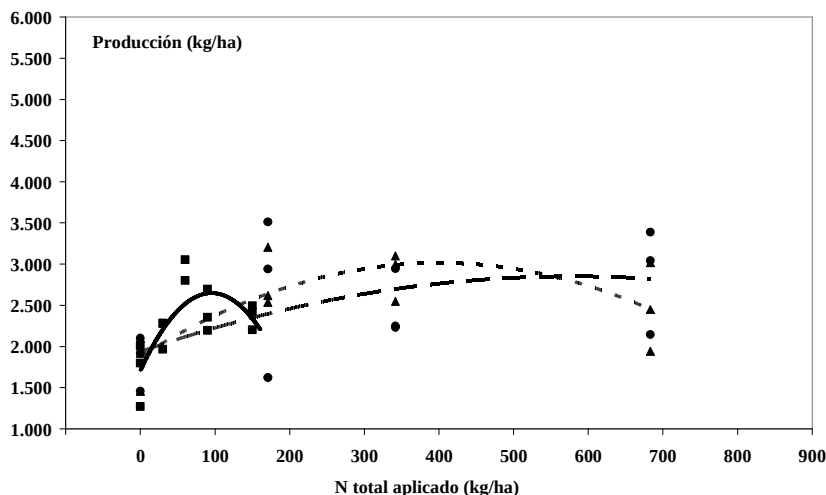


FIGURA 5. Curva de producción de grano expresado sobre materia seca (variable Y), en un cultivo de trigo, en relación al nitrógeno total aplicado (variable x) para el período 2002-2003. La línea continua corresponde a la respuesta a los tratamientos minerales ($Y = -0,1039x^2 + 19,706x + 1714,4$; $R^2 = 0,59$), la discontinua punteada a los tratamientos con purín porcino en fondo que ya recibieron purín la campaña anterior ($Y = -0,0071x^2 + 5,6589x + 1880,4$; $R^2 = 0,59$) y la discontinua a rayas a los tratamientos con purín porcino en fondo que reciben purín por vez primera ($Y = -0,0027x^2 + 3,1579x + 1936,8$; $R^2 = 0,27$)

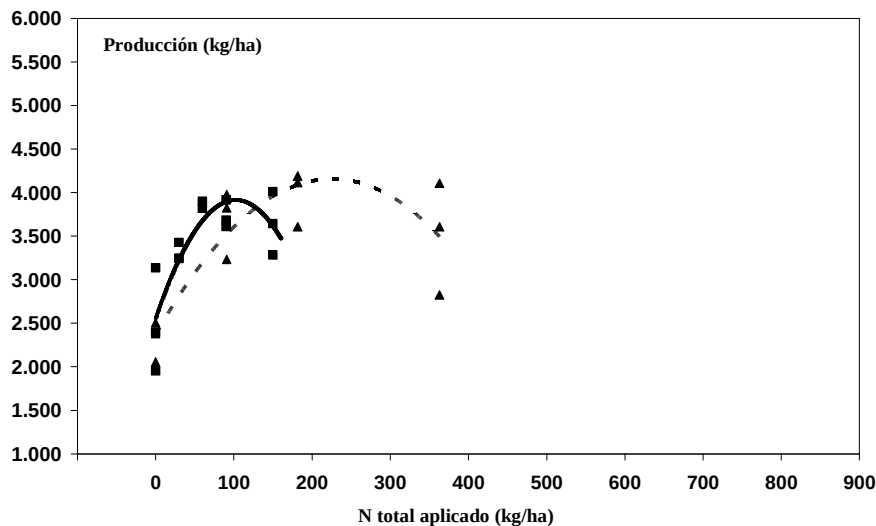


FIGURA 6. Curva de producción de grano expresado sobre materia seca (variable Y), en un cultivo de cebada, en relación al nitrógeno total aplicado (variable x) para el período 2003-2004. La línea continua corresponde a la respuesta a los tratamientos minerales ($Y = -1313x^2 + 26,726x + 2554,5$; $R^2 = 0,73$) y la discontinua punteada a los tratamientos con purín porcino en fondo que ya recibieron purín la campaña anterior ($Y = -0,0351x^2 + 15,825x + 2372,9$; $R^2 = 0,75$)

N-Tester o medidor de clorofila

Las medidas realizadas en diferentes estadios fenológicos en cada año de ensayo, en condiciones de secano, rebelaron (datos no mostrados) una débil correlación ($R^2 < 50\%$) entre los resultados obtenidos a partir de esta herramienta de análisis y las cosechas. Con estos resultados carecía de sentido utilizar el N-Tester para evaluar posibles carencias de N en los estadios tardíos de desarrollo.

Curvas de respuesta

El ensayo a partir de los distintos tratamientos ha permitido elaborar las curvas de respuesta a la fertilización para el abono mineral y para el purín (figuras 3, 4, 5 y 6). Dichas funciones permiten ver el comportamiento de ambos tipos de abonado a dosis crecientes en base a las producciones obtenidas. Además, permitirán obtener el equivalente mineral del nitrógeno orgánico del purín.

Entre los diferentes modelos estudiados pese a que el mejor ajuste se consiguió con el modelo de Mitscherlich modificado, su complejidad no presentaba excesivas ventajas respecto al modelo polinómico de segundo grado, por lo que se escogió este último para representar las funciones.

Las curvas de potencial productivo para el purín de porcino son superiores a las del abonado mineral, pero el aprovechamiento del nitrógeno aplicado en cada campaña (entre 30-50%) es inferior.

Las curvas de respuesta a la fertilización mineral, representadas por los tratamientos con aplicación de nitrato amónico de 0 a 150 UFN/ha, presentan el máximo de producción en torno a las 90 UFN/ha, siempre inferior al máximo que se puede conseguir con la aplicación de purín y que se correspondería al tratamiento a una dosis media de 40 m³/ha. Existen también situaciones de minería de nitrógeno (las exportaciones superan a las aportaciones) o de balances de nitrógeno negativos (N1, N2, N3, P23, P21, P12, P31).

En la práctica, es necesario tener en cuenta la legislación existente sobre la fertilización con deyecciones ganaderas. La Directiva 91/676/CEE, de 12 de diciembre, y su normativa derivada, limita en determinadas zonas la aplicación de nitrógeno a 170 kgN/ha y año. Para estos valores, los rendimientos obtenidos a partir de la aplicación orgánica siguen siendo ligeramente superiores a los obtenidos mediante fertilización mineral.

Las producciones acumuladas a lo largo de los 4 años (figura 7) indican mayores cosechas en aquellos tratamientos que han recibido purín año tras año, destacando el tratamiento P32 (dosis media de 40m³/ha) que llega a alcanzar los 16.000 kg/ha durante ese período, alejándose de los 13 000 kg/ha alcanzados en aplicaciones puntuales purín (P33, aplicación solo en un año de los cuatro del ensayo) o de los 14 000 kg/ha alcanzados con el tratamiento mineral N3 (90 kgN/ha).

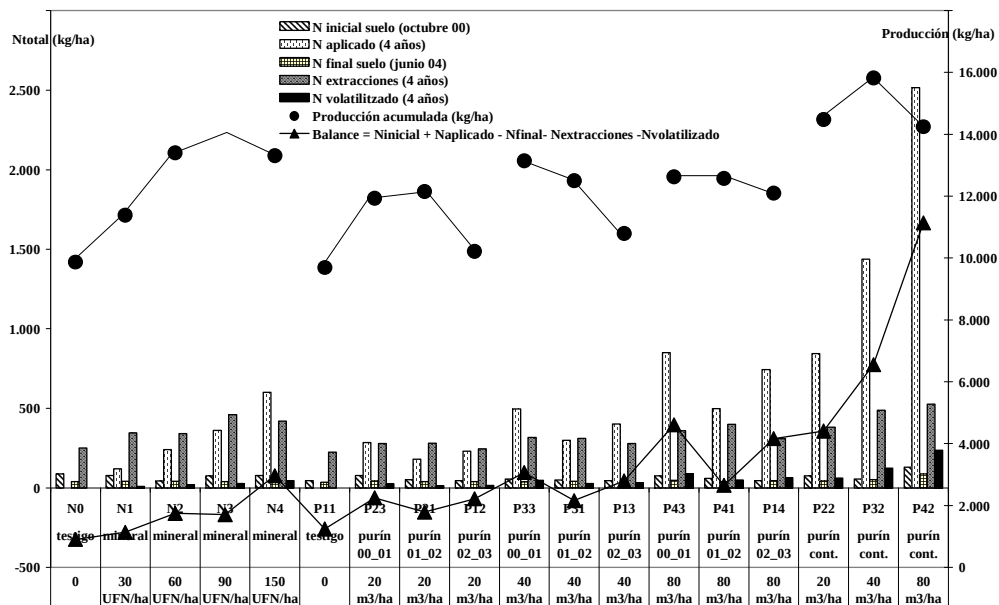


FIGURA 7. Balance del N para el período 2000-2004 y para cada uno de los tratamientos minerales (N0 a N4) y de los tratamientos con aplicación de purín en fondo

Efectos residuales

El análisis de los efectos residuales resultantes al cabo de 1, 2 y 3 años de la aplicación de purines se presentan en relación a las producciones en la tabla 2.

Tratamiento	Dosis de purín (m³/ha)	Campaña de aplicación	R1	R2	R3	Total
P23	20	2000-2001	0,40	0,23	0,08	0,71
P33	40	2000-2001	0,33	0,61	0	0,94
P43	80	2000-2001	>0,39	0,31	0,01	>0,70
P21	20	2001-2002	0,83	0,14		0,97
P31	40	2001-2002	0,33	0,10		0,43
P41	80	2001-2002	0,63	0,14		0,77
P12	20	2002-2003	0			0
P13	40	2002-2003	0,06			0,06
P14	80	2002-2003	0,23			0,23

Se representa el efecto residual en valor de N equivalente mineral (Xm, kgN /ha) de la aplicación de N orgánico (Norg) efectuada mediante el purín.

R1= efecto residual de primer año; R2= efecto residual de segundo año; R3= efecto residual de tercer año; todos ellos resultantes del cociente Xm/Norg.

TABLA 2. Efecto residual (R1, R2, R3) del N orgánico en los años sucesivos a la aplicación del purín en fondo a partir de la curva de respuesta mineral para las producciones de cereal cultivado en condiciones de secano

Tal como se ha señalado, el efecto residual posterior a una aplicación de purín se ha estudiado calculando su equivalente mineral con la función estimada correspondiente a la curva de respuesta de fertilización mineral. No se ha establecido el equivalente mineral para el año de aplicación, sino que se empieza a partir del año siguiente a la aplicación y los resultados se expresan respecto al N orgánico que contiene el purín, es decir, no se calcula el valor residual respecto al N restante del año anterior, sino que se hace referencia al N orgánico de la aplicación inicial.

Los valores de N equivalente mineral de las dosis de purín aplicadas, respecto a la variable producción, presentan una elevada variabilidad anual probablemente muy influenciada por la climatología del período de ensayo. Se constatan tendencias de mayores recuperaciones de nitrógeno tras el primer año de aplicación, decreciendo significativamente en los años posteriores.

Los efectos del nitrógeno residual del purín porcino son insignificantes en el contexto de los niveles permitidos por la Directiva 91/676/CEE. Las cantidades de N recuperado son muy bajas y únicamente merecerían atención para las dosis elevadas (80 m³/ha).

Los bajos niveles de materia seca del purín, ligados a una predominante forma amoniacal sobre la orgánica, provocan que dicho fertilizante orgánico haga disponible la mayor parte de su contenido nitrogenado en el primer año de aplicación.

Balance de Nitrógeno

La interpretación del balance de N se debe realizar en función de los parámetros estudiados y de los no estudiados, de forma que la parte que queda como incógnita se pueda atribuir a un nitrógeno no contabilizado.

La representación gráfica de los resultados del balance de N para el período 2000-2004, refleja claramente la ineficiencia de las aplicaciones anuales de purín frente al mineral, en cuanto a la cantidad de N utilizado (figura 7), para conseguir una misma producción.

También permite ver la estabilidad del N nítrico que presentan los distintos tratamientos en los 2 períodos de muestreo analizados con valores cercanos a los 45 kgN-NO₃⁻ al final del ensayo en los primeros 90 cm.

Otra particularidad que se muestra con la figura es la oscilación que presenta el N de las extracciones, que no guarda relación estricta con el N aplicado ni con los rendimientos obtenidos. El rango de variación de las extracciones (grano más paja) oscila desde los 224 kg N/ha (P11) hasta los 526 kg N/ha (P42), que equivalen a 23 y 33 kg N/1000 kg de grano recolectado, respectivamente. En general, el promedio de las extracciones se sitúa en 30 kg N por cada 1000 kg de grano recolectado.

Los datos más relevantes del balance de N son las elevadas cantidades de N que no se atribuyen a ninguna de las determinaciones halladas o estimadas y que se engloban en una «caja negra» cuyo contenido aumenta con los tratamientos de purín y es extremadamente importante cuando se utilizan las dosis elevadas.

El N que integra esta «caja negra» podría atribuirse a procesos como la desnitrificación o la lixiviación. Por un lado, las condiciones de anaerobiosis óptimas para que se dé la reducción bacteriana de NO_3^- a N_2 no son propias de la zona de estudio, de tal manera que se descarta este proceso como posible salida de N del sistema. En ningún caso se llegaría a los valores del 10% sobre el N total, tal como se menciona en Pinto et ál. (2001).

En cuanto a la lixiviación de nitratos, la climatología de la zona, así como el tipo de suelo, permiten suponer que las pérdidas de N nítrico son limitadas. Pese a esto, en la estimación del balance hídrico (datos no mostrados), se detectó un par de períodos puntuales con exceso de agua en el suelo, implicando una posible pérdida de N del sistema en forma de nitratos.

4. Conclusiones

El uso de purín porcino como fertilizante en fondo tiene un mayor potencial productivo que el fertilizante mineral aunque es menos eficiente (valores del 30 al 50%) que este último.

Los tratamientos que reciben aplicación de purín (ya sea un año puntual o cada año) presentan el máximo de producción para la dosis media de 40 m³/ha. Aplicaciones superiores pueden provocar disminuciones de los rendimientos.

Los tratamientos con aplicación continuada de purín son los más productivos, así como los que reciben aplicaciones más elevadas de N, impensables desde el punto de vista de la eficiencia y de la medioambiental, exceptuando la dosis baja de 20 m³/ha (90 a 200 kgN/ha dependiendo del origen del purín).

La curva de producción para el fertilizante mineral presenta el máximo con aplicaciones alrededor de las 90 UFN/ha aunque puede existir minería de nitrógeno del suelo.

Las curvas de respuesta presentan buenos ajustes mediante el uso del modelo polinómico de segundo grado, similares a los obtenidos con modelos más complejos como el de Mitscherlich y el de Mitscherlich modificado.

El efecto residual asociado al equivalente mineral del nitrógeno orgánico aplicado en años anteriores mediante los purines, es cuantitativamente poco importante y varía significativamente de una campaña a otra.

Para aplicaciones inferiores a los 400 kg N/ha el efecto residual, cuantificado en términos de equivalente mineral, es despreciable (inferior a los 40 kg N/ha).

El uso del balance del N permite detectar grandes cantidades de N no cuantificadas y que requieren una investigación más detallada de la dinámica del nitrógeno en estos suelos.

Los tratamientos que se aproximan más al balance cero son el tratamiento de 90 UFN/ha aplicados con fertilizante mineral y las aplicaciones puntuales de purín a dosis de 20 y 40 m³/ha; en el caso de dosis de 80 m³/ha y aplicaciones continuadas, para cualquier dosis, se observa un balance positivo.

En las condiciones de secano del presente ensayo no se puede llegar a estimar con suficiente exactitud, y, por tanto, tampoco se puede llegar a corregir, los rendimientos a partir de cuantificaciones indirectas del contenido de N en la hoja (N-tester).

Agradecimientos

Este proyecto ha sido financiado por el gobierno de España, referencia INIA: REN2001-1590/HID y hasta el año 2007 por un nuevo proyecto INIA, referencia INIA: RTA04-114-C3.

Se agradece la ayuda proporcionada por G. Estudillos y J. M. Pijuán en los trabajos de campo y laboratorio, así como a todas aquellas personas que, directa o indirectamente, han colaborado, en especial a J. Sió, C. Herrero y M. R. Teira.

5. Bibliografía

- BOSCH, A.D., BOIXADERA, J. 2006. Fertilización, sostenibilidad y calidad alimentaria. *Fruticultura profesional*, 163 extraordinario, 7-11.
- BROGAN, J.C. (ed.). 1981. Nitrogen losses and surface run-off from landspreading of manures. Martinus Nijhoff, La Haya. 484 pp.
- JOKELA, W.E. 1992. Nitrogen fertilizer and dairy manure effects on corn yield and soil nitrate. *Soil Science Society American Journal*, 56, 148-154.
- MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). 1989. Caracterización agroclimática de la provincia de Lérida. MAPA, Madrid. 288 pp.
- KLAUSNER, S.D., KANNEGANTI, R., BOULDIN D.R. 1994. An approach for estimating a decay series for organic nitrogen in animal manures. *Agronomy Journal*, 86, 897-903.
- PAM/PNUE-CAR/PP. 2004. Lignes directrices pour l'application des meilleures pratiques environnementales (MPE) en vue de l'utilisation rationnelle des engrais et de la réduction des pertes d'éléments nutritifs par l'agriculture dans la région méditerranéenne. 143 de la Série des rapports techniques du PAM. PAM/PNUE, Athènes. 471 pp.
- PINTO, M., DEL PRADO, A., CASTELLÓN, A., MERINO, P. 2001. Dinámica del nitrógeno en el suelo en relación con los residuos orgánicos y el cálculo de la dosis a

aplicar, pp. 105-122. En: Boixadera, J. y Teira, M.R. (eds). Aplicación agrícola de residuos orgánicos. Universidad de Lleida, Lleida. 356 pp.

SSS (Soil Survey Staff). 2006 (10.^a ed.). Keys to Soil Taxonomy. Soil Conservation Service-USDA, Madison. 327 pp.

BLOQUE II.2. AGRICULTURA EN ZONAS DE MONTAÑA

Caso II.2.1. Irrigación en zonas andinas. El sistema hidráulico de Tipón en Cusco (Perú)

Resumen

Las culturas prehispánicas, como la inca, han desarrollado tecnologías que les han permitido hacer un aprovechamiento racional y eficiente de los recursos naturales; desde hace más de quinientos años y en la actualidad estas obras constituyen la admiración de quienes las visitan, por las características de las estructuras y la armonía que estas guardan con el medio ambiente, en una muestra de respeto a la madre naturaleza. El Parque Arqueológico Nacional de Tipón es una muestra del desarrollo tecnológico que los antiguos peruanos desarrollaron en campo de la ingeniería hidráulica y la conservación de suelos. El complejo sistema hidráulico está constituido por dos subsistemas de riego: el subsistema de riego Pukara-Tipón ceremonial con tres canales de riego; el subsistema de Tipón fuente ceremonial. Cada uno de estos presentan características muy particulares, en cuanto al diseño de la sección transversal, encontrándose secciones trapezoidales, rectangulares y semicirculares-parabólicas,. La línea de conducción en todo el sistema no es uniforme, presenta estrechamientos y ensanches, así como una sinuosidad y en la parte de la solera del canal presenta salientes que incrementan el coeficiente de rozamiento, lo que reduce la velocidad del flujo de agua, garantizando de esta manera la estabilidad del canal: Durante el proceso constructivo de la infraestructura de riego se han efectuado correcciones que han permitido optimizar el uso de la mano de obra y los materiales. Otro detalle importante es el diseño de la estructura del cambio de dirección del canal siempre en un ángulo mayor a 90°, lo que permite un flujo de agua sin generar desborde; encontramos obras de arte muy importantes como son acueductos, saltos de agua empotrados en la pared del andén, pasos a desnivel y tomas laterales con diseños particulares. En el subsistema de Tipón fuente ceremonial encontramos un sistema de captación por debajo de los andenes 12 y 13, regulado denominado *sistema de la taza*, por el cual el flujo de agua en superficie es constante y todos los excedentes que no son captados se recuperan en otras fuentes que se ubican al pie de la terrazas inferiores y cuyo caudal es recuperado mediante un complejo sistema de canales subterráneos; con un acho de sección de 15 cm, atraviesan en forma diagonal a las terrazas hasta llegar al canal principal; este diseño tiene un carácter mítico religioso y de control. La fuente principal tiene siete puntos de tributación que hacen que el agua tenga la apariencia de que estuviera hirviendo, razón por la cual según los historiadores cuzqueños se denomina a la zona como Tipón, voz que proviene de la palabra quecha Timpuc que significa hervir, todas

estas consideraciones hacen que el sistema hidráulico de Tipón se constituye en una muestra del alto nivel de conocimiento de la hidráulica por parte de los antiguos peruanos, que desde hace más de quinientos años aplicaron principios y leyes de la hidráulica actual para el diseño de canales de riego. El diseño de la infraestructura obedece a un plan de ordenamiento territorial preconcebido donde se tiene presente la oferta y demanda de los recursos naturales suelo agua y vegetación, que ha permitido satisfacer sus necesidades a los pobladores de la zona de estudio. Tipón se constituye en un claro ejemplo de manejo sostenible de los recursos naturales, que guarda armonía con el medio ambiente.

1. Introducción

La base fundamental del desarrollo de los pueblos desde tiempos inmemoriales hasta nuestros días, ha sido la agricultura, que ha motivado al hombre a mejorar cada vez más su sistema productivo, empleando tecnologías adecuadas para dicho fin tendentes a maximizar y optimizar el uso de los recursos de que dispone, es así que las culturas preinca e inca han desarrollado obras de ingeniería agrícola en todo el territorio peruano, en las tres regiones naturales costa, sierra y selva con características peculiares para cada región, como son canales de riego, acueductos, reservorios, andenes, etc. Muchos de los cuales en la actualidad aún siguen en uso pero la gran mayoría se encuentra en total abandono por diferentes causas.

El valle del Cusco, al igual que los diferentes asentamientos culturales donde se desarrollaron las diferentes culturas prehispánicas como la cultura inca, y que tuvieron como actividad prioritaria la agricultura, han desarrollado tecnologías que les han permitido hacer frente a problemas como la falta del recurso hídrico con fines de riego, debido a la estacionalidad de las precipitaciones pluviales, la pérdida de suelos, por efecto de la erosión o el déficit de tierras productivas, debido a la configuración topográfica de sus tierras, con fuertes pendientes, las condiciones medio ambientales de la zona con bajas temperaturas y presencia de heladas; para lo cual diseñaron y construyeron infraestructuras como andenes, sistemas de abastecimiento de agua de riego y uso poblacional, seleccionaron y adaptaron una gran variedad de cultivos para la producción de alimentos, así como generaron una tecnología de uso y manejo de los recursos naturales, suelo, agua y vegetación.

Una muestra de tal desarrollo tecnológico lo constituye el Parque Arqueológico Nacional de Tipón, donde los antiguos peruanos al haber ubicado un ámbito geográfico, que presentara condiciones medio ambientales favorables para el desarrollo de la agricultura, sus actividades productivas y de servicio, tuvieron que efectuar el ordenamiento territorial, mediante la construcción de un

sistema de andenerías, para el aprovechamiento de las laderas y las zonas de quebrada, la dotación del agua de riego y el consumo poblacional mediante construcción de un complejo sistema de infraestructuras de riego y drenaje.

El sistema hidráulico de Tipón en la actualidad, y desde hace más de quinientos años de un proceso de transculturización y cambio tecnológico, se encuentra en funcionamiento y constituye la admiración de todos quienes lo visitan por el orden y belleza del diseño, la tecnología empleada en su construcción, el conocimiento de los principios y leyes que rigen la hidráulica de canales, que hacen de Tipón un ejemplo para demostrar el uso racional del agua.

En el presente estudio de caso damos a conocer las características relevantes sobre el sistema de riego de Tipón en lo referente a las estructuras existentes que muestran la pericia y el desarrollo tecnológico empleado por los antiguos peruanos que vivieron en la zona de estudio.

2. Caracterización de la zona de estudio

La zona de estudio presenta las siguientes características

2.1. Antecedentes

Según Brian S. Bauer¹⁶, es posible que en Tipón se encuentren evidencias previas al período incaico u horizonte tardío, en la zona se ha encontrado material lítico que puede ser datado hasta los años 4000 a 6000 a.C.; así mismo, se ha encontrado cerámica del período Kilke y posiblemente Wari, que ocupó el Valle de Lucre alrededor de 800 a.C., con su centro de administración en Pikillacta ubicado a siete kilómetros de Tipón y fue construido por el Inca Viracocha como palacio para su padre el Inca Yahuar Huacac.

El Dr. Alfredo Valencia¹⁷ indica que Tipón pertenece al imperio incaico y que es probable que fuera construido en los tiempos del Inca Pachacuti, o de su hijo Amaru Inca Yupanqui; las 239 ha del complejo arqueológico están rodeadas por una muralla de defensa de cinco kilómetros de largo, con cuatro áreas residenciales.

El nombre actual de Tipón, según el Dr. Luis A. Pardo, deriva del vocablo quechua Timpuj, que significa hirviendo o estar hirviendo, en referencia a la forma como el agua brota en el sector de la fuente principal.

¹⁶ Brian S. Bauer. Investigador arqueólogo de la Universidad de Chicago. EE.UU.

¹⁷ Dr. Alfredo Valencia Zegarra, docente investigador de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Instituto Nacional de Cultura del Cusco.

2.2. Ubicación

El grupo arqueológico de Tipón se ubica al sur de la ciudad del Cusco, entre las poblaciones de Huasao y Oropesa, en la jurisdicción de la comunidad campesina de Choquepata, del distrito de Oropesa, provincia de Quispicanchi, departamento de Cusco; con una extensión de 239 ha, sus coordenadas geográficas son 71°48'20" y 71°50'17" longitud oeste y 13°32'57" y 13°35'30" latitud sur, una altitud media de 3400 m, hidrográficamente pertenece a la cuenca del río Vilcanota, subcuenca del río Huatanay, microcuenca de Pukara.

2.3. Acceso

El grupo arqueológico de Tipón se ubica sobre la margen izquierda de la vía asfaltada de Cusco-Urcos km 18+00, de donde se accede por una vía carrozable de 5 km cruzando el río Huatanay, también se accede mediante un camino inca actualmente restituído, el mismo que se inicia en el centro poblado de Choquepata, cuenta con una red de caminos de herradura que permite el acceso a las comunidades vecinas.

2.4. Clima

De acuerdo a la clasificación climática de Thornthwaite (1931), la zona presenta un clima C'A'd « Sub Húmedo Seco Megatermal» con nula o pequeña cantidad de exceso de agua, un rango de precipitación total anual de 649.5 mm, una temperatura media anual de 12.49 °C; estas condiciones climáticas permiten la práctica de una agricultura en secano y con riego, en base a cultivos de pan llevar como: *Zea maiz* (maíz) *Amarantus caudatus* (kiwicha), *Solanum tuberosum* (papa), *Vicia faba* (habas), *Lupinus mutabilis* (tarwi), *Oxalis tuberosa* (oca), *Ollucus tuberosus* (olluco), *Tropaelum tuberosum* (isaño), *Chenopodium quinoa* (quínoa), *Hordeum vulgare* (cebada) y *Avena sativa* (avena), hortalizas, etc.

Parámetros Climatológicos

Los principales parámetros climáticos para la zona son los siguientes:

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total/ Promedio
Precipitación.	140.4	112.6	96.5	38.9	7.9	4.3	2.9	5.6	22.2	49.0	67.3	101.9	649.5
T. ^a Mínima	7.2	7.1	6.6	4.3	1.1	-0.9	-1.5	0.5	3.6	5.4	6.6	6.6	3.88
T. ^a Media	13.4	13.4	13.2	12.6	11.3	10.2	9.9	11.3	12.8	13.9	14.2	13.7	12.49
T. ^a Máxima	19.4	19.5	19.6	20.2	20.5	20.5	19.9	20.5	20.6	21.2	21.2	20.2	20.28
H. ^a R. ^a	71.6	71.7	72.8	70.6	65.0	61.4	59.9	56.6	57.4	58.5	60.6	65.4	64.29
ETP mm.	153.9	132.9	136.4	123.1	111.8	98.9	105.7	122.3	143.6	172.7	171.5	168.6	136.78

TABLA 1. Parámetros climatológicos. Fuente: SENAMHY Estación MAP, Kayra

La precipitación total anual para la altitud media de la zona de estudio se estima en 649.5 mm por año, la precipitación muestra un comportamiento estacional, los meses con mayor precipitación se presentan entre diciembre y febrero y los más secos están comprendidos entre los meses de mayo y agosto. Así mismo podemos señalar que se pueden presentar precipitaciones esporádicas en los meses de abril a setiembre. La temperatura mínima tiene un comportamiento similar con valores por debajo de los 0 °C y se presentan por lo general en los meses de junio y julio. Las temperaturas máximas tienen valores superiores a los 20 °C y se presentan en los meses de octubre y noviembre. La temperatura media presenta una media anual de 12.49 °C; la humedad relativa en promedio es de 64.29%, varía entre 72.8% (marzo) y 56.6% (agosto), presenta una evapotranspiración potencial media de 136.78 mm.

2.5. Ecología

De acuerdo con el sistema de clasificación de zonas de vida propuesto por Holdridge, L. (1947), el área en estudio se ubica en la zona de vida bosque húmedo, Montano Subtropical bh-MS; provincia de humedad: HÚMEDO. El relieve es eminentemente empinado, haciéndose más suave conforme el borde o parte superior de las laderas se aproximan a la zona de valle y un tanto mas suaves en el límite con las zonas de páramo que presentan gradientes moderadas por efecto de la acción glacial pasada, dominan por lo general los suelos profundos, arcillosos, de reacción ácida, con tonos rojizos a pardos. La vegetación natural clímax prácticamente no existe se reduce a pequeños restos o bosques residuales como el chachacomo (*Escalonia sp.*), queuña (*Polylepis sp.*), kiswar (*Buddleia incana*), pata kiska (*Cassia hookerianna*), tancar (*Solarum polidolicoides*), roke (*Colletia spinosa*), lloq'e (*Kagenickia lanceolate*), molle (*Tecoma mollis*); así como especies semi arbustivas y herbáceas: paja (*Stipa ichu*), marqhu (*Ambrosia puruviana*), muña (*Minthostachis glabrecens*), pinco pinco (*Ephedra andina*), supay ccarco (*Nicotina glauca*), paico (*Chenopodium ambrosoides*), jahuancollay (Cactus peruviiano), yahuar choncca (*Enothero virgata*), chiri chiri (*Barberus bolivianna*); entre las planta introducidas tenemos eucalipto (*Eucaliptus globulus*), capuli (*Prunus serotina*), ciprés (*Cupresus macrocarpus*) y sauco (*Sambucus peruviana*)

La fauna representativa de la zona estudio registra las siguientes especies: (*Didelphys permigra*) raposa, zorrino, (*Mustela Sp*) comadreja, (*Mustela frenata*) ratón de campo, (*Felix concolor*) puma, (*Felix pajerus*) oscollo o gato de pajonal. Aves: (*Mothopracta fuluensis*) llutu o perdiz, (*Frigilus jaqui*) picchulin, (*Falco spareverius*) killichu, (*Columbia plumbia*) paloma, (*Yito alba*) lechuza, (*Tardue chihuanco*) chuchito, (*Zonotricha capesi*) pichinco, (*Spinus stratus*) chayña.

Reptiles: (*Jachirus peruvian*) culebra común, (*Protoaporus boliviana*) lagartija común. Batracios: (*Thelmatobios marmoratus*) kayra o rana. Rodores comestibles: (*Cavia porcellu*) cuy o conejillo de indias.

2.6. Principales características de los suelos

Los suelos del ámbito de estudio han sido modificados por los antiguos pobladores que la habitaron, quienes, para poder aprovechar mejor este recurso, tuvieron que modificar la pendiente del terreno mediante la construcción de andenes¹⁸; el Dr. Luis E. Valcárcel¹⁹ indica que los andenes son «sistemas de macetería» por las características que presenta su construcción y que son propios de la región andina de donde deriva su nombre «Andenes de Andes». Existen diferentes tipos de andenes, los cuales tiene relación con la época de construcción, el uso de los mismos, el nivel social al cual pertenecen (gobernantes o al pueblo), El arqueólogo Julio Masa indica que en Tipón podemos encontrar andenes de la época Inca y andenes de la época Wari.

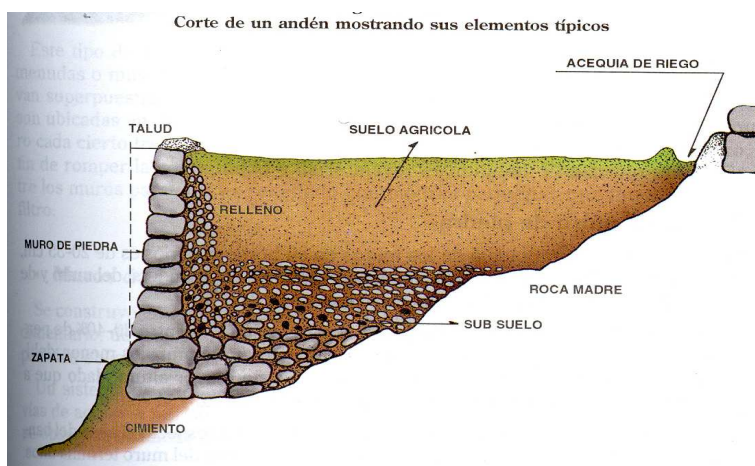


FIGURA 1. Representación del corte transversal de un andén

La estructura del andén presenta un muro de contención exterior de piedra labrada o rústica de una o dos caras; en la mayoría de los andenes con muros de

¹⁸. Andenes: Estructuras construidas en forma de plataformas escalonadas, que tienen un muro de contención o talud de piedra labrada o rústica, que permite el laboreo agrícola en zonas de ladera; tienen una estructura muy particular en lo que se refiere al muro y la plataforma del andén, de acuerdo con la función que desempeñe y la época de construcción.

¹⁹ Dr. Luis E. Valcárcel. Investigador de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

piedra labrada, este viene a ser solo un enchape o adorno, por detrás de este se encuentra el muro de contención en base a piedra rústica con mortero de argamasa de arcilla, la plataforma está construida sobre un núcleo en la parte inferior constituido por material grueso de piedras, luego sobre esta se colocan capas de materiales más finos como arcilla, material orgánico y una capa de tierra agrícola de espesor variable entre 40 y 60 cm o más, con sus respectivos sistemas de canales de riego, así como un sistema de drenaje, que garantiza la estabilidad del andén.

El sector principal de Tipón debió ser una gran cárcava por donde discurrían las aguas de la actual fuente ceremonial, ubicado en la cabecera del sistema de andenes y las aguas de escorrentía superficial; las condiciones climáticas, topográficas y la amplitud de la cárcava, así como la disponibilidad de material lítico, permitió que los constructores prehispánicos como los incas construyeran trece andenes en la parte central y a ambos lados, con su respectivo sistema de abastecimiento de agua de riego y un complejo sistema de drenaje en cada una de las terrazas, que permitió la distribución eficiente de agua de riego, así como garantizar la estabilidad de las mismas.

Los dos primeros andenes centrales y los andenes laterales que se encuentran por encima del nivel de flujo de la fuente ceremonia o principal estaban irrigados por las aguas del río Pukara, los once andenes restantes así como los andenes laterales están irrigados actualmente por las aguas captadas en la fuente principal, la altura de los muros o taludes de los andenes varía de 1.50 a 5.50 m.



FIGURA 2. Vista panorámica del sistema de andenes de Tipón

Uso actual de los suelos

Los miembros de la comunidad campesina de Choque pata Tipón, usufructuaban las tierras, cultivando en ellas cultivos andinos como maíz, papas, quínoa, ollucos, cultivos introducidos como hortalizas hasta el año 1990, a partir

del cual el Instituto Nacional de Cultura declara la zona como Parque Arqueológico Nacional de Tipón, estableciéndose en ella áreas intangibles, áreas de uso restringido, estando en uso el sistema de andenerías del sector de Patabamba (comunidad aledaña).

2.7. Población

En el complejo arqueológico de Tipón, según el Dr. Alfredo Valencia, se estima la siguiente distribución poblacional: 50 personas vivieron en el sector de Sinkunakancha (cerca de la entrada), de 20 a 30 personas en las habitaciones cerca de la fuente principal, 40 personas en el sector de Intihuatana, en el sector hoy comunidad de Pukara un mínimo de 100 (aquí probablemente vivía la nobleza inca) personas, unas 500 personas vivían entre las murallas de Tipón, se estima que existía una población flotante de tal vez 1500 personas que incluye a los Mitmas²⁰ quienes cultivaban la tierra, artesanos (especialistas en textiles, cerámica, piedra, metales), quienes vivían fuera de las murallas.

3. Metodología

La metodología empleada en el presente estudio de caso, ha sido la siguiente:

Revisión de información secundaria: Se ha revisado información referida a la zona de estudio como son crónicas escritas por cronistas mestizos y españoles; documentación arqueológica, información cartográfica.

Trabajos de campo: Se ha efectuado la medición en campo de las diferentes características y parámetros hidráulicos de la infraestructura de riego, para contrastar la información secundaria.

Se han desarrollado entrevistas con profesionales que laboran en el ámbito de estudio del Instituto Nacional de Cultura, así como con los pobladores de las poblaciones vecinas.

4. El sistema hidráulico de Tipón

4.1. Descripción del sistema hidráulico

Las características de construcción de los canales obedecen a una alta tecnificación en lo que es la ingeniería hidráulica, ya que fueron y siguen siendo la admiración de los que la ven. Como indica don Pedro Ciesa de León, cronista Español:

²⁰ Mitmas: Personas de otros sectores que eran reclutados para trabajos al servicio de los nobles incas.

Y como los ríos bajan de la sierra por estos llanos, y algunos de los valles son anchos, y todos se siembran o solían sembrarse cuando estaban más poblados, sacaban acequia en cabos y por partes, que es cosa extraña afirmarlo, por que las echaban por lugares altos y bajos, y por laderas de los cabesos y haldas y de sierras que están en los valles, y por ellas mismas atraviesan muchas, unas por una parte y otras por otra, que es gran delectación caminar por aquellos valles, porque parece que se anda entre huertas y florestas llenas de frescuras. Tenían los indios, y aún tienen, muy gran cuenta en esto de sacar el agua y echarla por estas acequias; y algunas veces me ha acaecido a mi parar junto a una acequia, y sin haber acabado de poner la tienda, estar la acequia seca y haber echado el agua por otra parte. Porque como los ríos no se sequen, es en mano de estos indios echar el agua por los lugares que quieren... Y volviendo al riego de estos indios, como en él tenían tanto orden para regar sus campos, la tenían mayor y tienen en sembrarlos con muy gran concierto.

La cita hace referencia a cómo en esa época se aprovechaba al máximo las tierras para cultivo, para lo que ellos construyeron un vasto sistema de andenerías, con sus respectivos sistemas hidráulicos (canales), empleándose para ello gran cantidad de mano de obra, lográndose así transformar el paisaje natural como lo podemos apreciar en Tipón.

El Inca Garcilaso de la Vega, cronista mestizo, hace referencia a la construcción de las infraestructuras de riego; la majestuosidad que tenían los canales de la sierra, y cómo nacían los canales de hermosas fuentes y manantiales los mismos que regaban los pastos naturales, base alimentaría de los auquénidos.

Fue sacar una acequia de agua de más de doce pies de hueco que corría más de cientos y veinte leguas de largo; empezaba de lo alto de las sierras que hay entre Parcu y Picuy, de una hermosas fuentes que allí nacen, que parecen caudalosos ríos. Y corría el acequia hacia rucana, servía de regar los pastos que hay por aquellos despoblados,... otra acequia semejante atraviesa casi todo Contisuyo, y corre del Sur a Norte... y sirve o servía solamente para regar los pastos cuando el otoño detenía sus aguas. De estas acequias para regar los pastos hay muchas en todo el imperio que los Incas gobernaban.

En la cita debemos hacer notar que lo referente a la longitud del canal esta es un tanto exagerada, por lo demás es coherente la apreciación.

Sobre la forma de cómo fueron construidos los canales tenemos la siguiente cita del padre Bernabé Cobo, cronista español, quien manifiesta lo siguiente:

Aprovechaban el agua de los ríos, regando con ella todas las tierras a donde alcanzaba, y admirables que tenían; porque estaban tan bien sacadas y con tanto orden, que admira el considerar cómo careciendo de nuestras herramientas las podían abrir y edificar por que en las tomas de los ríos hacían

muy fuertes reparos contra sus corrientes y avenidas llevándolas por muchas leguas sacadas a nivel y algunas muy caudalosas; y no sólo las encaminaba por tierra llana, sino también por laderas y cerros altos y fragosos, y lo que es más por riscos, y peñascos y lajas muy empinadas y derechas; por los cuales lugares las abrían y sacaban con notable trabajo y artificio, cavando por donde guiarlas; y donde ni aún para esto había disposición, como cuando era forzoso echarlas por alguna laja o peña tajada, sacaban desde abajo por muchos estados una pared de piedra seca arrimada a las dichas lajas o desviada, cuando era forzoso salvar alguna quebrada, y por encima de ellas conducían el agua. Donde era menester hacían estas acequias con las paredes de piedra seca arrimada a las dichas lajas o desviada, cuando era forzoso salvar alguna quebrada, y por encima de ellas conducían el agua. Donde era menester hacían estas acequias con las paredes de piedra seca, y donde no, cavadas solamente en la tierra. Llevábanlas por lugares tan fragosos y difíciles, por que no sólo regaban la tierra llana, sino también la doblada, mediante los andenes, sin dejar de perder palmo de tierra.

Es interesante la descripción de cómo fueron captadas las aguas y sacados los canales; por dónde se conducían y sobre todo por el orden que estas guardaban. Todo este comentario se puede apreciar en la zona de estudio, la construcción de los canales se debió hacer teniendo algún conocimiento de nivelación, para poder conducir las aguas por laderas con una mínima pendiente, así mismo cuando estas se ubican en rápidas o caídas a través de las crestas de los cerros o alguna falla geológica, y no solo los canales de regadío se utilizaron para las partes planas sino que tuvieron que adoptar un sistema de distribución en los andenes, que les permitía un manejo eficiente de los recursos agua y tierra, de igual forma tenían que salvar una serie de obstáculos construyendo para ello los paramentos o muros que les permitiría pasar el agua de una margen a otra de un río o quebrada.

En Tipón destaca sobremanera la armonía funcional y estética típica de los arquitectos quechuas, alcanzada en la conducción del agua a través de las finas estructuras de piedra, ya sea a través de acueductos, algunos de ellos subterráneos o de canales, rápidos y saltos de agua.

El sistema hidráulico de Tipón se divide en dos sectores, en base a la captación de las aguas:

- El subsistema de Pukara Tipón Ceremonial
- El subsistema Tipón Fuente Ceremonial

a.- El Sub Sistema Pukara Tipón Ceremonial

Este sistema está constituido por tres canales de riego, los cuales tiene su origen en la quebrada de Sacqrahuayco captando las aguas del río Pukara, en tres

puntos diferentes; esta es una característica que se encuentra en todos los sistemas de canales de la época prehispánica, de esta manera, se asegura el abastecimiento de agua a todos los andenes y, permite la captación de las aguas excedentes o que no hayan podido ser captadas por el canal superior y, en algunos casos, cuando uno de ellos podría haber sufrido deterioro o se encuentre en reparación, el abastecimiento de agua no se interrumpe.

Los puntos de captación se ubican fuera de la muralla que circunda Tipón, sobre la margen izquierda del río Pukara, a una altitud media de 3790 metros, dos de estos sistemas se encuentran solo en evidencias superior e inferior, el canal dos o intermedio es el que ha sido estudiado y rehabilitado en algunos tramos, faltando un tramo hacia la toma principal en la quebrada de Sacqrahuayco, donde se ubica una caída de agua, en cuya base se represa el agua debido a la presencia de material lítico (bloques de piedra), es una captación rustica, que permite la regulación del flujo de captación en base al colocado de pequeños bloques de piedra en las partes intermedias (según lo descrito por Alfredo Valencia).

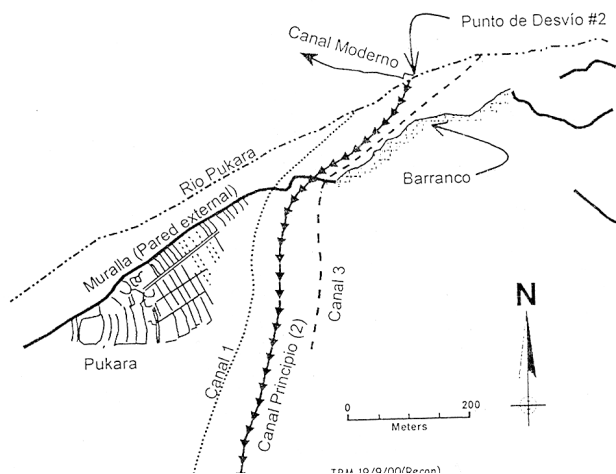


FIGURA 3. Croquis de los canales del sistema Pukara Tipón

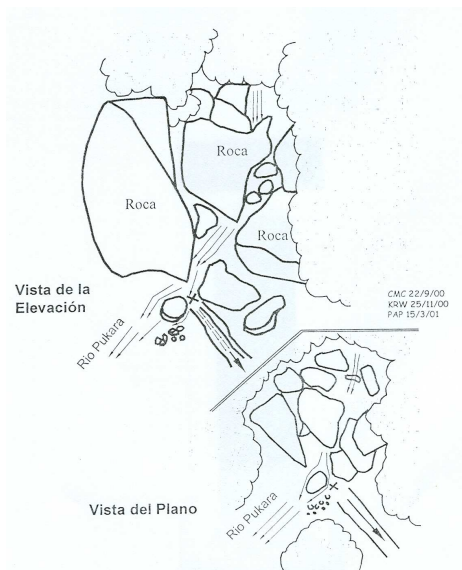


FIGURA 4. Croquis de la captación del canal 2. Sector de Sacqrahuayco, Pukara

El canal, desde su captación hasta la parte superior de los andenes principales de Tipón, tiene una longitud aproximada de 2 850 m, los primeros 600 metros se encuentran deteriorados debido a la existencia de derrumbes y desplazamientos de tierra, el canal sigue las curvas de nivel a través de la ladera, así mismo, sigue el sentido de la pendiente en una rápida que se ubica en la divisoria de aguas donde los riesgos de erosión son bajos, en dos tramos de su recorrido hasta llegar al acueducto; en la figura 5 se aprecia un tramo del canal que tiene una pendiente que va desde un 10 a un 40%, la sección del canal es rectangular, presenta un sistema de regulación de la velocidad del flujo de agua mediante el estrechamiento y ensanche de la sección del canal de 20 a 35 cm, en la solera o piso, presenta salientes que están dispuestos en contra de la corriente, lo que hace que el flujo del agua sea turbulento, así mismo presenta una sinuosidad, lo que incrementa los coeficientes de fricción, reduciendo de esta manera los riesgos de erosión y desborde; al pie o en la base de la rápida presenta un desvío del recorrido del canal hacia el lado izquierdo en un ángulo de más de 90°, diseño que no permite que en este punto se genere un desborde por arremolinamiento del flujo de agua (figura 6).



FIGURA 5. Sección de canal rectangular



FIGURA 6. Sección de canal con un ángulo superior a 90°

En terreno relativamente plano, la pendiente del canal es del 2 al 5%, es de resaltar que, a más o menos 40 m aguas abajo del punto de desvío, la sección del canal cambia a la forma semicircular en la base, a manera de una «U» de 15 a 20 cm de ancho y un alto variable de 20 a 30 cm; la sección es labrada en una sola pieza, sobre la cual se sobreponen otros bloques de piedra para dar la forma de «U» a la sección del canal (figuras 7 y 8), donde se aprecia también que se mantiene el patrón constructivo del estrechamiento y ensanche de la sección del canal para incrementar o reducir la velocidad del agua en el canal.

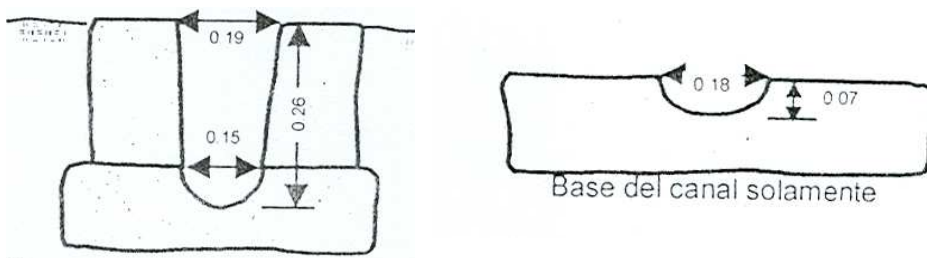


FIGURA 7. Secciones del canal en «U»



FIGURA 8. Sección semicircular en forma de «U»

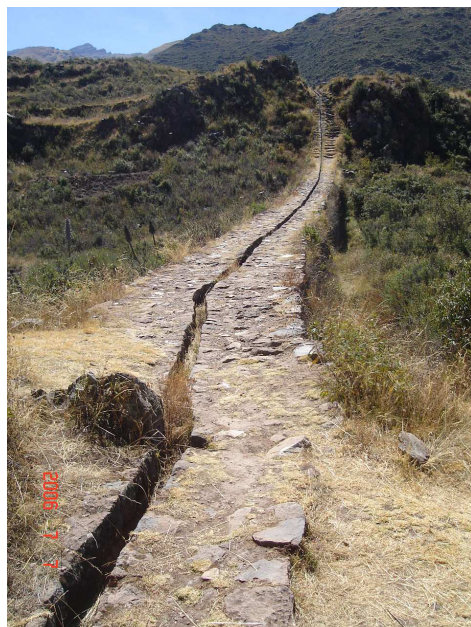


FIGURA 9. Acueducto de la parte alta de Tipón

Otra obra de arte importante, construida en Tipón, es el acueducto, el cual presenta detalles muy destacados: toda la estructura es de forma trapezoidal, con un alto de 3,50 m, un ancho superior de 1,90 m y la base mayor de 3,20 m, la sección del canal es semicircular en forma de «U», una marcada sinuosidad del canal, la solera un alto coeficiente de rugosidad, que permite la regulación de la velocidad del flujo de agua (figura 9).

La construcción de los canales debió tener un trazo preliminar y, durante el proceso constructivo, se hicieron las correcciones pertinentes que permitieron optimizar la mano de obra y la disponibilidad de materiales; sobre todo garantizar la estabilidad de la infraestructura, en la figura 10 se aprecia en el lado izquierdo un punto de alineamiento del canal, de proseguir con la ruta propuesta se hubiera tenido que construir otro tipo de obras de arte para garantizar el abastecimiento de agua hacia el sector de Intihuatana y Tipón Ceremonial, por lo que tuvieron que optar por un nuevo trazo (lado derecho), sin alterar el hito de referencia.



FIGURA 10. Corrección del trazo original

Las obras de arte del sistema hidráulico de Tipón presentan características particulares; en los saltos de agua, el diseño de la sección de esta estructura evita el desborde del agua fuera del canal y ocasionar problemas en el andén inferior, El salto es de forma trapezoidal invertida con la base mayor al inicio del salto y la base menor en la base del mismo; la sección tipo del canal es de forma trapezoidal, 20 cm en la base (interior) y 16 cm en el borde exterior.



FIGURA 11. Diseño del salto hidráulico



FIGURA 12. Sección tipo del canal. Salto hidráulico

En el sector de Intihuatana, se puede apreciar un tramo de canal con piedra labrada del tipo ceremonial el cual mantiene las características de diseño, es decir, presenta estrechamientos y ensanches en la sección del canal, que varía de 9 a 14 cm, de recorrido sinuoso.



FIGURA 13. Sección del canal en Intihuatana

Los constructores de Tipón también diseñaron una vasta red de canales subterráneos que les permitió abastecer de agua a los lugares estratégicos como son los centros ceremoniales (con un carácter mítico religioso), para consumo poblacional, etc. En la figura 14, apreciamos la salida de un canal subterráneo que presenta una sección trapezoidal de 20 cm de base menor y 23 cm de base mayor, una altura de 23 cm, la salida es un estrechamiento de la sección que le permite incrementar la velocidad de salida del flujo de agua hacia un cambio de dirección que tiene un ángulo mayor de 90°, el borde externo del canal es de 22 cm, constituido por un solo bloque de piedra (figura 15).



FIGURA 14. Vista de la salida de un canal subterráneo



FIGURA 15. Derivación del flujo del canal

El canal del subsistema Pukara – Tipón ceremonial llega hasta la cabecera de los andenes principales irrigando dos andenes principales y los andenes laterales, mediante canales que se encuentran en el mismo andén, así como por saltos

hidráulicos mediante canales empotrados en el talud del andén, lo cuales tienen una caída vertical de 3,0 a 3,5 m de sección trapezoidal, con una inclinación del 3 al 5%; al pie del salto se tiene un bloque de piedra que sirve de dissipador de energía, con sus respectivos pozo y remanso que permiten aquietar el flujo del agua, figuras 16 y 17.



FIGURA 16. Canal empotrado en talud del andén



FIGURA 17. Detalle del pozo de dissipación

b. El subsistema Tipón - Fuente Ceremonial

El subsistema de canales se inicia en la fuente principal que se ubica en el andén número 11 del conjunto de andenes del sector de Tipón principal, el cual presenta características muy particulares, pues el flujo de agua es constante con ligeras variaciones durante todo el año, la captación de las aguas para esta fuente del tipo ceremonial debió de efectuarse por debajo de los andenes número 12 y 13, mediante un sistema de regulación que denomino *diseño de la tasa*, cuyo caudal ha sido calculado en un flujo crítico mínimo y los excedentes que pudieran presentarse son derivados a otros sistemas de conducción y afloran en otros puntos del complejo sistema de andenes; como se aprecia en el andén número 10, este diseño tiene fines mítico religiosos de culto al agua, este diseño de captación no permite que se incremente el caudal de salida en la fuente principal en la época de lluvias.

De acuerdo con estudios efectuados de la fuente principal, esta tiene siete canales subterráneos que vierten agua a la fuente principal en varias direcciones, tres al costado izquierdo, dos en la parte posterior y dos en el lado derecho; en

estas condiciones, el flujo de agua genera una turbulencia que da la sensación de que el agua está hirviendo.



FIGURA 18. Fuente Ceremonial Tipón

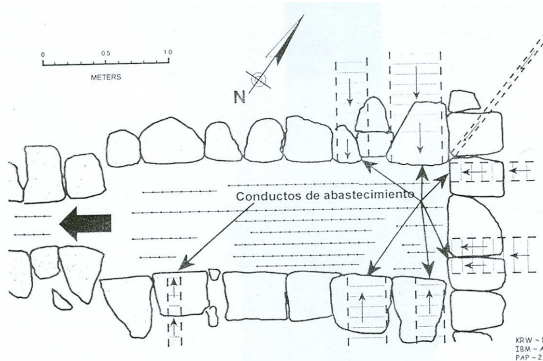


FIGURA 19. Detalles de la Fuente Ceremonial Tipón

A partir de la fuente ceremonial, se inicia el canal principal que se divide en dos canales (derecho e izquierdo), para poder irrigar los andenes centrales y los laterales, respectivamente, así como dotar de agua a las fuentes ornamentales y las áreas de cultivo que se encuentran colindantes con Tipón.

La capacidad creativa y técnica de los antiguos constructores de Tipón, generó un sin número de canales subterráneos, los cuales estaban interconectados a puntos de regulación que les permitía administrar eficientemente la oferta hídrica en todos los andenes. Así mismo, cada andén tiene dos canales secundarios para riego, ubicados en la parte lateral del andén; para derivar los excedentes o llevar el agua de un andén a otro tienen sus respectivos saltos de agua, así como compuertas de regulación.

En la figura 20, se muestra la fuente ornamental donde se aprecia un sistema de canales, los cuales se encontraban cubiertos con sus respectivas tapas de piedra y sobre ellos una capa de tierra, se aprecia los puntos de reunión y distribución de las aguas, a voluntad de quien las administra.



FIGURA 20. Detalles del sistema que permitía la regulación del flujo en las fuentes

Nuestra teoría del sistema de captación regulada de la *tasa*, queda demostrada al tener una fuente de agua subterránea al pie del andén número 10 sobre el andén número 9, el cual tiene una sección rectangular de 50 cm de ancho y un alto de 25 cm, de flujo variable según la estación del año, que deriva todas las aguas del acuífero que no son captadas en la fuente ceremonial; las aguas son derivadas a un sistema de canales subterráneos que discurren a lo largo de la base del andén, son de sección rectangular con un ancho promedio de 14 cm y un alto de 10 cm, de recorrido sinuoso, en un punto se hace una derivación de las aguas hacia la plataforma del andén 9 el cual lo atraviesa en forma diagonal hasta llegar al borde del andén y verter las aguas sobre el canal principal que discurre al costado del andén, este canal sobre la plataforma del andén está por debajo de unos 30 cm de la superficie de la plataforma del andén, tiene una tapa de piedra.

5. Resultados.

El diseño de la captación en el sector de Sarcqrahuayco-Pukara, se ha efectuado aprovechando las estructuras líticas existentes en él sin alterar la misma, lo que le da mayor estabilidad y solidez, frente a posibles problemas de deslizamiento y permite su rápida recuperación y mantenimiento.

La línea de conducción del canal principal en la zona de ladera sigue las curvas de nivel con una pendiente que varía del 2 al 5%; las rápidas se han emplazado en la zona de la divisoria de agua, donde los riesgos de erosión son muy bajos, lo que permite mayor estabilidad a las estructuras, las pendientes varían del 10 al 40% y más.

La sección transversal del canal no es uniforme, presenta variaciones en el ancho de la sección, en relación a la pendiente del terreno; así mismo, la línea de conducción no es uniforme, presenta sinuosidades, la solera y las paredes del

canal presentan irregularidades que hacen que se reduzca la velocidad del flujo de agua y que el coeficiente de rugosidad (n) sea alto, como lo determinado en los Canales prehispánicos del Valle de Cusichaca, de 0,1091.

En Tipón encontramos tres tipos de sección transversal: rectangular, trapezoidal y la semicircular (parabólica), lo que estaría en relación con la época de construcción, la eficiencia de conducción o, tal vez, con la importancia del área a irrigar a fin de darle mayor armonía al paisaje.

El patrón de diseño del cambio de dirección del canal, no es en ángulo recto (90°), sino en más de 100° lo que permite mayor fluidez del agua y reducir los riesgos de desborde.

Se ha podido determinar que, durante el proceso de construcción del canal, se han efectuado modificaciones al planteamiento original, buscando siempre la ruta de mayor eficiencia de conducción y el de mayor estabilidad y seguridad estructural.

El caudal de diseño para el canal principal de Pukara – Tipón Ceremonial, de acuerdo con las características de la sección transversal, es de 80 a 110 l/seg.

En el subsistema de Tipón Ceremonial, encontramos un complejo sistema de regulación de los flujos de agua en los andenes, que permite la conducción de agua en forma superficial y mediante canales subterráneos, que permite una administración eficiente del recurso hídrico, así como la captación de las aguas de drenaje de los andenes, para su utilización en el riego aguas abajo.

Las estructuras diseñadas para los saltos de agua tienen un diseño trapezoidal tanto en su sección como en la sección longitudinal, que hace que permite que el flujo de agua no produzca desborde a la entrada y salida del salto de agua.

6. Conclusiones

El sistema hidráulico de Tipón constituye una muestra del alto nivel de conocimiento de la hidráulica por parte de los antiguos peruanos, que, desde hace más de quinientos años, aplicaron principios y leyes de la hidráulica actual para el diseño de canales de riego.

El diseño de la infraestructura obedece a un plan de ordenamiento territorial preconcebido donde se tiene presente la oferta y la demanda de los recursos naturales suelo, agua y vegetación, que ha permitido satisfacer sus necesidades a los pobladores de la zona de estudio.

Tipón se constituye en un claro ejemplo de manejo sostenible de los recursos naturales, que guarda armonía con el medio ambiente.

El sistema hidráulico en su recorrido presenta una sección irregular, debido a su ubicación topográfica y a su función, lo que ha permitido a los antiguos

peruanos reducir al mínimo los problemas de erosión en el cauce del canal y fallas en el mismo.

7. Bibliografía

- ANGLÉS VARGAS, V. 1988. Historia del Cusco Incaico, tomo II. Industrial Gráfica S.A. Lima, Perú.
- ASTETE VICTORIA J. F. 1984. Los sistemas hidráulicos del valle del Cusco (prehispánicos). Tesis de Pre-Grado, Programa Académico de Antropología y Sociología, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- CIEZA DE LEÓN, P. 1973. La crónica del Perú, Biblioteca Peruana I. PEISA, Lima, Perú, capítulo LXVI.
- COBO, B. 1978. Historia del Nuevo Mundo. H.G., Rozas, Cusco, Perú, capítulo VIII.
- GARCILASO DE LA VEGA, I. 1974. Comentarios Reales. Ariel, Universal 18. Cronograma S.A., capítulo XIII.
- HUAMAN MIRANDA G. V. 1991. Rehabilitación y estudio del comportamiento hidráulico de los canales prehispánicos del valle de Cusichaca. Tesis de PreGrado, Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco-
- POLO DE ONDEGARDO, J. 1916. Información a cerca de la religión y gobierno de los Incas. San Martín y Cía., Lima, Perú.
- VALENCIA ZEGARRA, A. I. 1997. Las obras hidráulicas del horizonte medio en la cuenca de Lucre. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Caso II.2.2. La conservación de suelos en zonas andinas : Caso de la micro cuenca de Ccorimarca - Cusco - Perú

Resumen

Uno de los principales factores que afecta la región andina es la degradación de los recursos naturales, lo que se debe a muchos factores, entre los que están las condiciones topográficas accidentadas, el uso inadecuado del suelo, las condiciones bioclimáticas, el efecto de la precipitación pluvial de carácter estacional, el uso de tecnologías inadecuadas de manejo de los recursos naturales y la erosión de los suelos. Esta degradación afecta negativamente la calidad de vida de los pobladores, esta ha sido y es una de las preocupaciones más importantes de las instituciones de desarrollo rural. Desde el año 1983 hasta la fecha, se ha dado inicio a las actividades de manejo y conservación de suelos en la región del Cusco, con los primeros trabajos significativos en el ámbito de la micro cuenca de Piuray Ccorimarca del distrito de Chinchero, provincia de Urubamba, donde se han ejecutado diversas prácticas conservacionistas a nivel de ladera, terreno llano y en cauces; se han desarrollado actividades de la capacitación, con la participación del Proyecto Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas y Conservación de suelos «PRONAMACHCS», las instituciones gubernamentales y no gubernamentales, la universidad, las organizaciones de base y los propios beneficiarios, con el objetivo de preservar el recurso suelo, mantener y mejorar la capacidad productiva, y disminuir el deterioro de los mismos. Después de más de quince años se pueden apreciar y evaluar los resultados que mayormente son positivos y también encontramos algunos resultados negativos que nos sirven de base para poder replicar estas experiencias a nivel de la región andina y otras zonas de condiciones.

Introducción.

La Republica del Perú se ubica en la región occidental de América del Sur, debajo de la línea ecuatorial, con una superficie de 128.52 millones de ha, presenta características geográficas especiales, con un relieve abrupto y accidentado sobre todo en la región andina; se ubica entre los 0° 01' y 18° 21' de latitud sur, correspondiéndole un clima tropical, el cual es alterado por la presencia de la cordillera de los Andes, que atraviesa el territorio nacional del sureste a noroeste, dando origen a la región de la sierra, la cual presenta un clima templado frío.

La cordillera o vértebra andina, forma una muralla, que en su flanco oriental retiene las precipitaciones atmosféricas que se presentan en la región amazónica, condicionando los rasgos de aridez y semi aridez de la región interandina y andina occidental. De otra parte, la presencia de la corriente oceánica de Humboldt o Corriente Peruana de aguas frías y el movimiento de las masas de aire del Pacífico Sur (Anticiclón polar marítimo o del Atlántico), así como la contracorriente ecuatorial oceánica o del Niño, hacen que se atempere el clima de la costa, acentuándose de esta manera las condiciones de aridez extrema de esta región.

Todos estos fenómenos hacen que el territorio peruano presente condiciones y características muy complejas no solo climáticas, geográficas, geológicas, morfológicas y ecológicas, sino que se presenten problemas en el uso y manejo de los recursos naturales suelo, agua y vegetación; se tiene que la región de la sierra o región andina presenta los mayores problemas de degradación de sus frágiles ecosistemas, su fisiografía con fuertes pendientes, su clima con precipitaciones intensas en determinadas épocas del año (carácter estacional), ocasionan graves problemas de erosión, que se complementa con la acción del hombre que interviene en el aprovechamiento de los recursos naturales.

El hombre de la región andina, desde tiempos inmemoriales, ha tenido que hacer frente a esta problemática, desarrollando tecnologías que le permitan administrar el medio físico, problemas como la degradación de los suelos por efecto de la erosión mediante la construcción de sistemas de andenerías de diversos tipos, adaptadas a las condiciones topográficas y climáticas, la disponibilidad de los materiales; del mismo modo ha construido una basta infraestructura de riego, para hacer frente a la estacionalidad de la precipitación y satisfacer las demandas de agua para riego; ha tenido que domesticar una gran variedad de plantas y animales adaptados a estas condiciones que le permita satisfacer sus necesidades de alimentación, vestido y otras necesidades complementarias, logrando ocupar las zonas de montaña, con un sistema de manejo equilibrado y coherente.

Todo este conocimiento de manejo de los recursos naturales, ha devenido en un olvido debido a los procesos de transculturización que ha sufrido la zona en más de quinientos años, iniciándose el mismo en la época de la colonia donde se realizaron cambios en el sistema productivo, dándose prioridad a los sistemas extractivos de los recursos minerales como el oro y otros metales preciosos, pasando a un segundo plano la actividad agrícola; es en la época del Virreinato cuando este cambio es más radical, pues por orden del Virrey Toledo, se producen las llamadas Reducciones, con el fin de hacer que se olvide y desconozcan su cultura y conocimiento.

Durante la época republicana la región de la costa es considerada como prioridad donde se desarrollan los principales proyectos de desarrollo y las

grandes irrigaciones, dejando al margen la región de la sierra, y la selva. En la región de la sierra el desarrollo de la agricultura es muy lento pues tiene limitaciones climáticas, topográficas, con una agricultura prioritariamente en secano, donde los sistemas de riego son muy pequeños; la cédula de cultivos se sustenta en los cultivos andinos como la papa, maíz, olluco, ocas, quínoa, tarwi y algunos cultivos introducidos como la cebada, el trigo, la avena, etc., cuyos escasos márgenes para la comercialización; la zona presenta una excesiva parcelación de tierras, la mayor cantidad de áreas productivas se encuentra en zonas de ladera, con fuertes pendientes, donde la estacionalidad de las lluvias y las tecnologías de cultivo han favorecido un deterioro del medio físico natural, por efecto de la erosión de los suelos a causa de la deforestación, el sobre pastoreo, el uso de herramientas inadecuadas, etc.

Frente a esta problemática, se ha implementado a nivel nacional el Programa Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas y Conservación de Suelos «PRONAMACHCS», institución que conjuntamente con los organismos no gubernamentales y gubernamentales, universidades, comunidades campesinas, desarrollaron un vasto trabajo de manejo y conservación de suelos a nivel nacional en la región de la sierra desde el año 1982 hasta la fecha.

2. Caracterización de la zona de estudio

La zona de estudio presenta las siguientes características

2.1 Ubicación

La microcuenca de Ccorimarca está ubicada en las provincias de Urubamba y Anta, abarcando los distritos de Chinchero, parte de los distritos de Pucyura y Cachimayo, respectivamente, comunidades campesinas de Chuso (hoy valle de Chosica), Pongobamba, Qoricancha, Ayarmaca, Ccorimarca, Tangabamba y sus respectivos anexos; con una extensión de 3291,56 ha, sus coordenadas geográficas son 72°24' longitud oeste, 13°26'22", latitud sur, una altitud media de 3700 m., una mínima de 3500 m y una máxima superior a los 3900 m; ideográficamente pertenece a la cuenca del río Vilcanota, subcuenca del río Cachimayo, microcuenca de Ccorimarca. Tiene los siguientes límites hidrográficos: al norte la microcuenca de Piuray-Tumamayu, al sur la localidad de Cachimayo, al este la microcuenca Maranhuyco y al oeste la microcuenca de Ayarmarca – Sondorhyaco.

2.2 Acceso

El acceso a la zona de estudio es por vía asfaltada Cusco, Cachimayo, Chinchero y Urubamba, así mismo en el interior cuenta con carreteras afirmadas que interconectan las diferentes comunidades y sectores comunales, del mismo modo tiene una basta red de caminos de herradura.

2.3 Clima

De acuerdo con la clasificación climática de Thornthwaite (1931), presenta un clima Semiseco Frío con Invierno Seco CC'i, con una variación altitudinal de 3500 m a 3900 m; un rango de precipitación total anual de 808,73 mm, una temperatura media anual de 9,22 °C; estas condiciones climáticas permiten la práctica de una agricultura en secano y con riego, en base a cultivos de pan llevar como: *Solanum tuberosum* (papa), *Vicia faba* (habas), *Lupinus mutabilis* (tarwi), *Oxalis tuberosa* (oca), *Ollucus tuberosus* (olluco), *Tropaelum tuberosum* (isaño), *Chenopodium quinoa* (quínoa), *Hordeum vulgare* (cebada) y *Avena sativa* (avena), etc.

2.3.1 Parámetros Climatológicos

Los principales parámetros climáticos para la zona son los siguientes:

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total /Promedio
Precipitación.	172.9	145.2	134.5	53.4	9.5	4.3	7.4	9.0	24.9	53.1	89.6	124.5	828.3
T. ^a Mínima	2.4	2.3	1.5	1.2	-2.7	-5	-5.8	-4.6	-0.7	1.5	1.8	2.6	-0.5
T. ^a Media	8.3	8.4	9	9.5	9.1	8.4	7.5	8.6	9.3	8.2	10.1	9.2	8.8
T. ^a Máxima	16.4	16.5	17.9	20.9	23.8	26.4	22.8	23.9	22.6	17.9	20.9	22.6	16.4
H. ^a R. ^a	82.77	73.72	80.73	66.85	78.12	67.18	71.37	66.77	66.8	70.07	71.88	68.79	72.08

TABLA 1. Datos climáticos. Fuente: Registro en base a datos regionalizados. SENAMHY-Estaciones MIMA

La precipitación total anual para la altitud media de la microcuenca se estima en 822,72 mm por año; la precipitación muestra un comportamiento estacional, los meses con mayor precipitación se presentan entre diciembre y marzo y los más secos están comprendidos entre los meses de mayo y agosto. Así mismo, podemos señalar que se pueden presentar precipitaciones esporádicas en los meses de abril a septiembre. La temperatura mínima a nivel de la microcuenca tiene un comportamiento similar con valores por debajo de los 0 °C que se presentan por lo general en los meses de mayo a septiembre. Las temperaturas máximas tienen valores superiores a los 20 °C y se presentan en los meses de abril a diciembre. La temperatura media presenta una media anual de 8,8 °C; la

humedad relativa en promedio es de 72,08%, varía entre 82,77% (enero) y 66,77% (agosto).



FIGURA 1. Estación Meteorológica de Chuso

2.4 Ecología

De acuerdo con el sistema de clasificación de las zonas de vida propuesto por Holdridge, L. (1947), el área de estudio se ubica en la zona de vida bosque húmedo Montano Subtropical bh-MS; abarca desde 3350 m hasta los 3900 m de altitud, presenta un clima semiseco, semifrío a Frío con Invierno Seco, un promedio de precipitación por año de 700 a 850 mm, una biotemperatura media anual de 8,5 a 10 °C, una evapotranspiración potencial entre 0,75 y 0,85, con un relieve generalmente ondulado y empinado, suelos relativamente profundos, arcillosos, de reacción ácida, de colores rojizos a pardos; predominan los materiales litológicos calcáreos. La vegetación natural principalmente está dominada por especies arbustivas y herbáceas, las especies más representativas son: *Baccharis buxifolia* (tayanca), *Berberis sp* (checche), *Colletia spinosissima* (roque), *Barnadesia horrida* (llaulli), *Senna birrostris* (mutuy), etc., en las quebradas se encuentran pequeños bosques de *Escallonia resinosa* (chachacomo), *Polylepis racemosa* (queuña), e individuos dispersos de *Escallonia myrtilloides* (tasta), *Buddleja incana* (quishuar), etc., la agricultura mayormente es de secano, con muy pocas áreas bajo riego, se cultivan sobre todo especies nativas de gran valor alimenticio como *Solanum tuberosum* (papa), *Zea maíz* (maíz duro), *Oxalis tuberosus* (oca), *Ollucus tuberosus* (olluco), *Lupinus mutabilis* (tarwi), etc. Cultivos introducidos: *Vicia faba* (habas), *Triticum aestivum* (trigo); presenta áreas con aptitud para plantaciones forestales con especies nativas como: *Escallonia resinosa* (chachacomo), *Polylepis racemosa* (queuña) y especies exóticas como: *Eucaliptus globulus* (eucalipto) y *Pinus radiata* (pino).



FIGURA 2. Zona de vida bosque húmedo Montano Subtropical

2.5. Principales características de los suelos

La zona de estudio presenta los siguientes tipos de suelos según su origen, de acuerdo con los estudios realizados por el INRENA:

- Suelos de origen aluvial: presentan un perfil estratificado sin desarrollo genético, profundidad variable, presencia de estratos gravosos redondeados y sub-redondeados, formando terrazas, de relieve ligero a moderadamente inclinado; textura franco arenoso, pH neutro a ligeramente ácido, fertilidad natural media a baja; se distribuye en forma localizada, con pendientes del 2 al 4%, zona baja del río Ccorimarca.
- Suelos de origen coluvio aluviales: no presentan desarrollo genético o desarrollo incipiente, generalmente de morfología irregular, suelos muy superficiales a moderadamente profundos, de textura variable, de pH generalmente ácidos, con presencia de materiales gruesos angulares de diverso tamaño dentro del perfil en proporciones variables, se encuentran en laderas de montaña y colinas, conos de deyección, pie de monte, con pendientes moderadamente inclinadas a extremadamente empinadas (4 a +75%) que se distribuyen indistintamente dentro de la microcuenca.
- Suelos de origen residual: desarrollados in situ a partir de materiales residuales de rocas sedimentarias, suelos de capas rojas (areniscas y lutitas) que se distribuyen en las partes altas y medias de las formaciones montañosas estructurales, colinas denudadas y superficies onduladas, sin desarrollo genético o incipiente, en pequeñas áreas de relieve suave; se encuentran ocupando posiciones

topográficas con amplio rango de pendiente; son superficiales a profundos, de textura gruesa a moderadamente fina, de pH fuertemente ácido a ligeramente alcalino, con o sin carbonatos libres en la masa de suelo, con o sin presencia de material grueso (gravas y guijarros). También se observan tierras de origen antrópico (andenes o terrazas).

Suelo	Altitud msnm	Zona de vida	Material parental	Hor.	Prof. (cm)	Text.	Color	M.o.	pH.	Pendiente %	Pedregosidad
Qoricancha	3,770	bh-MS	Coluvio aluvial	Ap	0 - 25	Franco	Pardo rojizo	Bajo	5.1	08 a 25	Gravas y gravillas
				A2	25 - 55	Franco	Pardo rojizo oscuro	Bajo	5.1	08 a 10	gravas, gravillas
				C	55 > 80	Franco					
Tanga bamba	3,890	bh-MS	Residual	A	0 - 30	franca	pardo oscuro	Bajo	5.5	25 al 50	
				CR	> 30						
Ccorimarca	3,700	bh-MS	Residual de Lutitas	Ap	0 - 25	Franco	pardo rojizo	Bajo	7.0	08 al 15,	
				AB	25 - 50	Franco	rojo amarillento	Bajo	6.5		bloque subangulares
				Bw	50 - 80	Franco arcilloso	rojo amarillento	bajo	5.9		bloque subangulares
				BC	80-105	Franco arcilloso	rojo amarillento	Bajo	5.0		bloque subangulares
				C	> 150	Arcilla	rojo amarillento	Bajo	5.1		
Cachimayo	3,450	bh-MS	Aluvial	Ap	0 - 25	Franco	pardo oscuro	Medio	6.4	02 a 08	
				AC	25 - 50	Franco	pardo amarillento	Bajo	6.2		Gravas y gravillas
				C	50 - 75	Franco arcillo arenoso	pardo amarillento	Bajo	7.4		gravas y gravillas
				C2	75 > 130	Franco arcillo arenoso	pardo amarillento	bajo	7.5		
Chuso	3,880	bh-MS	Coluvio aluvial	Ap	0 - 30	Franco	Pardo oscuro	bajo	5.1	04 a 15	gravas y gravillas escasas
				A2	30 - 55	Franco arcillo arenoso	Pardo oscuro	Bajo	6.1		gravas y gravillas guijarros

Suelo	Altitud msnm	Zona de vida	Material parental	Hor.	Prof. (cm)	Text.	Color	M.o.	pH.	Pendi ente %	Pedregosidad
				C	55 – 75	Franco	pardo oscuro	bajo	6.1		

TABLA 2. Características de los suelos de la microcuenca de Ccorimarca. Fuente: Evaluación Integral de los Recursos Naturales de la Microcuenca Piuray – Ccorimarca. INRENA 1998.

2.6. El uso actual de los suelos

Por las características propias de la zona de estudio, se han identificado los siguientes usos del suelo:

- Área de pastos naturales, tierras de rotación o Muyuis, con una extensión de 54,90 ha, localizadas en las partes altas de la microcuenca, cercanas al divortium, su uso es de pastoreo extensivo, de hatos mixtos (ovinos, vacunos y porcinos). En esta zona se han empleado las prácticas mecánicas de conservación de suelos, como zanjas de infiltración, para la cosecha del agua, con algunas áreas de rotación en secano o muyuis, donde se realiza la siembra de cultivos temporales como la papa, olluco, oca y cereales; estas áreas soportan el pastoreo de los animales domésticos, sin pensar en la capacidad de soporte de estas praderas, tan degradadas que en algunos casos muestran afloramientos de la roca madre por procesos de erosión hídrica.

- Áreas de cultivo en secano., con una extensión de 1277,80 ha, incluyen algunas áreas de rotación. Su uso es con cultivos anuales en limpio, en algunos sectores estos son utilizados de manera intensiva, debido a la presión poblacional; el patrón de rotación ha cambiado, de siete o seis, ahora solo se hacen tres a cuatro rotaciones, afectando fuertemente las características edáficas, hecho que influye en el ingreso campesino.

- Áreas de patapatas, con una extensión de 68,59 ha. las patapatas o bargones son áreas de terreno plano en gradería en la zona de ladera; son formaciones naturales y en otros casos son hechos por el hombre aprovechando la configuración natural. Estas áreas son escasas, pequeñas y están protegidas en la parte del talud por matorrales; son sembradas principalmente con cultivos de papa, oca y cereales; las especies arbustivas como la Tayanca, Llaully, Chillca, Mutuy, etc., constituyen la principal fuente energética para los pobladores de la zona.

- Áreas de cultivo con agroforestería con una extensión de 216,08. Estas áreas de cultivo inicialmente tenían pendientes mayores de un 25%, habiendo sido han sido acondicionados por los productores, para su uso agrícola, mediante la construcción de terrazas de formación lenta, con talud de tierra y talud de piedra, complementadas con plantaciones arbustivas dando lugar a sistemas

agroforestales, lo que contribuye a un mejor rendimiento de los cultivos, utilizando para ello plántulas de cetico y retama, y arbustos nativos como el qolle y la queña; una forma de aprovechamiento es la utilidad que se le da al cetico y la retama en la alimentación de los cuyes, los resultados más importantes se consiguen en la comunidad de Qoricancha, Chuso.

- Áreas de cultivo en terrazas de formación lenta.- con una extensión de 206,32 ha. Se han construido de diversas formas con talud de piedra, talud de tierra, talud mixto con piedra y champas, son para el cultivo en secano o temporal, la cedula de cultivos es la siguiente: papa, haba, cereales y tarwi, son áreas de uso intensivo debido a la presión antrópica sobre el recurso.

- Áreas de secano para cereales (pastos cultivados), con una extensión de 53,77 ha, Se encuentra principalmente en el sector de Pongobamba, son suelos que tienen diatomitas o contay, son de pH alcalino, en estas áreas preferentemente se siembran cereales de grano fino, algunas veces se cultiva papa.

- Áreas de cultivo con riego, con una extensión de 185,37 ha, ubicadas principalmente en las partes ligeramente inclinadas y planas, en andenes rústicos y en las zonas moderadamente empinadas; los andenes rústicos son utilizados desde hace mucho tiempo, para cultivos intensivos, como la papa de siembra temprana o mahuay, seguido de un cultivo de corto período vegetativo como la cebada para forraje, obteniendo dos cultivos por campaña agrícola. El sistema de riego es por gravedad y se viene implementando el riego tecnificado.

- Áreas de cultivo en terrazas de banco, con una extensión de 1060,95, estas son de dos tipos, terrazas de banco y terrazas de absorción, con talud de tierra y talud de piedra, su uso es para cultivos en limpio, un 80% es de secano, el 20% con riego por gravedad y tecnificado.

- Bosques, con una extensión de 125,42 ha, la principal especie es el eucalipto, así como existen plantaciones de ciprés y pino en pequeña escala, a nivel de la región andina se tiene una preferencia por las plantaciones de eucalipto, por ser esta una madera dura y de gran utilidad.

- Áreas de afloramientos rocosos, con una extensión de 6,17 ha.

- Cuerpos de agua, con una extensión de 16,17 ha, compuesta por pequeñas lagunillas.



FIGURA 3. Vista panorámica de la microcuenca de Ccorimarca

2.7 Sistema de producción

La principal actividad es la agrícola, pues la totalidad de la población se dedica a la producción de cultivos alto andinos como son la papa, ollucos, ocas, tarwi, y los cultivos introducidos como la cebada, avena, haba, trigo, arveja, maíz y hortalizas, se caracteriza por el empleo de técnicas y herramientas ancestrales (tecnología tradicional y extensiva), se da uso intensivo a la mano de obra familiar, y responde a relaciones ancestrales de trabajo como el ayni y la minka, y muy esporádicamente se recurre al pago de salarios solo cuando la extensión de cultivo es grande o por estricta necesidad. La producción esta destinada principalmente al autoconsumo en un 80% y el 20%, para la comercialización; la producción es considerada de subsistencia, siendo las limitantes del sistema productivo las siguientes:

- La falta de agua para riego: solo un 13% de las áreas de cultivo tiene riego, un 87% son de secano, sujeto a un sistema de rotación o muyuis.
- La estacionalidad de las lluvias que se producen en los meses de setiembre a mayo, concentrándose la misma en los meses de diciembre a marzo.
- Las condiciones bioclimáticas o piso ecológico, como la presencia de las heladas que se producen en los meses de junio a agosto y algunas extemporáneas.
- Los suelos tienen una calidad agrológica media a baja.
- La tecnología de producción es tradicional, considerada de nivel bajo.
- La pendiente y topografía de los terrenos limitan el uso de la maquinaria
- El tamaño de la parcela, es extremo pues se han encontrado áreas de cultivo bajo riego de 100, 200 y 500 m². La parcelación de las tierras agrícolas proviene de la herencia familiar, pues son tierras comunales pero con derecho de sucesión familiar

- Los bajos precios que se dan a los productos, debido a la estacionalidad de las cosechas (abril a mayo) y la perecibilidad de los mismos.

Todos estos factores influyen en los rendimientos de los cultivos que están por debajo del promedio para la región y a nivel nacional; por ejemplo, en el caso de la papa, el rendimiento es de 5,5 a 6,5 Tm/ha, siendo el promedio regional de 10,0 a 12,0 Tm/ha, y el rendimiento de la papa destinada para semillas es 18,0 Tm/ha, haba en verde 9,0 Tm/ha, olluco de 6 a 7 Tm/ha, cebada, avena, quínoa, tarwi, maíz amarillo de 1,2 a 1,5 Tm/ha, todos estos rendimientos son inferiores a la media regional.

2.8 Tecnología de producción

La tecnología agrícola de la zona de estudio se diferencia de acuerdo al grado de tenencia de las tierras y básicamente a los niveles de tecnología empleada en sus cultivos, la cercanía o acceso a las vías de comunicación y al piso ecológico donde se encuentran los productores, además de tener en algunos casos áreas de rotación o muyuis, cuyas áreas ya no descansan lo necesario para la recuperación de la fertilidad natural del suelo. El sistema productivo en el ámbito de estudio presenta las siguientes características.

Referencia	Calificación			
	Alta	Media	Baja	Nula
Uso de semillas mejoradas		X		
Uso de análisis de suelos				X
Fertilización adecuada				X
Rotación de cultivos			X	
Control de plagas y enfermedades			X	
Aplicación de técnicas apropiadas de cultivo		X		
Mecanización y utilización de equipo apropiado			X	
Aplicación de técnicas de embalaje y almacenamiento				X
Aplicaciones adecuadas de riego			X	
Comercialización			X	

TABLA 3. Calificación del uso de tecnológica para las actividades agrícolas. Fuente: Guía para la Planificación de Cuencas, IMA²¹, 1994

La tecnología tradicional es utilizada por los agricultores de zonas más altas, con terrenos parcelados, de relieve accidentado, en secano; emplean herramientas manuales tradicionales como la chaquitacla, la tracción animal para labrar la tierra en áreas moderadamente inclinadas y planas, baja o ausencia de

²¹ IMA.- Instituto de Manejo de Agua y Medio Ambiente – Región Cusco

agroquímicos para el tratamiento fitosanitario, el uso de las semillas mejoradas o híbridas es un tanto generalizada, con déficit en el empleo del paquete tecnológico que requieren dichos cultivos, no se analizan los suelos, los fertilizantes sintéticos son aplicados en función del capital disponible; el uso de abonos orgánicos como el estiércol es generalizado, en la actualidad, la tendencia es volver a la producción orgánica, se hace un manejo agronómico de los cultivos, las técnicas de almacenamiento son tradicionales, se han implementado almacenes comunales siendo su uso limitado, se han construido algunos almacenes familiares de luz difusa para los semilleros, el uso de la tecnología de riego tecnificado es carente de eficiencia a falta de una adecuada capacitación, para los suelos se hace uso de prácticas de manejo y conservación de suelos en sus diferentes modalidades.

2.9 Aspectos Socioeconómicos

2.9.1 Población

Está conformada básicamente por las poblaciones de los distritos de Chinchero y Cachimayo, las mismas que pertenecen a las Provincias de Urubamba y Anta, respectivamente.

Ámbitos	Microcuenca	Hombres	Mujeres	Total	%	Nº familias
Qoricancha	Tumamayo	125	137	262	6.78	75
Huaypo	Ccorimarca	89	100	189	4.89	45
Andenes	Ccorimarca	89	100	189	4.89	45
Cachimayo	Ccorimarca	960	924	1884	48.73	376
Tangabamba	Ccorimarca	94	108	202	5.23	47
Chuso	Ccorimarca	252	234	486	12.57	90
Ayarmaca	Ccorimarca	110	119	229	5.92	60
Ccorimarca	Ccorimarca	228	197	425	10.99	85
Total		1,947	1,919	3,866	100	823

TABLA 4. Población por sexo y número de familias. Fuente: Diagnósticos MIMA Ccorimarca 1999. Datos de campo, 2001

2.9.2 Población urbana y rural

La población en el distrito de Chinchero es mayoritariamente rural, en el ámbito del distrito de Cachimayo, la población es mayoritariamente urbana, esto se debe a que se encuentra sobre la vía asfaltada y a su cercanía a la ciudad del Cusco, en la actualidad, se encuentra en proceso de urbanización.

Distritos	1972		1981		1993	
	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural
Chinchero	1219	5961	1075	6770	1991	7155
Cachimayo	1132	197	966	658	1036	658

TABLA 4. Población urbana y rural en la zona de estudio (Habitantes) Fuente : Censo Nacional de Población y Vivienda 1972, 1981 y 1993

2.9.3. Población por sexo y edades

La estructura de la población por edad y sexo muestra que un 52% pertenece al grupo etario entre los 0 y 19 años, lo que significa una fuerte carga económica para la población adulta; la población en edad fértil alcanza el 22% de la población total de la microcuenca.

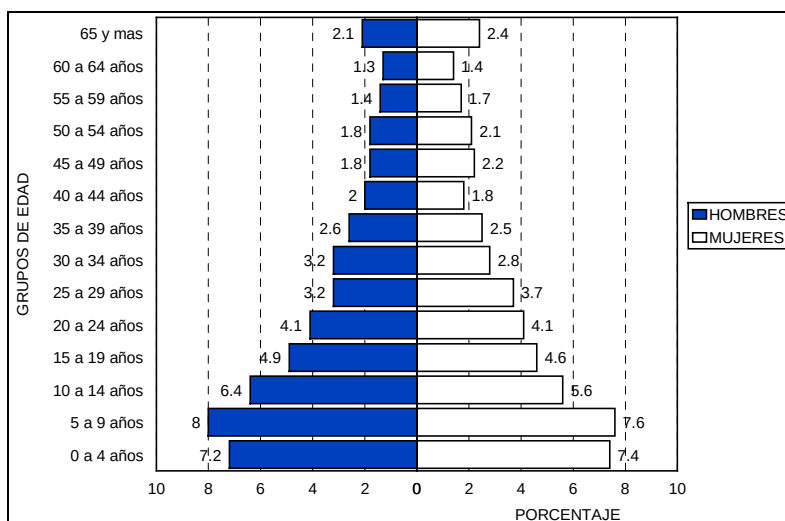


FIGURA 4. Distribución poblacional por edades. Fuente: Censo Nacional de Población y Vivienda, 1993

La población en más del 90% del total se dedica a la producción agrícola; su cédula de cultivo se basa en los cultivos andinos o tradicionales como son la papa de siembra temprana o mahuay, en las zonas de riego, y la siembra grande o temporal en áreas de secano, cebada/avena, haba, trigo, arveja, maíz y hortalizas en áreas con riego. Las áreas de riego representan el 13,2% de la superficie destinada a estos cultivos, las de secano representan el 75,3%.

2.9.4. Tenencia de la tierra

Hasta antes del año 1972, en el ámbito de estudio existían tres sistemas bien definidos: el de conducción directa o haciendas, usufructuando las tierras de mejor calidad; la forma de conducción indirecta, que usufructuaban la tierra los feudatarios y el sistema comunal. Este año se inicia el proceso de reforma agraria promovida por el Gobierno del General Juan Velasco Alvarado. El proceso duró tres años y hubo cambios hasta los años ochenta, dando lugar a la formación de

otras comunidades campesinas, asociaciones de agricultores, unidades agrícolas de producción, etc.

En la actualidad, las tierras son mayormente comunales asignadas a los campesinos, los niveles de parcelación van desde el 1/2 topo hasta las 3 has y los que tienen propiedad privada manejan hasta 20 has, esto de acuerdo con la disponibilidad de tierras a nivel del departamento del Cusco.

En el ámbito de estudio la tenencia de tierras es comunal, con derecho de sucesión, es decir, tiene un carácter privado, el cual puede ser cambiado por acuerdo de los miembros de la comunidad, de acuerdo al Censo Agropecuario y las disposiciones legales, la tenencia de las parcelas está dada mediante los sistemas de propiedad privada, arrendamiento y formas comunales que existen en la microcuenca. El número de unidades agropecuarias que acceden mayormente a la forma de tenencia comunal en el caso de parcelaciones es de 0,5 a 4,9 ha. En la actualidad estas parcelas se han subdividido en áreas menores de 0,5 ha, debido a los derechos de sucesión o herencia, lo cual constituye un serio problema.

2.9.5 Capacidad de innovación tecnológica

Los pobladores del ámbito de estudio frente a los diferentes problemas que se les pudiera presentar tienen iniciativas innovadoras para poder solucionar los mismos es así que, por iniciativa propia, han desarrollado programas alternativos como producción de bioabonos, líneas de comercialización, adaptación de técnicas de riego convencionales a sistemas no convencionales, partiendo del paradigma que tienen estos pobladores que dicen: ¿Qué hay de aquello que no podemos hacer?, lo que resume su iniciativa y capacidad innovadora, lo cual ha sido la clave para obtener los actuales resultados. Esto presenta una sola limitante: el financiamiento para estas iniciativas, puesto que en la actualidad no se cuenta con un sistema de crédito por parte del Estado o no existe una banca de fomento agrario. Una muestra de estas iniciativas es haber modificado la propuesta tecnológica de construcción de las terrazas, pues, de acuerdo con el diseño, estas se aplican mediante la técnica del corte y relleno; después de haber ensayado varias alternativas se ha llegado a la conclusión de que estas practicas deben tener un bordo de seguridad de 20 cm por debajo del talud de la terraza y antes del corte de la siguiente. Este bordo de seguridad nos permite la instalación de plantas arbustivas y semiarbustivas que contribuyen a la estabilidad del talud.

3 Zona piloto de evaluación

Por las características del caso de estudio y con el propósito de conocer, comprender y evaluar los resultados obtenidos, dentro del programa de manejo y conservación de suelos implementado en el ámbito del distrito de Chinchero, se ha tomado como muestra a la microcuenca de Ccorimarca por ser este el lugar donde se iniciaron los trabajos en el año 1985 y que en la actualidad se desarrolla en forma autónoma.

El trabajo siguió tres etapas principales: preparación y organización del estudio de caso; trabajo de campo; y sistematización y redacción del documento final. La recopilación de información se desarrolló en base a entrevistas, recorridos de campo, revisión de información secundaria y diálogo informal con los hombres y las mujeres (jóvenes y adultos) de las comunidades.

4 Logros alcanzados

Después de más de quince años de haber dado inicio a las actividades de manejo y conservación de suelos en el ámbito, recién se pueden apreciar los efectos positivos y negativos como resultado de la aplicación de un conjunto de prácticas conservacionistas, destacando los siguientes cambios:

- La cobertura vegetal de las áreas degradadas se ha recuperado favoreciendo el desarrollo de la actividad pecuaria.
- Se han recuperado y estabilizado los principales manantiales, por efecto de la construcción de las zanjias de infiltración, construidas en la parte alta de los acuíferos, favoreciendo su uso con fines de riego y consumo humano.
- Se ha reducido la erosión de los suelos, en las zonas de ladera, y se han controlado las cárcavas por donde antes discurrían volúmenes de agua de escorrentía hasta de 2 m³, que ponían en riesgo la seguridad de la población y sus tierras.
- Se ha incrementado la fauna (aves, mamíferos silvestres) debido al aumento de las áreas forestadas y el repoblamiento de la pradera.
- Ha mejorado el clima, muestra de ello es que la comunidad campesina de Chuso ha cambiado de nombre a la de Valle de Chosica, pues se ha reducido la incidencia de heladas y el clima es más benigno debido al incremento de la cobertura vegetal.
- Se han advertido mejoras sustanciales y reducido la incidencia de las enfermedades como las infecciones respiratorias agudas, enfermedades diarreicas agudas, las parasitosis pues se han mejorado los niveles de nutrición al haberse diversificado los cultivos.

- Se han reducido los niveles de analfabetismo más de un 35%, debido a los programas de capacitación.
- Se ha fortalecido la organización comunal y la intercomunal habiendo constituido en la actualidad el Comité de Gestión de la Micro cuenca Piuray Ccorimarca, que articula los programas de desarrollo y la participación de las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales. Reconocido en el año 2001, integrado por 21 organizaciones de la Microcuenca, el mismo cuenta con un plan estratégico para cada cinco años constituyéndose en modelo de gestión para el desarrollo sostenible con enfoque agroecológico y ecoturístico.
- En la actualidad, se han construido nuevos sistemas de riego tecnificado y mejorado el riego tradicional, almacén de productos, establos y corrales mejorados, reservorios nocturnos, viveros y fitotoldos.
- Se ha promocionado el uso de estiércol mejorado y la producción de la lombricultura, el compost y el biol, como parte del programa de agricultura orgánica.
- Se ha instalado una red de estaciones meteorológicas (tres), con la finalidad de monitorear los parámetros ambientales y poder definir el sistema productivo.
- Se ha dinamizado la economía de la zona, habiéndose incrementado las actividades productivas como la artesanal, pecuaria.
- Se han mejorado los servicios básicos como el abastecimiento de agua potable, abastecimiento de energía eléctrica, etc.

Entre los aspectos negativos podemos destacar los siguientes:

- Al incremento de los niveles de producción de los diferentes cultivos se tiene una baja en los precios de los productos pues estos tienen una estacionalidad en la cosecha y también son perecederos.
- Hay tendencia a la generación de grupos de poder y superposición de funciones, desplazando a las autoridades comunales.
- Hay un cambio en los hábitos de consumo, priorizándose los productos como los fideos, el arroz; así como en los hábitos de convivencia, existe una tendencia al cambio ciudadano.

5. Conclusiones.

- El empleo de las prácticas de manejo y conservación de suelos ha tenido impactos positivos en la restauración del medio físico y el control de los procesos de degradación.

- El manejo de los recursos naturales desde una perspectiva integral viene a constituir una estrategia fundamental para el desarrollo de la zona andina.
- El fortalecimiento de la organización comunal e intercomunal, es la base fundamental para la implementación de los programas de desarrollo con la conservación y manejo de los recursos naturales.
- El trabajo participativo entre las instituciones de desarrollo y los beneficiarios contribuye a la formulación e implementación de los programas de desarrollo rural.
- Un sistema y/o programa de capacitación, acorde con las condiciones y el nivel educativo de los beneficiarios, en su propio lenguaje y con técnicos y profesionales identificados con los objetivos del proyecto, tiene un impacto positivo.
- Las experiencias aprendidas en el trabajo de manejo y conservación de los recursos naturales suelo, agua y vegetación, son replicables a nivel de toda la región andina.

6 Bibliografía

- FELIPE MORALES C. 1981. Diagnóstico de la erosión y conservación de suelos en el Perú, Revista de Agronomía vol. XXXV n.º 1 y 2, pags. 33 – 39. La Molina.
- IMA-SNV. 1995. Sistematización de la visión institucional del IMA sobre género y riego en las tecnologías productivas apropiadas. Documento de sistematización, Cusco.
- IMA. 2001). Diagnostico integral y lineamientos de gestión ambiental de la microcuenca Piuray –Ccorimarca – Cusco; documento de trabajo, Cusco
- INEI. 1993. Censo de población y vivienda. Lima, Perú.
- INRENA. 1995. Mapa ecológico del Perú. Lima, Perú.
- , 1998. Evaluación integral de los recursos naturales de la microcuenca Piuray – Ccorimarca. Cusco
- , 1999. Mapa de erosión de suelos del Perú (departamento del Cusco).
- ONERN. 1987. Inventario y evaluación de los recursos naturales de la zona altoandina del Perú. Nivel de Reconocimiento del departamento del Cusco.
- , 1981. Clasificación de tierras del Perú. Lima, Perú.
- PRONAMACHCS. 2000. 18 Años en la lucha contra la desertificación y la pobreza rural. Ministerio de Agricultura, Lima, Perú. Compendio Estadístico, 2.
- VÁSQUEZ VILLANUEVA, A. 1977. Manejo de cuencas altoandinas. Edias S.A., Lima, Perú.

Principales características de los suelos	Las parcelas situadas en ladera están en su mayoría aterrizadas. Como formadores del suelo se describen procesos de humificación, gleyzación, lavado de carbonatos e iluviación de arcillas.

3. USOS DEL SUELO	
Principales usos del suelo (%)	Fuente: Ferrer et ál. (en prensa). Municipio de Broto (12795 ha) Monte Forestal: 77,2% Pastos de Puerto: 14,8% Improductivo: 3,1% Prados: 2,1% Otros usos: 2,8%
Rendimientos y causas de variabilidad	2000-7000 kg anuales de MS de hierba por ha, varía según la localización geográfica de la parcela y el manejo agrario.
Aspectos de manejo: tecnologías habituales y maquinaria	Fertilización: Abonado orgánico (estiércol o purín de vacuno), e inorgánico. Aprovechamiento: Corte y/o pastoreo. Conservación de la hierba: Henificado y ensilado.
Censos ganaderos	Fuente: Ferrer et ál. (en prensa). Municipio de Broto (12795 ha). Ovejas: 2196 Cabras: 201 Vacas: 1701 UGM totales: 2061
4. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS	
Población agraria (porcentaje sobre el total, edad, tenencia de la tierra,...)	Fuente: Instituto Aragonés de Estadística (2006). El municipio de Broto en el año 2005 tenía 528 habitantes y una densidad de población de 4,1 hab/km ² . De las 126 actividades económicas principales registradas en el municipio en el año 2002, tan solo 4 eran agrícolas (3,2%), el resto de los sectores de actividad fueron: servicios: 83,3%; construcción: 10,3% e industria: 3,2%. Sin embargo, el número de explotaciones que recoge el censo agrario de 1999 es de 55 y presentan las siguientes características: - 54 tienen titularidad física y 1 jurídica - solamente 5 tienen superficies de tierra superiores a las 50 ha - 28 tienen superficies totalmente de su propiedad - 7 son titulares de menos de 35 años, 35 tienen entre 35 y 54 años, y 12 más de 54 años - 83 personas son mano de obra familiar sin remuneración (54 titulares, 18 cónyuges y 11 otros familiares) y únicamente 1 asalariado
Capacidad de innovaciones tecnológicas	Limitada; de las 55 explotaciones descritas, 35 tienen experiencia práctica exclusiva del titular y 20 con formación profesional del mismo.

Resumen

Este estudio de caso trata del cultivo de los prados en un valle del Pirineo aragonés. Estas comunidades pratenses tienen un elevado interés ecológico y gozan de distintas figuras de protección, sin embargo, tanto el abandono como su intensificación desmesurada amenazan su conservación. En este trabajo se presenta la relación existente entre los regímenes de manejo de los agricultores, la producción de hierba obtenida, su calidad y su diversidad florística.

Para ello se describe el medio ecológico, el origen de estas comunidades vegetales, los condicionantes de la agricultura de montaña y los regímenes de gestión de los agricultores, haciendo especial incidencia en los manejos del suelo. Posteriormente, se exponen los resultados obtenidos tras el muestreo de la vegetación de cuatro prados, representativos de los principales regímenes de gestión del valle. A partir de los muestreos de la vegetación, se estimaron los parámetros de producción, calidad forrajera y diversidad.

La intensificación de la gestión ganadera, consigue mejores producciones y calidades forrajeras, a costa de reducciones significativas en la diversidad de los prados. De los cuatro prados muestreados, se ha identificado un modo de gestión que tiene una diversidad alta, que no alcanza mucha producción, pero que mantiene una calidad aceptable y que estaría en consonancia con las recomendaciones de las políticas agrarias nacionales y europeas.

1. Introducción

Un prado es una comunidad vegetal espontánea, densa y húmeda, siempre verde, producida por el hombre y aprovechada por siega y/o pastoreo (Ferrer et ál., 2001). En el Pirineo aragonés se ubican por debajo del límite forestal, en los fondos de valle y laderas próximas a los pueblos, principalmente en los pisos montano y parte inferior del subalpino de la región corológica eurosiberiana. A diferencia de los pastos de puerto, los prados requieren un propietario encargado de su producción, de las labores culturales (fertilización, riego, corte) y de su mantenimiento. Así que se pueden considerar como cultivos naturales de hierba (Montserrat, 1985), que será la base de la alimentación durante el invierno del ganado estante. Se trata, por lo tanto, de un cultivo estratégico en la montaña pirenaica: la hierba producida en los prados, una vez henificada o ensilada, permite la estabulación invernal y con ello el mantenimiento de las ganaderías semiextensivas basadas en el aprovechamiento estival de los pastos supraforestales.

Ferrer et ál., (en prensa), analizando la información procedente del 1-T Municipal del año 2000, estiman en 9609 ha la superficie dedicada a prados en las comarcas del norte de la provincia de Huesca: Jacetania, Alto Gállego, Sobrarbe y Ribagorza. Esta cifra que en otros sistemas agrarios carecería de importancia, representa casi el 92% de la superficie agrícola municipal de los altos valles del Pirineo aragonés.

Además, el aprovechamiento de estas comunidades herbáceas en zonas de montaña presenta un elevado interés ecológico (Chocarro y Reiné, en prensa): protege a los suelos contra la erosión, mantiene situaciones topográficas inestables como son las laderas, mejora la estructura y fertilidad del suelo, ayuda al control y a la conservación de los recursos hídricos y mantienen una diversidad florística y faunística, superior en ocasiones a la que existiría si se abandonan estas zonas. En definitiva, que el agricultor con su gestión, crea un paisaje reticulado formado por teselas de comunidades con distintos grados de madurez, que dan lugar a una diversidad espacial que parece la más adecuada para la conservación (Harvey y Saunders, 1993).

El cultivo de los prados se generaliza en el Pirineo en los últimos 50 años (Fillat, 2000), en parte como una alternativa a los movimientos trashumantes del ganado. Los antiguos campos de cereal de autoabastecimiento se fueron transformando en prados en un proceso fomentado por la administración (Pujol, 1974). Los rastros del cereal se sembraron con algún cultivo forrajero inicial, y los huecos se fueron colonizando con las herbáceas de la orla del bosque próximo y las transportadas por los animales, hasta que se consiguió el encespedado actual de las parcelas. En los bancos de semillas de los horizontes más profundos del suelo (hasta 20 cm), todavía se encuentran semillas viables de especies adventicias de los cultivos de cereal (Reiné, 2002).

Este pasado cultural explica que nuestros prados estén ubicados sobre campos aterrizados, principalmente los situados sobre laderas solanas de pendientes pronunciadas. Con estos bancales se conseguía la profundidad necesaria para el correcto laboreo. Esta es sin duda una característica diferencial con las típicas zonas productoras de hierba de la España húmeda y condiciona algunos aspectos del manejo de los suelos de estos valles pirenaicos.

2. Caracterización de la zona

El valle de Broto se sitúa al norte de la provincia de Huesca, en las Sierras Interiores del Pirineo. La geología típica de areniscas cretácicas y calizas eocenas está cortada por este valle transversal de modelado glaciar por el que fluye el río Ara. Al pie de las sierras comienza la serie de turbiditas o *Flysh* (alternancia de capas de margas y areniscas) de relieve más suave. En estos sustratos, el glaciar

del Ara depositó una serie de materiales más o menos coluviados, sobre los que se asientan la mayoría de los prados de siega.

Martí y Badía (1999) en un detallado estudio de los suelos de la zona, describen texturas más pesadas en los suelos desarrollados sobre las calcilutitas del *Flysh* que en los desarrollados sobre los depósitos morrénicos, y unos contenidos de materia orgánica que en los 2/3 de sus muestras se sitúan entre el 2,1% y el 5%

La climatología del área se resume en la ficha adjunta. Se ha elegido la estación de Torla por tener una serie histórica de datos más amplia (50 años). La temperatura media anual es de 11,0 °C, la precipitación total anual presenta una media de 1308 mm y la evapotranspiración potencial anual media estimada mediante el método de Thornwaite es de 667,6 mm.

La vegetación de los prados de siega de la zona pertenece a la alianza fitosociológica *Arrhenaterion elatioris* Koch, 1926. Son comunidades herbáceas dominadas por gramíneas elevadas de tipo hemicriptófito, y otras especies adaptadas a la frecuencia de siegas y pastoreos. Para Fillat (2003), la riqueza de especies vegetales presentes en este tipo de prados es un compendio de las condiciones ecológicas difíciles (el Pirineo es el límite sur de la región corológica eurosiberiana) y de las técnicas de producción semiextensivas.

Las condiciones de montaña no permiten una gestión homogénea en todas las parcelas. La accesibilidad de las mismas y su distancia al pueblo condicionan su manejo, de tal forma que en las praderías se puede diferenciar unos prados de fondo de valle, gestionados de un modo más intensivo, cercanos a los pueblos, e instalados sobre suelos bien desarrollados; y unos de ladera, aterrizados por encima de los anteriores, de mecanización más difícil y gestión más extensiva (Chocarro y Reiné, en prensa).

En la figura 1 se puede observar la distribución porcentual de estos tipos de prados en el valle de Broto y las producciones anuales de materia seca digestible, estimadas por Chocarro (1992). Pese a su menor superficie, es destacable la mayor productividad de los prados situados en los fondos de valle.

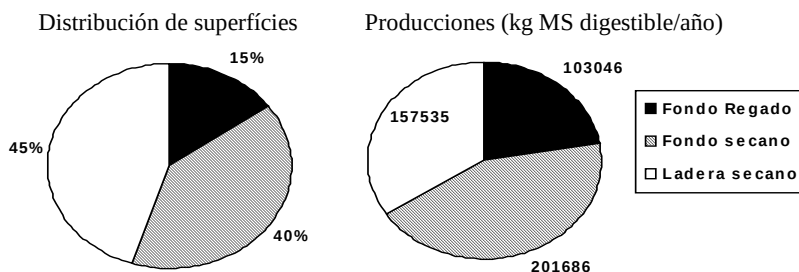


FIGURA 1: Principales tipos de prados de siega en el valle de Broto, distribución porcentual y producciones de materia seca digestible anual de cada clase. Fuente: Chocarro (1992)

Manejos del suelo

Mantenimiento de las terrazas: Dos son las principales formas de erosión que afectan a los suelos del valle. Por un lado, los barrancos producidos por la acción remontante fluvial, en zonas al pie de las laderas, donde los depósitos coluviales son importantes y se han roto los muros morrénicos (García Ruiz y Puigdefábregas, 1982) y, por otro lado, el desplome de los muros de piedra de los bancales. Los muros de las terrazas contribuyen a frenar la erosión, favoreciendo la infiltración frente a la escorrentía. Sin embargo, llega un momento que existe tal presión por la infiltración, que se produce un movimiento en masa que afecta tanto al muro como al material de relleno y que provoca la rotura del primero y posterior vaciado del bancal. Una vez producida la caída, se instala rápidamente una erosión remontante y existen mayores posibilidades de caída de los muros inferiores, ya que el desplome facilita la concentración de agua y el embebimiento (García Ruiz y Puigdefábregas, 1982).

El agricultor mantiene y repara continuamente estos muros mientras cultiva las parcelas. Con el abandono de la actividad agraria aumentan los fenómenos erosivos descritos. Otro factor de riesgo para la conservación de los bancales es su pastoreo extensivo con ganado mayor. Se deben regular muy bien las cargas ganaderas sobre estas «fajas» para que los animales no inicien sendas que acaben poniendo en peligro la integridad del conjunto (Fillat, 2003).

Fertilización: Habitualmente se realiza mediante abonado orgánico. A la salida del invierno en los prados se reparte estiércol o purín de ganado vacuno, procedente de las explotaciones más modernas. El primero es una mezcla sólida de deyecciones y las «camas» recogidas de los establos, que tras un reposo, se aplica en dosis que fluctúan entre las 20-25 t anuales de materia fresca por ha (Bernués, 1996). La liberación de sus nutrientes es lenta y tiene gran interés como enmienda. El purín es una mezcla semilíquida compuesta por las deposiciones sólidas, las líquidas y el agua y se vierte a unas dosis entre las 30-35 t anuales.

En la tabla 1 se resumen los contenidos medios en nutrientes de estos dos abonos orgánicos que se aplican en los prados del valle (Bernués, 1996). En ella queda reflejado el mayor contenido de nitrógeno amoniacal y potasio de los purines.

La fertilización mineral de los prados es complementaria a la orgánica, se da exclusivamente en los más intervenidos aplicando superfosfato o algún complejo como el 0-14-7, el 7-14-20 o similares.

Composición (%)	MS	N total	N-NH ₄ ⁺	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
Estiércol	16,14	2,30	0,59	1,63	2,62	4,00	0,83
Purín	8,08	4,10	2,09	1,05	6,95	6,16	0,90

TABLA 1: Contenidos medios de nutrientes en los estiércoles y purines vertidos en los prados del valle y analizados por Bernués (1996)

Riego: Es indispensable para realizar un segundo dallado productivo en estos prados y se da más frecuentemente en los fondos de valle. En las laderas, además de las dificultades de mantenimiento de los sistemas de conducción, cuando se realiza a manta o por inundación los riesgos erosivos en las terrazas y la pérdida de los elementos finos del suelo son evidentes. Las dotaciones que se aplican en la zona fluctúan entre los 800-1200 m³/ha y año.

Hasta el año 2005, a los agricultores que se acogían a la medida agroambiental M-9.1.4, destinada a la «mejora de praderas en zona de montaña para la protección del paisaje y la biodiversidad» (Gobierno de Aragón, 2006), se les impedía realizar un segundo corte de hierba, por lo que la práctica de riego ha quedado muy relegada. Es de esperar que las nuevas agroambientales del periodo 2007-2013 corrijan esta cuestión.

Siega y pastoreo: La siega comienza en junio y se lleva a cabo de forma mecanizada y escalonada en el gradiente altitudinal, comenzando por los regadíos del fondos de valle, que recibirán el mencionado segundo corte a finales de agosto. En las laderas más inaccesibles se ha dejado de segar. El método tradicional de conservación de la hierba ha sido el henificado, pero hoy en día muchos ganaderos ensilan en rotopacas, tecnología que se ha adaptado muy bien a las exigentes condiciones de montaña.

A pesar de que el aprovechamiento principal es la siega, los prados también son pastados en dos épocas: primavera y otoño. Entre estas dos fechas, el ganado sube a los pastos de puerto, en los que permanece mientras crece la hierba del prado para su siega. Las parcelas más inaccesibles son explotadas únicamente a diente.

El control del pastoreo es muy importante para evitar los problemas erosivos. Ya se ha indicado las complicaciones que puede ocasionar en las terrazas de las laderas pronunciadas las cargas excesivas de ganado mayor. A ello tendríamos que unir los inconvenientes de anaerobiosis y plastificación del suelo que puede originar el sobrepastoreo de los regadíos.

Del modo en que el agricultor desarrolla las prácticas culturales descritas, dependerá no solo la cantidad de hierba producida, sino también su calidad, es

decir, la presencia de unas u otras especies en las parcelas, y en definitiva su biodiversidad (García, 1992). El objetivo de este estudio de caso que se presenta es evaluar los efectos de los modos de gestión mayoritarios de los prados de un valle del Pirineo, sobre la producción de la hierba, su calidad y la biodiversidad.

3. Metodologías

Se eligieron cuatro prados representativos de los modos de gestión más extendidos en el valle de Broto. En la tabla 2 se resumen sus principales características geomorfológicas y de gestión.

TIPO DE PRADO	GEOMORFOLOGÍA	GESTIÓN
Regadío-purín	Ladera aterrazada sobre depósitos morrénicos laterales. Superficie: 1,8 ha Altitud: 975 m	riego 2 cortes 2 pastoreos (30 vacas durante 4 días) purín cada año (35 t/ha) 7-14-20 cada dos años (150 kg/ha)
Secano-purín	Fondo de valle sobre depósito morrénico lateral Superficie: 1,4 ha Altitud: 1130 m	1 corte 2 pastoreos (30 vacas durante 2-3 días) purín cada año (35 t/ha) 7-14-20 cada dos años (150 kg/ha)
Secano-estiércol	Terraza de origen aluvio-coluvial Superficie: 0,9 ha Altitud: 1030 m	1 corte 2 pastoreos (15 vacas durante 4-5 días) estiércol (21 t/ha) 7-14-20 cada tres años (150 kg/ha)
Solo pastado	Ladera aterrazada sobre depósito morrénico lateral en contacto con el <i>Flysh</i> Superficie: 0,1 ha Altitud: 1200 m	2 pastoreos (5 vacas durante 1 día) ningún corte

TABLA 2. Características geomorfológicas y regímenes de gestión de los cuatro prados analizados.
Fuente: Reiné et ál. (2004)

La vegetación de estos prados se muestreó entre los meses de junio y julio de 1994, coincidiendo con el máximo desarrollo de la comunidad. Fueron recolectadas en cada uno de ellos, sistemáticamente, a intervalos de 1 m, 100 muestras uniformemente distribuidas en una matriz de 10 m x 10 m. Para ello se siguió el método *DeVries*, método destructivo consistente en la realización de cortes de pequeño tamaño, de unos 25 cm². (DeVries y DeBoer, 1959). Posteriormente en laboratorio, se separaron las especies identificadas en cada

muestra, y secando en una estufa durante 48 h a 60 °C se estimaron las biomásas aportadas por cada especie a la muestra.

Las especies se agruparon en las principales familias agronómicas como se suele hacer en este tipo de comunidades: gramíneas, leguminosas y “otras” (Remón, 1985). En la nutrición animal las primeras son interesantes por sus contenido en fibra, y las segundas por la proteína.

Las producciones de hierba fueron estimadas por Bernués (1993) justo antes de la realización del primer corte por parte del ganadero. En una zona homogénea de cada prado, se trazaba una línea de 20 m, y a intervalos de 5 m se cortaba una muestra de vegetación de 0,5 m x 0,5 m. De esta manera se obtuvieron cuatro repeticiones por prado. El corte se realizaba con tijera dejando un rastrojo de unos 5 cm, similar al que deja la máquina. En la parcela de pastoreo se cortó a ras de suelo, simulando el aprovechamiento a diente del ganado vacuno. La materia seca se estimó tal y como se describe en el párrafo anterior.

La calidad forrajera de las muestras recolectadas se estimó mediante el método del Valor Pastoral (VP) siguiendo la fórmula (Daget y Poissonet, 1972):

$$VP = 0,2 \sum (Cs * Is)$$

donde:

Cs = % de materia seca de cada especie en la muestra.

Is = Índice específico de calidad (varía del 1 al 5).

Con la abundancia relativa de cada una de las especies se calcularon los índices de diversidad de Shannon-Weaver, índice que tiene por expresión (Magurran, 1989):

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i * \log_2 p_i$$

siendo:

H' = Índice de Diversidad (bits/muestra).

p_i = Proporción de la especie i en la muestra ($\sum p_i = 1$)

s = Número de especies.

A partir de este índice y utilizando la técnica de *Jackknife* (Zahl, 1977), se estimó la diversidad de cada uno de los prados. Esta técnica permite una reducción del sesgo del estimador y provee una estimación de la varianza, hecho que posibilitó la realización de un ANOVA paramétrico.

El resto de los tratamientos estadísticos de los resultados que se aportan, han consistido en la realización de la prueba H de Kruskal-Wallis (ANOVA no paramétrico por rangos) para comparar manejos. Si el test era significativo, los

distintos tipos de prados se agruparon con el Test de Comparación Múltiple (no paramétrico), de Tukey (Zar, 1984).

4. Resultados

En la gráfica de la figura 2 se resumen los resultados de producción de materia seca en el momento del primer corte de la hierba. Las diferencias obtenidas indican la variación de este parámetro con la gestión de los prados. Como cabría esperar, los prados con regímenes de gestión más intensiva son los que más producen. Si además incluimos el riego de las parcelas, la producción anual de materia seca del primero de los prados casi alcanzaría los 8000 kg MS/ha, cifra que probablemente sería el techo productivo en la zona. La comparación entre producción y gestión de los dos secanos, nos llevaría a pensar en mejores resultados productivos del purín de vacuno que del estiércol.

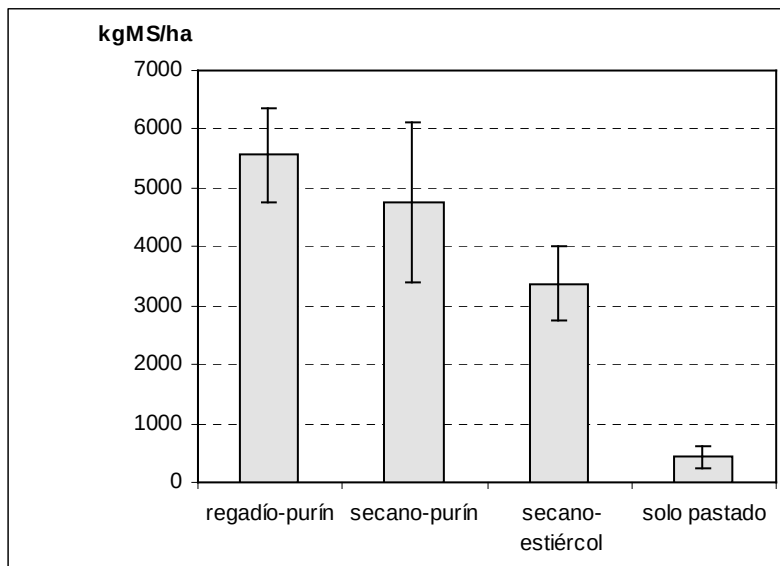


FIGURA 2. Medias y desviaciones estándar de la producción de materia seca en el momento del primer corte de los prados. El prado regadío-purín todavía recibirá un segundo corte que producirá algo más de 2000 kgMS/ha. La producción del solo pastado se estimó en el momento de máximo desarrollo de la vegetación. Fuente: Bernué (2003)

De las estimaciones de la diversidad de la vegetación de la tabla 3, podríamos comentar justo lo contrario que para la producción: la diversidad aumenta significativamente cuando el régimen de gestión de la comunidad se hace más extensivo. De hecho la riqueza específica total del prado más intensivo (*regadío-*

purín) se estimó en 30 especies, mientras que el más extensivo de la serie, el *solo pastado* casi la dobló con 61 especies pratenses.

TIPO DE PRADO	DIVERSIDAD ESPECÍFICA Índice de Shannon-Weaver (bits/muestra)	CALIDAD FORRAJERA Valor Pastoral (%)
Regadío-purín	3,49 ± 0,06 a	62,57 ± 12,92 b
Secano- purín	3,66 ± 0,07 b	68,64 ± 10,27 c
Secano-estiércol	4,03 ± 0,07 c	58,60 ± 12,13 b
Solo pastado	4,16 ± 0,14 d	32,18 ± 15,84 a

TABLA 3. Valores medios y desviaciones estándar de los índices de diversidad y del valor pastoral de los cuatro prados estudiados. Los análisis de varianza realizados (paramétrico para la diversidad y no paramétrico para la calidad) en ambos casos fueron altamente significativos ($n=400$, $p<0,0001$). Letras diferentes indican diferencias significativas entre las medias para $p<0,05$ (Test de separación de medias de Tuckey, paramétrico para la diversidad y no paramétrico para la calidad)

Continuando con los resultados de la tabla 3 vemos que la calidad forrajera vuelve a comportarse de nuevo prácticamente como la producción, aunque esta vez alcance más valor incluso en el *secano-purín* que en el *regadío-purín*. De todas formas la tendencia es a aumentar en los regímenes intensivos.

Parece lógico pensar que de acuerdo con estos resultados la intensificación de la gestión favorece las especies más productivas y de mayor calidad forrajera, a costa de una pérdida de diversidad de la vegetación de los prados.

La gráfica de la figura 3 nos puede ayudar a interpretar los efectos de la gestión en las distintas familias botánicas. Las gramíneas alcanzaron sus mayores porcentajes de biomasa en los prados abonados con purín. Si recordamos la composición comparada del estiércol y del purín de la tabla 1, este dominio puede ser debido a los contenidos de nitrógeno amoniacal del purín. Las leguminosas sin embargo aumentan en proporción cuando se reduce la fertilización nitrogenada del suelo. Gracias a ello ya pueden competir algo mejor por su capacidad de fijarlo a través del *Rhizobium*. Los porcentajes del grupo *otras* se incrementan con la extensificación de las parcelas, hasta ser mayores incluso que los de las gramíneas en el prado no fertilizado.

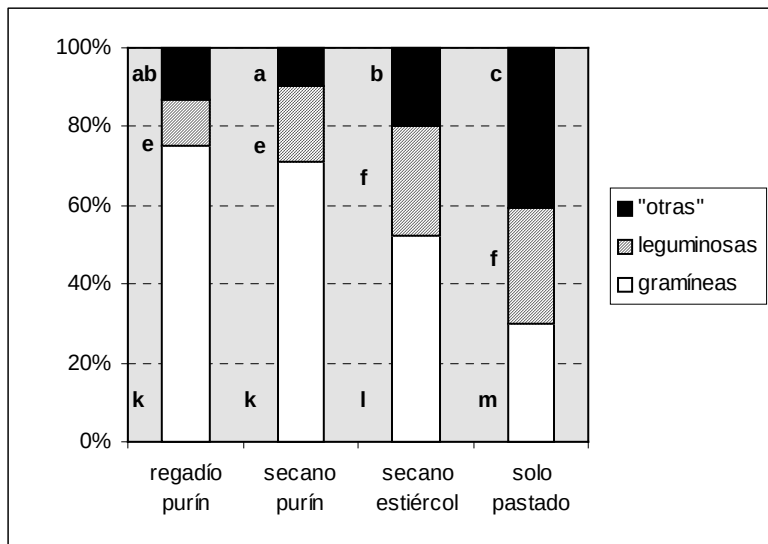


FIGURA 3. Frecuencias relativas medias de la biomasa de gramíneas, leguminosas y «otras» en los cuatro prados estudiados. Las pruebas de Kruskal Wallis entre las cuatro comunidades fueron todas altamente significativas ($n=400$, $p<0,0001$). Letras diferentes en los mismos segmentos de los histogramas indican diferencias significativas de ese grupo de especies entre los prados (Test no paramétrico de Tukey para una $p<0,05$)

5. Conclusiones

A partir de estos resultados, se constata una vez más el hecho de que la intensificación de la gestión ganadera de los prados incrementa las producciones y la calidad forrajera de la hierba, en detrimento de la diversidad de la vegetación. Si seguimos las directrices de las políticas ambientales nacionales y europeas, debemos buscar opciones productivas más compatibles.

Por ejemplo, en los prados que se han analizado, se ha identificado un régimen de gestión, concretamente el del prado de secano estercolado, que tiene alta diversidad florística, produciendo menos hierba, pero con una calidad aceptable. Este sería un modelo a seguir.

6. Referencias bibliográficas

- BADÍA, D., Y MARTÍ, C. 1999. Suelos del Pirineo Central: Fragen. INIA. UZ. CPNA. IEA. 199 pp. Huesca (España).
- BERNUÉS, P. 1993. Estudio agronómico y análisis de la composición florística de una pradería del Pirineo de Huesca (Fragen). Trabajo Final de Carrera. EUETA-Lleida.

- BERNUÉS, P. 1996. Efecto de la fertilización con purín y estiércol de vacuno sobre la producción y la calidad en los prados naturales del Pirineo aragonés (Fragen, Valle de Broto). Trabajo Final de Carrera. ETSEA-Lleida.
- CHOCARRO, C. 1992.- Estudios ecológicos sobre los prados de siega del Pirineo Central Español: Composición florística, producción y calidad. Instituto de Estudios Altoaragoneses. Serie de Investigación Científica. Huesca.
- CHOCARRO, C. Y REINÉ, R. (en prensa). El cultivo de los prados en el Pirineo. En: F. Fillat, R. García-González, D. Gómez-García, R. Reiné (Eds.). Pastos del Pirineo.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO 2006. www.chebro.es. 22-09-2006.
- DAGET, P. Y POISSONET, J. 1972. Un procédé d'estimation de la valeur pastorale des paturages. Fourrages, 49, 31-39.
- DEVRIES, D.M. Y DEBOER, T. 1959. Methods used in botanical grassland research in the Netherland and their applications. Herbage Abstract, 29: 1-7.
- FERRER, C., SAN MIGUEL, A., Y OLEA, L. 2001. Nomenclátor básico de pastos en España. Pastos 31 (1): 7-44.
- FERRER, C., BARRANTES, O., BROCA, A. Y MAESTRO, M. (en prensa). El proyecto «tipificación, cartografía y evaluación de los pastos españoles». Algunos resultados obtenidos sobre los pastos de los altos valles del Pirineo aragonés. En: F. Fillat, R. García-González, D. Gómez-García, R. Reiné (Eds.). Pastos del Pirineo.
- FILLAT, F. 2000. Grazed grasslands and hay meadows. Pyrenees-Spain. REU Technical Series 62: 68-74.
- , F. 2003. Gestión semiextensiva de prados y pastos europeos ricos en especies. Caso particular de los Pirineos Españoles. Pastos, 33(2): 171-215.
- GARCÍA, A. 1992. Conserving the species-rich meadows of Europe. Agriculture, Ecosystems and Environment, 40: 219-232.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. Y PUIGDEFÁBREGAS, J. 1982. Formas de erosión en el *flysh* eoceno surpirenaico. Cuadernos de Investigación Geográfica VIII (1-2): 85-128.
- GOBIERNO DE ARAGÓN. 2006. Dpto. de Medio Ambiente. www.aragob.es. 22-09-2006.
- HARVEY, D.R. Y SAUNDERS, C. 1993. European grassland farming: future prospects. In: Grassland for our world, pp. 300-306. SIR Publishing, Wellington.
- INSTITUTO ARAGONÉS DE ESTADÍSTICA 2006. www.aragob.es 22-09-2006.
- MAGURRAN, A.E. 1989. La diversidad ecológica y su medición. Vedral, Barcelona.
- MONTSERRAT, P. 1985. Aspectos funcionales y ecológicos de las zonas de agricultura de montaña. En: Agricultura de Montaña. Foresta 85, 23-36. Dpto de Agricultura del Gobierno vasco. Vitoria.
- PUJOL, M. 1974. El fomento de la producción forrajero-pratense en la provincia de Huesca. Ministerio de Agricultura. Madrid.
- REINÉ, R. 2002. Composición del banco de semillas del suelo en prados pirenaicos y alpinos. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza.
- REINÉ, R., CHOCARRO, C. Y FILLAT, F. 2004. Soil seed bank and management regimes of semi-natural mountain meadow communities. Agriculture, Ecosystems and Environment 104: 567-575.
- REMÓN, J. 1985. Prados y forrajes. Aedos. Barcelona.

- ZAHL, S. 1977. Jackknifing an index of diversity. *Ecology*, 58: 907-913.
- ZAR, J.H. 1984. *Biostatistical analysis*. Prentice Hall, New Jersey.

BLOQUE II.3. AGRICULTURA EN ZONAS TROPICALES

Caso II.3.1. Análisis de suelos y su interpretación en zonas tropicales

Palabras clave: Métodos químicos, análisis de suelos, solución extractora, interpretación de análisis de suelos, nivel crítico, nutrimentos esenciales.

Keywords: Chemical methods, soil test, soil extractant, interpretation of soil test, critical level, critical soil test, essential nutrient.

Introducción

El análisis químico de suelos es un procedimiento práctico y confiable para evaluar la fertilidad de los mismos, esto es, para determinar la disponibilidad relativa de los nutrimentos y proveer una guía en la cantidad de fertilizante que se requiere, para obtener buenos rendimientos en los cultivos. Se realiza en un laboratorio con soluciones extractoras que simulan la acción de la raíz, o sea ponen en solución una cantidad de nutrimentos semejante a la que sería capaz de tomar una planta durante su ciclo de crecimiento (Bertsch, 1987).

Los análisis de suelos son herramientas esenciales, exactas e indispensables para la evaluación del estado de fertilidad y productividad de los suelos. Los objetivos de los análisis de suelos son (Peck y Soltanpour, 1990).

- Determinar con exactitud el estado de los nutrimentos disponibles en el suelo.
- Indicar claramente al productor la magnitud de cualquier deficiencia o exceso que pueda existir en función de las diferentes cosechas.
- Establecer las necesidades de fertilización.
- Indicar los resultados que permitan una evaluación económica de las recomendaciones de fertilizantes.

Los objetivos reconocen que las pruebas de suelos, son por sí mismas una parte de un dato real y deben ser reportadas en términos concretos, no obstante que las interpretaciones pueden variar con respecto a las distintas cosechas y las recomendaciones sobre fertilizantes pueden incluir opiniones de interpretación (Peck y Soltanpour, 1990).

Los análisis de suelos, por su carácter empírico, deben ser correlacionados con el rendimiento del cultivo en invernadero o preferiblemente en el campo, en un amplio rango de niveles del nutrimento para que adquieran significado: de esta manera resultados de laboratorio permitirán predecir rendimientos; producciones mayores deben tener altas extracciones y producciones menores extracciones

bajas. Sin embargo, la cantidad de un elemento extraído por una solución extractora, es un índice del contenido del mismo que es fácilmente asimilable y aunque un método particular de extracción puede dar un diagnóstico confiable para un grupo limitado de suelos y cultivos, la justificación para el uso generalizado de cualquier método debe estar basada en la respuesta del cultivo en ensayos de campo y/o invernadero, donde es posible comparar una gran cantidad y variedad de suelos bajo las mismas condiciones de crecimiento, estrictamente controladas (Mortvedt, 1978). Una vez finalizada la etapa de laboratorio e invernadero, se debe realizar la calibración a nivel de campo para obtener respuestas probables del rendimiento que puedan esperarse de la aplicación de una cantidad determinada de fertilizante. Un análisis de suelo que ha sido calibrado, debe indicar no solo el nivel de suficiencia del nutrimento en el suelo, sino también la dosis que es necesario aplicar como fertilizante para obtener una producción máxima: la calibración de análisis de suelos puede ser entendida como el proceso de comprobación sobre el grado de limitación del crecimiento de una cosecha o la probabilidad de obtener una respuesta de crecimiento de un nutrimento aplicado a cualquier nivel del análisis del suelo.

Los análisis de suelos se basan en:

- a) El uso de procedimientos o soluciones extractoras que simulan la acción de las raíces para extraer nutrimentos de formas disponibles;
- b) Utilización de niveles críticos

Según Bray (1948) los requisitos para un buen análisis son los siguientes:

- a) La solución extractora debe extraer todas las formas disponibles o una parte proporcional del nutrimento, en suelos con propiedades ampliamente diferentes.
- b) El método debe ser rápido y preciso.
- c) Las cantidades extraídas deben ser correlacionadas con el incremento y respuesta de cada cultivo bajo diversas condiciones.

La selección de una solución extractora se basa en la mayor o menor asociación entre la cantidad del elemento extraído por la solución de las fracciones disponibles y lo que extrae o crece la planta. Cuanto más alto el valor del elemento extraído, mayor será la extracción del nutrimento en la planta. El grado de asociación se puede cuantificar con análisis estadístico de correlación y regresión.

La mayoría de los métodos de análisis de suelos consisten en poner a agitar una muestra de suelo con la solución extractora por un período específico de tiempo. Luego, la solución es filtrada y se determina la cantidad del nutrimento

que permanece en solución (Jones, 1990). Los extractantes más utilizados han sido los ácidos y bases diluidos, que disuelven las formas más disponibles de nutrimentos. Los ácidos diluidos son utilizados en suelos ácidos; en tanto que las bases, como carbonatos y bicarbonatos, son preferidos en suelos alcalinos (Cox y Kamprath, 1972, Lindsay y Cox, 1985), algunos ejemplos son las soluciones Bray, Carolina del Norte, Troug (Jones, 1990); Morgan modificado (Jones y Wolf, 1984); Olsen modificado (Díaz-Romeu y Hunter, 1978); y Bicarbonato de amonio (Soltampour, 1991).

Los agentes quelatantes y acomplejantes son utilizados para extraer elementos menores, como el EDTA (ácido etilendiaminotetracético) y DTPA (ácido dietilentriaminotetracético), han sido efectivos para extraer elementos menores, por lo que se han incluido en extractantes ácidos, como el EDTA a la solución Mehlich 3 (Mehlich, 1984), y básicos como Olsen modificado (Díaz-Romeu y Hunter, 1978).

Soluciones de sales son también utilizadas como agentes extractantes, tales como NH_4OAc , al extraer nutrimentos catiónicos de las fracciones intercambiable y en la solución del suelo (Lanyon y Helad, 1982) y KCl (Kamprath, 1970).

A las soluciones que pueden extraer más de una clase de elementos nutritivos en el suelo, se les conoce como agentes de extracción universal y poseen la ventaja de que en un único proceso de extracción se pueden determinar todos o la mayoría de los nutrimentos necesarios para evaluar el estado de fertilidad de un suelo, como, por ejemplo, la solución Mehlich 1 (HCl 0,05 N, H_2SO_4 0,025 N), conocida como doble ácido o Carolina del Norte, la cual no fue efectiva en suelos alcalinos y se modificó mediante la combinación de ácido acético, cloruro de amonio, fluoruro de amonio y ácido clorhídrico, para formar la solución Mehlich 2 (Mehlich, 1978, Jones, 1990). Otras universales son las soluciones de EDTA y acetato de amonio ($\text{NH}_4\text{OAc-EDTA}$) y Olsen modificada (NaHCO_3 0,5 M, EDTA 0,01 M, superfloc 127 0,01%, pH 8,5), esta última muy utilizada en los trópicos (incluida Costa Rica) y con pocos estudios de correlación como extractante, especialmente elementos menores (Lindsay y Cox, 1985, Rohman y Cox, 1988). Otra solución de este tipo es la Mehlich 3 (HOAc 0,2 N, NH_4NO_3 0,25 N, NH_4F 0,015 N, HNO_3 0,013 N, EDTA 0,001 M, a pH 2,5) (Mehlich, 1984), ha generado gran interés a nivel mundial, ya que se adapta muy bien a suelos ácidos de los trópicos, y se han encontrado muy buenas correlaciones con otros extractantes de uso actual (Cabalceta y Cordero, 1994a, Cabalceta y Cordero, 1994b, Cabalceta, 1995, Cabalceta y Bornemisza, 1995, Gadea, 1993, Molina, 1993, Molina y Bornemisza, 2001).

Algunas soluciones extractoras utilizadas en la determinación de elementos disponibles, se presentan en las tablas 1, 2 y 3.

SOLUCIÓN	EXTRACTANTES	RELACIÓN SUELO/SOLUCIÓN (vol/vol)	REFERENCIA
Olsen Modificado	0,5M NaHCO ₃ + 0,01M EDTA + 127 mg/L superfloc 127 pH 8,5	01:10	Díaz-Romeu y Hunter, 1978
Mehlich III	0,2N HOAc + 0,25N NH ₄ NO ₃ + 0,015N NH ₄ F + 0,013N HNO ₃ + 0,001M EDTA, pH 2,5	01:10	Mehlich, 1984
Mehlich I	0,05N HCl + 0,025N H ₂ SO ₄	01:10	TCSTPA, 1980
Morgan Modificado	1N NaOAc + 0,54N HOAc 0,00013M DPTA, pH 4,8	01:02	Jones y Wolf, 1984
Bray I	0,025N HCl + 0,03N NH ₄ F	01:10	TCSTPA, 1980

TABLA 1. Soluciones extractoras utilizadas en la determinación de P, K y micronutrientes disponibles en suelos

SOLUCIÓN	EXTRACTANTES	RELACIÓN SUELO/SOLUCIÓN (vol/vol)	REFERENCIA
KCl	KCl 1 M	01:10	Díaz-Romeu y Hunter, 1978
Mehlich III	0,2N HOAc + 0,25N NH ₄ NO ₃ + 0,015N NH ₄ F + 0,013N HNO ₃ + 0,001M EDTA, pH 2,5	01:10	Mehlich, 1984
Acetato de amonio	AOAc 1 M, pH 7,0	01:10	Briceño y Pacheco, 1984

TABLA 2. Soluciones extractoras utilizadas en la determinación de Ca y Mg disponibles en suelos

SOLUCIÓN	EXTRACTANTES	RELACIÓN SUELO/SOLUCIÓN (vol/vol)	REFERENCIA
Fosfato de Calcio	CaHPO ₄ 0,008 M (500 mg P l ⁻¹)	10:25	Díaz-Romeu y Hunter, 1978

TABLA 3. Soluciones extractoras utilizadas en la determinación de B y S disponibles en suelos

Nivel crítico

La determinación del nivel crítico de un elemento es muy importante para valorar el grado de disponibilidad del mismo para las plantas y se realiza por medio de estudios de correlación entre los rendimientos relativos del cultivo (% de respuesta de un tratamiento con respecto a un testigo, al cual se le adicionan los tratamientos óptimos para ponerlo a producir en su máxima expresión) y la concentración del elemento en el suelo (Cabalceta, 1993). Por nivel crítico se entiende aquella concentración de un elemento por encima de la cual, la probabilidad de incrementos sensibles en la producción debido a la aplicación del elemento es baja, mientras que valores inferiores muy probablemente corresponderán a producciones pobres y la probabilidad de incrementos debido a la aplicación del elemento es alta, en relación al método analítico utilizado y a la

respuesta del cultivo cuando se aplica un determinado nutrimento (Cabalceta, 1994).

Correlación y calibración de análisis de suelos

La correlación y calibración de metodologías de laboratorio constituye una etapa vital en toda la dinámica de interpretación de análisis de suelos, transferencia de tecnología y recomendación al agricultor. El producto final de esta etapa son las tablas de niveles críticos que son utilizadas, primero, para interpretar los análisis, y segundo, para tener pautas posteriores de recomendación. Un análisis de suelo o de tejido vegetal por sí mismo, no tiene valor si no es comparado con una tabla de niveles críticos que ayude a definir si estos son bajos, óptimos o tóxicos (Henríquez et ál., 1995). La correlación y calibración a nivel de invernadero permite comparar diferentes métodos de extracción y determinar los niveles críticos tentativos. La calibración a nivel de campo establece los niveles críticos definitivos para un método de extracción previamente seleccionado, y constituye la fase más importante en los estudios de calibración (Sánchez, 1981).

El método gráfico propuesto por Cate y Nelson (1965), es una forma simple de calibrar el análisis de suelos con la respuesta de la planta, ya que permite separar los datos en dos poblaciones: suelos con respuesta probable a la aplicación del elemento y los suelos con respuesta improbable. El método consiste en graficar los rendimientos relativos en función del análisis de suelos. En vez de intentar adecuar una función matemática continua a través de los puntos diseminados, se usa una hoja transparente de superposición dividida en cuadrantes por líneas horizontales y verticales: esta hoja se coloca sobre los datos, de tal manera que el mayor número de puntos se acomoden en los cuadrantes inferior izquierdo y superior derecho, y el número inferior de puntos se deja en los cuadrantes superior izquierdo e inferior derecho (Waugh et ál., 1973, Sánchez, 1981). Con esta técnica, el nivel crítico en cuestión se obtiene en el punto donde la línea vertical corta el eje x (Cate y Nelson, 1965); en tanto que la línea horizontal divide los suelos con respuesta, de los suelos sin respuesta a la adición del nutrimento analizado y por lo general corta el eje de rendimiento relativo en valores que oscilan entre el 80 y el 90% (figura 1). La ubicación de muchos puntos en los cuadrantes superior izquierdo e inferior derecho, indica que el método de extracción no es apropiado para los suelos bajo estudio, o que no existe correlación entre el análisis de suelos y el rendimiento de la planta (Dahnke y Olson, 1990). Cate y Nelson (1971) también sugirieron un método estadístico simple para definir los límites de clases, dividiendo los datos en dos grupos, usando sucesivamente niveles críticos tentativos para averiguar si un nivel crítico

específico maximizará el total de habilidad predicativa (R^2) con las medias de los dos grupos o clases como los valores predictores.

La disponibilidad de nutrientes varía de acuerdo con el tipo de suelo y sus características químicas, por tal motivo, se justifica realizar estudios de correlación y calibración dividiendo los suelos en grupos u órdenes taxonómicos, con el propósito de definir los niveles críticos de los elementos con mayor precisión en cada uno de esos grupos. Este tipo de consideración ha sido muy poco utilizado en la mayoría de los estudios de calibración de análisis de suelos realizados hasta el momento (Molina, 1993).

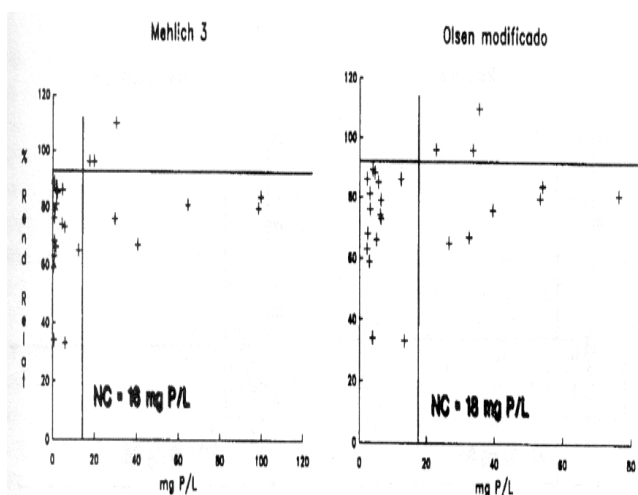


FIGURA 1. Determinación del nivel crítico de P con Mehlich 3 y Olsen Modificado en 100 suelos de Costa Rica (Cabalceta y Cordero, 1994a)

En Costa Rica se realizan los siguientes análisis químicos de suelos:
 pH en agua y KCl 1N (1:2,5 relación suelo-solución)
 Ca, Mg, Acidez, Al en KCl 1N (1:10 relación suelo-solución)
 P, K, Fe, Cu, Zn, Mn: Olsen modificado (1:10 relación suelo-solución)
 B y S: Fosfato de Calcio $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$: (1:2,5 relación suelo-solución)
 Materia orgánica: Walkley y Black

Parámetros evaluados en análisis de suelos para fertilidad

pH

Acidez o aluminio intercambiable

Bases intercambiables [(Ca, Mg, K, Na (si es analizado))]

Capacidad de Intercambio Catiónico Efectivo, CICE (suma de bases intercambiables + acidez intercambiable)

% de saturación de acidez intercambiable (acidez intercambiable/CICE x 100)

% de saturación de bases (suma de bases intercambiables/CICE x 100)

Fósforo disponible

Micronutrientes disponibles (Fe, Cu, Zn, Mn, B, Mo)

Relaciones entre cationes (Ca/Mg, Mg/K, Ca+Mg/K, Ca/K, Mg/K)

Materia orgánica

Textura

Salinidad o conductividad eléctrica

Unidades de concentración utilizadas en análisis de suelos

Es importante tener presente las unidades de concentración reportadas por los laboratorios. La expresión de contenidos de nutrientes por volumen de suelo es la medida óptima por ser menos variable y comparable entre suelos, porque el volumen de 1 ha a una profundidad determinada, que generalmente es 0,2 m, es siempre 2 millones de litros, mientras que el peso varía según la densidad aparente de cada suelo, pero son unidades que se pueden transformar de una a otra por medio de la siguiente fórmula:

$$(\text{concentración} / \text{peso}) \times \text{densidad aparente} = \text{concentración} / \text{volumen}$$

Los contenidos de calcio, magnesio, potasio y acidez intercambiable se expresan en $\text{cmol}(+) \text{ l}^{-1}$, pero también se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\text{cmol}(+) \text{ l}^{-1} \text{ o } \text{cmol}(+) \text{ kg}^{-1} = \text{meq } 100 \text{ ml}^{-1} \text{ o } \text{meq } 100 \text{ g}^{-1}$$

Los contenidos de fósforo, azufre, boro, zinc, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, se expresan en mg l^{-1} , pero también así:

$$\text{mg l}^{-1} \text{ o } \text{mg kg}^{-1} = \text{ug ml}^{-1} \text{ o } \text{ug g}^{-1} = \text{ppm}$$

Es importante la transformación que se realice a los datos del análisis del suelo a kg ha^{-1} , ya que nos permite cuantificar de alguna manera la disponibilidad de nutrientes en el suelo con los requerimientos de los cultivos, que también se expresan en kg ha^{-1} , por medio de las siguientes fórmulas. Se asume que una ha a 0,2 m de profundidad mide 2 millones de litros y los valores son reportados en

volumen (cmol(+) l⁻¹); si se reportan en peso [cmol(+) kg⁻¹] se necesita la densidad aparente para realizar el cálculo. Ejemplo:

Una hectárea posee un volumen de:

a) Profundidad de 20 cm: $10\,000\text{ m}^2 \times 0,20\text{ m} = 2\,000\text{ m}^3 = 2\,000\,000\text{ dm}^3$ o litros

b) Profundidad de 15 cm: $10\,000\text{ m}^2 \times 0,15\text{ m} = 1\,500\text{ m}^3 = 1\,500\,000\text{ dm}^3$ o litros

La masa (peso) de una hectárea varía según la densidad aparente (δ_{ap}):

Masa = volumen x δ_{ap}

Un suelo con una $\delta_{ap} = 1,5\text{ g ml}^{-1} = 1,5\text{ kg l}^{-1}$

0,20 m profundidad. $\Rightarrow 2\,000\,000\text{ litros} \times 1,5\text{ kg l}^{-1} = 3\,000\,000\text{ kg ha}^{-1}$

0,15 m profundidad $\Rightarrow 1\,500\,000\text{ litros} \times 1,5\text{ kg l}^{-1} = 2\,250\,000\text{ kg ha}^{-1}$

cmol(+) l ⁻¹ de K x 780 = kg ha ⁻¹
cmol(+) l ⁻¹ de Ca x 400 = kg ha ⁻¹
cmol(+) l ⁻¹ de Mg x 240 = kg ha ⁻¹
mg l ⁻¹ (ppm) x 2 = kg ha ⁻¹
% x 10000 = mg l ⁻¹ (ppm)

Interpretación de análisis de suelos

En la tabla 4 se presenta la Tabla de Niveles Críticos, asociados a las metodologías que se utilizan en Costa Rica. Es muy importante considerar que los niveles críticos varían según la solución extractora utilizada y los estudios de correlación y calibración realizados a esa solución extractora por grupos de suelos, cultivos, etc. Es por esta razón, que se debe tener en cuenta la solución con que se realizó el análisis y la tabla de niveles críticos que posea.

		Bajo	Medio	Óptimo	Alto
pH				6 – 7	> 7
Ca	cmol(+) l ⁻¹			10 – 20	> 20
Mg	cmol(+) l ⁻¹			3 – 5	> 5
K	cmol(+) l ⁻¹			0,5 – 1,0	> 1,0
Acidez intercamb.	cmol(+) l ⁻¹	<0,5		< 0,5	> 1,5
S. A.	%	según tolerancia del cultivo		< 10	> 30
P	mg l ⁻¹			20 – 50	> 50
Fe	mg l ⁻¹			50 – 100	> 100
Cu	mg l ⁻¹			10 – 20	> 20
Zn	mg l ⁻¹			10 – 15	> 15
Mn	mg l ⁻¹			10 – 50	> 50
B	mg l ⁻¹			0,5 – 1	> 1
S	mg l ⁻¹			20 – 50	> 50
M.O.	%			5 – 10	> 10
RELACIONES CATIONICAS		Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K
		2-5	5-25	2,5-15	10-40

TABLA 4. Tabla de Niveles Críticos utilizados para la interpretación de análisis de suelos en Costa Rica

1. Las unidades están expresadas en m/vol (cmol(+)/L, %=g/100 ml, mg/L).

2. Procedimiento: pH en agua, en relación suelo:solución 1:2,5; acidez, Ca y Mg en KCl 1M, 1:10; P, K, Zn, Fe, Mn y Cu en Olsen Modificado (NaHCO₃ 0,5M, EDTA disódica 0,01M, Superfloc 127, pH 8,5), 1:10. Acidez por titulación (CIA-SC09-01-02-P04)*, P por Espectrofotometría UVV (CIA-SC09-01-02-P06)* y el resto por Espectrofotometría de AA (CIA-SC09-01-02-P05)*.

* www.eca.or.cr (Laboratorio de suelos y foliares, Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica).

Una secuencia lógica para realizar una interpretación de un análisis de suelos es la siguiente (Bertsch, 1998):

1.- Identificación de problemas de acidez. Causas. Observación del pH, la acidez intercambiable o aluminio intercambiable, suma de bases, % saturación de acidez. Considerar la tolerancia del cultivo a la acidez o aluminio intercambiable.

2.- Decisión de encalado. Cálculo de dosis. Definir época y método de aplicación, así como la fuente de la cal. Considerar efectos del encalado (primarios y secundarios).

3.- Cálculo de relaciones de bases, Ca, Mg y K. Posibles desequilibrios y efectos del encalado sobre ellas.

4.- Identificación de todos los nutrientes deficientes. Establecimiento de posibles causas.

5.- Estimación del comportamiento del N y S con base en materia orgánica, condiciones climáticas, otras características del suelo, posibilidades de que ocurra mineralización, etc.

6.- Elaboración de una síntesis o conclusión. Ordenar jerárquicamente según importancia de los problemas diagnosticados en el suelo.

La interpretación de un análisis de suelo consiste en comparar los contenidos de los nutrimentos dados en el reporte del análisis con los niveles críticos de las tablas obtenidos en la investigación.

El cálculo de las dosis de encalado es importante y se explicarán más adelante. En términos generales la ventaja de recomendar una enmienda es que, mientras las dosis no sean exageradas, siempre resulta provechosa y rentable.

Respecto a las relaciones catiónicas (entre el Ca, Mg y K), hay poca evidencia sobre el efecto real de estos desequilibrios sobre el rendimiento de los cultivos. Si se utilizan estos valores como criterio para ajustar los equilibrios, las dosificaciones resultan demasiado altas. Por estos motivos, deben interpretarse con cuidado, considerándolos como índices importantes cuando un valor que ofrecen se aleja demasiado de una dirección o de otra del rango óptimo. Después de estimar las dosis de encalado es conveniente recalculer las relaciones [considerando los $\text{cmol}(+) \text{ l}^{-1}$ adicionados] para observar las alteraciones y estimar los posibles problemas, principalmente de Mg (Bertsch, 1998).

El N es un elemento que casi no se reporta, pues resulta poco confiable. A este elemento, al igual que el S, lo podemos estimar por la mineralización de la materia orgánica: cantidad de restos existentes, tipo de suelo, condiciones de humedad y temperatura (sobre todo su intermitencia), el pH del suelo, y el contenido de bases. A mayor magnitud de esas condiciones, mayor podrá ser la liberación de N y S, e incluso de P, a partir de la materia orgánica.

Se debe realizar una síntesis de los problemas para definir lo que hay que resolver primero.

De manera general, los parámetros se describen a continuación:

pH del suelo: suministra información útil para el diagnóstico general. Consiste en expresar las condiciones del suelo en términos de acidez o alcalinidad, indicando lo que domina en el suelo; iones H^+ u OH^- . Hay que tener presente que, químicamente, un ácido es una sustancia que cede protones al agua (H^+), y en forma equivalente, una base es una sustancia que al disociar recibe protones del agua, produciendo iones OH^- . El pH se define en forma logarítmica y es el inverso del logaritmo de la actividad (concentración) de iones H^+ de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{pH} = \log \frac{1}{(\text{H}^+)}$$

Así, a pH 7,0 la concentración de iones H^+ es igual a 0,0000001 moles de H^+ por litro. El inverso de 0,0000001 es igual a 10 000 000 y el logaritmo de este número es 7. La escala del pH cubre un rango que va de 0 a 14. Un valor de 7,0 es neutro (igual número de H^+ y OH^- en la solución) mientras que valores menores que 7,0 son ácidos y valores mayores que 7,0 son básicos (Espinosa y Molina, 1999).

Este parámetro se puede subdividir en tres para los suelos tropicales, muy ácido, moderadamente ácido y ligeramente ácido (Kass, 1998):

1- MUY ÁCIDO es menor de 5,5: probablemente en este suelo es necesario encalar para muchos cultivos. En el suelo pueden presentarse deficiencias de fósforo, calcio, magnesio y molibdeno.

2- MODERADAMENTE ÁCIDO de 5,5 a 5,9: en estos suelos hay una baja solubilidad de fósforo y moderada disponibilidad de calcio y magnesio.

3- LIGERAMENTE ÁCIDO de 5,9 a 6,5: se considera una condición óptima respecto al pH del suelo para la mayoría de los cultivos, porque las interferencias para la absorción de los nutrimentos son mínimas.

Bases extraíbles: incluyen al calcio, magnesio, potasio y sodio. Normalmente el sodio no es analizado en los laboratorios de regiones tropicales. Para evaluar las bases extraíbles se utilizan unidades de $cmol(+) l^{-1}$ de suelo (o miliequivalentes por 100 mililitros de suelo = $meq 100 ml^{-1}$ de suelo).

Acidez intercambiable: son los hidrógenos y aluminios intercambiables (H^+ y Al^{+3}) retenidos en los coloides del suelo por fuerzas electrostáticas, que causan una disminución del pH y un aumento en la concentración de iones tóxicos para las plantas. La mayor parte de la acidez en los suelos tropicales (excluyendo los suelos orgánicos) proviene del Al, por lo que generalmente se habla de acidez intercambiable y Al intercambiable como si fueran sinónimos.

Se entiende por *acidez del suelo* la condición del mismo en la cual existe una acumulación de elementos tóxicos (Al, Fe y Mn), a menudo asociada a una fertilidad natural baja (deficiencia de P, cationes y elementos menores). Esta condición se asocia con suelos muy viejos, residuos orgánicos, extracción de nutrimentos por los cultivos, uso de fertilizantes amoniacales (acidifican el suelo por la reacción de nitrificación: $NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O$, al generar los iones de H^+), contaminación y erosión. Estas condiciones propician la pérdida de bases (lixiviación por altas precipitaciones y altas temperaturas que aumentan la meteorización) y la producción de iones ácidos, que conducen a la acidificación de los suelos.

Los suelos ácidos están asociados con una infertilidad debida a uno o más de los siguientes factores (Bertsch, 1998):

1. Toxicidad de Aluminio
 - > 60% de saturación de Al^{3+} en el suelo
 - > 1 mg l^{-1} de Al^{3+} en la solución del suelo
2. Deficiencia de Ca y/o Mg
3. Toxicidad de Mn
4. Fijación de P
 - Precipitación con Fe y Al intercambiables
 - Adsorción arcillas carga positiva: alofana, óxidos de Fe y Al
5. Toxicidad de H^{+}

En Costa Rica los órdenes de suelos que poseen problemas serios de acidez son: Ultisoles, Andisoles, Alfisoles e Inceptisoles (en este último orden, los Grandes Grupos Dystrudepts y Dystrustepts) (Molina, 1998).

Los efectos de la acidez en los cultivos son los siguientes:

- 1- Reduce el crecimiento de las raíces, y por lo tanto afecta en forma negativa el rendimiento del cultivo.
- 2- Reduce la calidad de las cosechas.
- 3- Induce la aparición de deficiencias nutricionales en los cultivos: calcio, magnesio, fósforo, azufre, zinc, etc.
- 4- Disminuye rentabilidad del cultivo.

La acidez o Al intercambiable se determina mediante la extracción del suelo con una sal neutra o no tamponada, como el KCl 1 N, y titulando el extracto con una base. Esta fracción incluye el Al y el H intercambiable en la solución del suelo, que puedan perjudicar el crecimiento de las plantas. Se considera que un valor mayor de 0,5 cmol (+) l^{-1} de acidez intercambiable podría ser problemático para los cultivos. También, dentro de la estimación de la acidez del suelo, la suma de bases (Ca + Mg + K, y Na si está analizado) es también importante, ya que un valor inferior a 5 cmol (+) l^{-1} puede disminuir el rendimiento de los cultivos y está relacionado con la baja fertilidad. Cuando a la suma de bases se le agrega la acidez intercambiable se obtiene la Capacidad de Intercambio de Cationes Efectiva (CICE) de un suelo. Con estos valores se calcula el parámetro más importante, que es el porcentaje de saturación de acidez o de aluminio, por medio de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ saturación de acidez} = \frac{\text{acidez intercambiable } \text{cmol(+) l}^{-1} \times 100}{\text{CICE (acidez intercambiable + suma de bases) } \text{cmol(+) l}^{-1}}$$

La saturación de acidez es una medida del % del complejo de intercambio catiónico que está ocupado por Al^{+3} y H^{+} , y es el mejor criterio para diagnosticar problemas de acidez. Es importante el método de determinación, ya que si se usa una Capacidad de Intercambio Catiónica (CIC) obtenida con una solución tampón, los valores no corresponderán a la realidad, sino que estarán considerando los efectos que el pH de la solución de extracción tiene sobre los coloides de carga variable. Así las cosas, si se determina el % de saturación de acidez directamente con respecto a esa CIC, el valor obtenido será subestimado, y si primero se calcula el % de saturación de bases y luego se resta, se sobreestimaré la acidez. Cada cultivo, variedad o cultivar tiene su grado de tolerancia a la acidez, lo cual depende de las características genéticas de la planta (maíz <25%, papa <20%, sorgo 15%, café <25%, alfalfa <15%, trébol <25%, etc. Consultar el artículo «Acidez y encalado de suelos» de Alfredo Alvarado, Eloy Molina y Gilberto Cabalceta). En términos generales, se puede indicar que casi ningún cultivo soporta más del 60% de saturación de acidez y el valor deseable para la mayoría de los cultivos oscila entre el 10 y el 25%.

Existen correlaciones entre el pH del suelo y el Al intercambiable que establecen claramente la precipitación del Al con pH entre 5,5 y 6,0, por lo tanto, los problemas de solubilidad del mismo se encontrarán por debajo de ese valor (5,5) que es considerado el nivel crítico, y por ese motivo, resulta más abundante y tóxico para las plantas. Además, también hay correlaciones entre el pH y el % de saturación de acidez, donde se demuestra que a $\text{pH} > 5,5$ no hay acidez significativa en el complejo coloidal, ya que está principalmente saturado de bases.

En síntesis, los problemas de acidez aumentan cuando se presentan las siguientes condiciones en el suelo (Bertsch, 1998, Molina, 1998, Espinosa y Molina, 1999):

- a) $\text{pH} < 5,5$
- b) Acidez o Al intercambiable $> 0,5 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$
- c) Suma de bases $< 5 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$
- d) % saturación de acidez $> 20\%$ (ámbito entre 10 y 60%)

Para consultas sobre el encalado de los suelos, la estimación de la dosis de cal para neutralizar la acidez, calidad de la cal, método y época de aplicación, y problemas de sobreencalado, revisar el artículo «Acidez y encalado de suelos» de Alfredo Alvarado, Eloy Molina y Gilberto Cabalceta.

A continuación, se muestran ejemplos de interpretación de análisis de suelos:

Ejemplo 1

Suelo: Typic Hapludult

Ubicación: Pital, San Carlos, Costa Rica

Cultivo: piña

PRNT de la cal: 80%

RAS deseado: 25%

Índices de acidez

	pH	cmol(+) l ⁻¹ Acidez	Bases	CICE	% Sat. Ac.
	4,6	2,5	2,82	5,32	47
NC* =	5,5	0,5	5,0	5,0	10

Relaciones catiónicas

	Ca/Mg	Mg/K	Ca+Mg/K	Ca/K
	3,8	1,2	5,7	4,5
NC* =	2-5	2,5-15	10-40	5-25

Análisis general

%	mg l ⁻¹	cmol(+) l ⁻¹		
M.O.	P	K	Ca	Mg
1,5	4	0,42	1,9	0,5
NC* =	5	10	0.2	4

mg l ⁻¹					
S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
19	0,6	7	150	9	1
12	0,5	1	10	5	3

*NC= Nivel crítico

Interpretación:

1. *Identificación de problemas de acidez.* El pH de este suelo es inferior a 5,5 y la acidez intercambiable es mayor a 0,5 cmol(+) l⁻¹. La suma de bases está por debajo del nivel crítico de 5 cmol(+) l⁻¹ y el % de saturación de acidez está en el 47%. Las causas de la acidez se deben a la pérdida de bases (Ca y Mg) por lixiviación y sustituidas de iones ácidos, ya que en regiones tropicales la precipitación excede a la evapotranspiración durante la mayor parte del año. También las altas temperaturas asociadas a la alta precipitación (4000 mm o l m³) aceleran la meteorización.

2. *Encalado.* Los parámetros nos indican que el suelo tiene problemas de acidez. Este problema se debe enfrentar utilizando especies tolerantes a la acidez y con el encalado. Las necesidades de cal son las siguientes:

$$t \text{ CaCO}_3 \text{ ha}^{-1} = \frac{1,5 (47 - 25)}{100} \times \frac{5,32 \times 100}{80} = 2,2$$

Se recomienda aplicar el material uniformemente en la superficie del suelo y luego incorporarlo en los primeros 15 a 20 cm de suelo por medio de un arado o rastra. No existen limitaciones con la época, siempre y cuando haya humedad en el suelo y no coincida con fertilizaciones. En siembras nuevas o resiembras la cal se debe incorporar antes de sembrar. La fuente es una cal con un PRNT del 80%. Los efectos primarios de la cal son la precipitación del Al intercambiable y elevar el pH del suelo. Como efectos secundarios del enclado están: propicia un aumento de Ca (y Mg si se utiliza cal dolomita u otra fuente) y modifica las relaciones catiónicas, modifica la disponibilidad de P, Fe, Zn y Mo, se favorece la mineralización de la materia orgánica y otros procesos microbiológicos, y puede aumentarse la carga negativa de los coloides, o sea, la capacidad de retención de nutrimentos en el suelo.

3. *Cálculo de las relaciones entre bases.* El contenido de bases es bajo, lo que señala un mal índice de fertilidad natural y provoca un % de SA muy alto. Las relaciones entre las bases indican que solo está equilibrada Ca/Mg (aunque los valores están por debajo del nivel crítico) y las demás nos indican que el Ca y el Mg están en desequilibrio con el K (está al doble del nivel crítico), sin embargo, al practicar el enclado debe prestársele atención a la modificación de estas relaciones, principalmente si se utiliza una cal que no tiene Mg, el cual debe agregarse en el programa de fertilización (o en su defecto considerar el uso de una cal con Mg).

4. *Identificación de todos los nutrimentos deficientes.* Los elementos deficientes son, el P por su alta fijación con el Al y el Fe. Las bases Ca y Mg, que se lixiviaran, al igual que el Zn.

5. *Estimación del comportamiento del N y S con base en la materia orgánica.* Es bajo el contenido de M.O. y haría pensar en un inadecuado suplemento de N y S (al igual que el P) de esta fracción.

6. *Síntesis.* La secuencia de problemas en este suelo es la siguiente: acidez>Ca=Mg>N>P>Zn

Ejemplo 2

Suelo: Typic Haplustert

Ubicación: Bernabela, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica

Cultivo: caña de azúcar

PRNT de la cal: 96,1%

RAS deseado: 20%

Índices de acidez

	pH	cmol(+) l ⁻¹ Acidez	Bases	CICE	% Sat. Ac.
	7,1	0,09	65,13	65,22	0,14
NC* =	5,5	0,5	5,0	5,0	10

Relaciones catiónicas

	Ca/Mg	Mg/K	Ca+Mg/K	Ca/K
	1,79	466	1302	836
NC* =	2-5	2.5-15	10-40	5-25

Análisis general

	%	mg l ⁻¹	cmol(+) l ⁻¹			mg l ⁻¹					
	M.O.	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	1,3	12	0,05	41,78	23,30	0,19	0,68	12	8	8	1,2
NC*=	5	10	0,2	4	1	12	0,5	1	10	5	3

*NC= Nivel crítico

Interpretación:

1. *Identificación de problemas de acidez.* El pH de este suelo es superior a 5,5 y la acidez intercambiable es inferior a 0,5 cmol(+) l⁻¹. La suma de bases está mucho mayor que el nivel crítico de 5 cmol(+) l⁻¹ y el % de saturación de acidez está en 0,14%. Todos los parámetros para evaluar la acidez nos indican que el suelo no posee este problema.

2. *Encalado.* No se necesita encalar.

3. *Cálculo de las relaciones entre bases.* El contenido de bases es muy alto, lo que señala un buen índice de fertilidad natural. Todas las relaciones entre las bases están desequilibradas: Ca/Mg está ligeramente por debajo de 2, pero no es problema por las grandes cantidades de cada uno ellos; las demás relaciones por el contrario están desequilibradas con valores muy altos, superiores a los valores máximos de las relaciones, que indican el desequilibrio tan grande que existe con el K por su bajo contenido.

4. *Identificación de todos los nutrientes deficientes.* Los elementos deficientes son: el K porque el material parental de estos suelos no es rico en K y por su fijación entre láminas de arcillas 2:1; el S porque el material que originó el suelo no posee mucho y escasez de elementos menores, especialmente Fe y Zn, cuyos niveles están bajos por la presencia de pH alto. El P, aunque está ligeramente por arriba del nivel crítico hay que ponerle atención, por la formación de P-Ca.

5. *Estimación del comportamiento del N y S con base en la materia orgánica.* Aunque la deposición de M.O. es alta por la buena fertilidad, el contenido de M.O. es muy bajo, ya que existen las condiciones adecuadas (pH alto y bastantes bases) para un aumento grande de poblaciones de microorganismos que la

mineralizan. Estas condiciones hacen pensar en un inadecuado suplemento de N y S (al igual que el P) de esta fracción.

6. *Síntesis.* La secuencia de problemas en este suelo es la siguiente: N>K>S>Zn>Fe>P

Ejemplo 3

Suelo: Typic Hapludand

Ubicación: Finca Hacienda Juan Viñas (laderas del volcán Irazú a 1500 m s.n.m. y 3260 mm (l m³) de precipitación), Capellades, Cartago, Costa Rica.

Cultivo: papa (patata)

PRNT de la cal: 80%

RAS deseado: 25%

Índices de acidez

	pH	cmol(+) l ⁻¹ Acidez	Bases	CICE	% Sat. Ac.
	5,6	0,47	4,3	4,77	9,85
NC* =	5,5	0,5	5,0	5,0	10

Relaciones catiónicas

	Ca/Mg	Mg/K	Ca+Mg/K	Ca/K
	2,1	17	52,8	35,8
NC* =	2-5	2,5-15	10-40	5-25

Análisis general

% M.O.	mg l ⁻¹ P	cmol(+) l ⁻¹			mg l ⁻¹					
		K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
15,35	5	0,08	2,86	1,36	15	0,6	7	108	6	19,3
NC*= 5	10	0,2	4	1	12	0,5	1	10	5	3

*NC= Nivel crítico

Interpretación:

1. *Identificación de problemas de acidez.* El suelo de la finca Hacienda Juan Viñas, tiene adiciones recientes de cenizas volcánicas por lo que no presenta problemas de acidez, como se deduce de su valor de pH, cantidad de acidez intercambiable y saturación de acidez; además, la *tolerancia* a la acidez de la papa es del orden del 30% (Bertsch, 1998).

2. *Encalado.* No requiere encalado para corregir problemas de acidez. Este suelo tiene un nivel de acidez intercambiable bajo, pero es deficiente en Ca. En este caso el uso de la fórmula no es efectivo, y la utilización de cal es el método más económico y práctico de suplir el Ca: una dosis de 0,5 a 1 t ha⁻¹ ha dado

buenos resultados, pues 1 t ha^{-1} de CaCO_3 es igual a $1 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$ de Ca (calculado a 0,2 m de profundidad).

3. *Cálculo de las relaciones entre bases.* El contenido de bases es un poco bajo, lo que señala una baja fertilidad natural. Las relaciones entre las bases indican que solo está equilibrada Ca/Mg (aunque el Ca está por debajo del nivel crítico) y las demás nos indican que el K está en desequilibrio con el Ca y Mg por su bajo contenido.

4. *Identificación de todos los nutrimentos deficientes.* El suelo es bajo en Ca [$2,86 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$], K [$0,08 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$] y P disponible (5 mg l^{-1}), este último valor es muy inferior a los 50 mg l^{-1} considerados como nivel crítico por Soto (2001) para el cultivo de la papa. Este aspecto está asociado a los muchos años con siembra consecutiva de caña de azúcar y a los pocos años de cultivo bajo papa, y también a la facilidad de fijación del mismo a la alofana (coloide predominante en los suelos volcánicos), que es más acentuada en la zona media de la ladera del volcán donde la cantidad de arcillas y materia orgánica es mayor (Alvarado, 2001), la cual también puede acomplejar el Fe, por lo que el contenido de este elemento es menor que el encontrado en fincas cercanas al cráter del volcán Irazú (3020 m s.n.m.). Los contenidos de Mn, Cu y Zn se consideran suficientes. En general, el contenido de bases es bajo, lo cual se atribuye a su lixiviación, debido a las texturas franco-arenosas de estos suelos y a la elevada precipitación pluvial de la zona, y a que el K puede ser retenido por la alofana en sus intersticios, lo que indica un bajo índice de fertilidad y concuerda con las características de la mayoría de los Andisoles de Costa Rica (Alvarado et ál., 2001)

5. *Estimación del comportamiento del N y S con base en la materia orgánica.* Es muy alto el contenido de M.O. y haría pensar en un adecuado suplemento de N y S (al igual que el P) de esta fracción, sin embargo, esta M.O. forma organominerales muy estables con la alofana, que no descomponen los microorganismos.

6. *Síntesis.* La secuencia de problemas en este suelo es la siguiente: $\text{P} > \text{N} > \text{Ca} = \text{K}$

Bibliografía

- ALCARDE J.C. 1992. Correctivos da acidez dos solos: características e interpretacoes técnicas. ANDA, Sao Paulo, Brasil. Boletim Técnico n.º 6. 26 p.
- ALVARADO A., HENRÍQUEZ C., BERTSCH F., BORNEMISZA E., CABALCETA G., MATA R., MOLINA E., SALAS R.E. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas. Andisoles de Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). San José, Costa Rica. 112 p.
- BERTSCH F. 1987. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos en Costa Rica. San José, Costa Rica. Oficina de Publicaciones de la Universidad de Costa Rica. 81 p.

- , 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS), San José, Costa Rica. 157 p.
- BRAY R.H. 1948. Requeriments for successfull soil test. *Soil Science* 66:83-89.
- BRICEÑO J.A., PACHECO R. 1984. Métodos analíticos para el estudio de suelos y plantas. San José, Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 152 p.
- CABALCETA G. 1995. Correlación de soluciones extractoras de fósforo en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 19(1):29-37.
- , 1993. Niveles críticos de fósforo, azufre y correlación de soluciones extractoras en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 167 p.
- CABALCETA G., CORDERO A. 1994a. Niveles críticos de fósforo en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 18(2):147-161.
- , 1994b. Niveles críticos de azufre en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 18(2):163-174.
- CABALCETA G., BORNEMISZA E. 1995. Correlación de soluciones extractoras de azufre en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 19(1):39-45.
- CATE R.B. Jr., NELSON L.A. 1965. A rapid method for correlation of soil test analysis with plant response data. North Carolina State University, International Soil Fertility Project (Tech. Bull. N.º 1).
- , 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Science Society of America Proceedings* 35:858-860.
- COCHRANE T., SALINAS J., SÁNCHEZ P. 1980. An equation for liming acid mineral soils to compesate crops aluminium tolerance. *Tropical Agriculture* 57(2):133-140.
- COX F.R., KAMPRATH E.J. 1972. Micronutrient soil test, pp. 45-72. In: J.J. Morvedt et al. (eds.). *Micronutrients in Agriculture*. SSSA, Madison, Wisconsin.
- DANHNKE W.C., OLSON R.A. 1990. Soil test calibration, correlation and recommendation, pp. 45-72. In: R.L. Westerman (ed.). *Soil testing and plant analysis*. SSSA, Madison, Wisconsin.
- DÍAZ-ROMEU R., HUNTER, A. 1978. Metodología de muestreo de suelo, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 61 p.
- ESPINOSA J., MOLINA E. 1999. Acidez y encalado de los suelos. 1.ª ed., Instituto de la Potasa y el Fósforo, Quito, Ecuador. 42 p.
- GADEA A.J. 1993. Niveles críticos de calcio, magnesio y potasio en cuatro órdenes de suelos de Costa Rica. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 135 p.
- HENRÍQUEZ C., BERTSCH F., SALAS R. 1995. Fertilidad de suelos: manual de laboratorio. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS), San José, Costa Rica. 64 p.
- JONES J.B. 1990. Universal soil extractants: their composition and use. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 21(13-16):1091-1101.
- JONES J.B., WOLF B. 1984. Manual of soil testing procedure using Modified (Wolf) Morgan extracting reagent. Benton Laboratories, Athens, Georgia. 61 p.

- KAMPRATH E.J. 1970. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 34:252-254.
- KASS C.L. 1998. Fertilidad de suelos. EUNED, San José, Costa Rica. 233 p.
- LANYON L.E., HEALD W.R. 1982. Magnesium, Calcium, Strontium and Barium, pp. 159-165. In: A.L. Page et al. (eds.). *Methods of soil analysis, Part 2. Agronomy Monograph N.º 9*, 2 ed. ASA-SSSA.
- LINDSAY W.L., COX F.R. 1985. Micronutrients soil test for tropics. *Fertilizer Research* 7:169-200.
- MEHLICH A. 1978. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 9(6):455-476.
- , 1984. Mehlich 3 soil extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 15:1409-1416.
- MOLINA E. 1993. Calibración de métodos de análisis de cobre, zinc y manganeso disponible en Ultisoles, Vertisoles, Inceptisoles y Andisoles de Costa Rica. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 146 p.
- , 1998. Encalado para la corrección de la acidez del suelo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). San José, Costa Rica. 45 p.
- MOLINA E., BORNEMISZA E. 2001. Correlación entre métodos de análisis de Zn disponible en cuatro órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 25(2):65-72.
- MORTVEDT J.J. 1978. Micronutrient soil test correlation and interpretations. In: *Soil testing: correlating and interpreting the analytical results*. Ed. By Matthias Stelly. Madison, Wisconsin. ASA, pp. 99-117.
- PECK T.R., SOLTAMPOUR P.N. 1990. Testing soils for phosphorus. *In Testing soils and plant analysis*. 3 ed. By R.L. Westerman. SSSA Book Series 3, pp. 1-8.
- RHOMAN P.C., COX F.R. 1988. Evaluation of modified Olsen extracting reagent for cooper, zinc and manganese. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19:1859-1870.
- SÁNCHEZ P. 1981. Suelos del trópico: características y manejo. IICA, San José, Costa Rica. 634 p.
- SOLTAMPUR P.N. 1991. Determination of nutrient availability and elemental toxicity by AB-DTPA soil test and ICPS. *Advances in Soil Science* 16:165-190.
- SOTO J.A. 2001. Valores críticos de fósforo, potasio y azufre, y respuesta al nitrógeno para papa en la zona norte de Cartago. Resultados de investigación 1999-2000; difusión para agricultores. Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, Costa Rica. Plegable. 2 p.
- THE COUNCIL ON SOIL TESTING AND PLANT ANALYSIS (TCSTPA). 1980. Reference methods for soil testing. Athens, University of Georgia. 125 p. (Handbook).
- WAUGH D.L., CATE R.B., NELSON L.A. 1973. Modelos discontinuos para una rápida correlación, interpretación y utilización de los datos de análisis de suelos y las respuestas a los fertilizantes. ISFEIP, North Carolina State University, Raleigh. Boletín Técnico n.º 7.

Caso II.3.2. Manejo de nutrientes en pastos

Palabras clave: forrajes, pastos, fertilización de forrajes, fertilización de pastos, nutrición de forrajes, nutrición de pastos.

Keywords: pasture, grass, grasslands, fertilization of grasslands, nutrition of grasslands.

Justificación

Los costos de producción en las fincas ganaderas, tanto de leche, como de carne y doble propósito, se han elevado por el alto costo de las materias primas para la elaboración de los alimentos balanceados; por esta razón, se ha sugerido con insistencia en que la alimentación de los rumiantes se debe basar fundamentalmente en los forrajes. Para esto, se debe buscar el mejoramiento en productividad y calidad de los pastos, con el fin de aumentar y/o mantener la rentabilidad de la empresa ganadera.

En Costa Rica, la alimentación de los animales constituye un 60% del total de los gastos de operación del productor, y si el precio de los concentrados aumenta, el precio de venta del producto aumenta, contribuyendo al proceso inflacionario del país (Abarca y Madriz, 1999).

Una de las formas de abaratar los costos es haciendo uso intensivo de los pastos, mediante el mejoramiento de la producción de biomasa. Uno de los medios para lograr este objetivo es la fertilización, la cual, además de aumentar la producción de biomasa, mejora, aunque en una proporción menor, la calidad de los mismos y permite mantener hasta cierto punto las condiciones de fertilidad del suelo.

Los sistemas actuales de producción ganadera deben ser eficientes, rentables y sostenibles; constituyendo la base de este sistema, las fuentes de provisión de forraje. De la misma forma es muy importante realizar un inventario de potreros que informe de las condiciones particulares de estos, en cuanto a las características del suelo y de la planta, por ejemplo, su fertilidad, que da un índice del potencial de crecimiento de la pastura; claro, todo lo anterior relacionado con el medio ambiente, tiempo de pastoreo y tipo de pasto utilizado.

Generalidades

Al referirse a los tipos de pasto de importancia para la ganadería de Costa Rica, se puede hacer mención a tres grandes grupos de pasturas:

- Las que se utilizan en ganadería de leche especializada.
- Las que se manejan en ganadería de carne.
- Las que están en una zona de transición entre los dos primeros y que alojan a la mayor parte de la ganadería de doble propósito.

Existe gran variedad de especies forrajeras con potencial para producción de leche en zonas con alturas superiores a los 1800-1900 m s.n.m., aún así la ganadería establecida por encima de esta elevación se ha inclinado con el pasar de los años hacia la presencia del pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), que se encuentra en casi la totalidad de las fincas de lechería especializada de Costa Rica. La altura en que se presenta es desde los 1600 hasta los 2700 m s.n.m. a temperaturas que varían desde los 16 a los 21 °C, aproximadamente. Una de sus características más importantes es que resiste épocas de baja precipitación hasta de 750 mm (1 m^3) anuales y su rango de producción de materia seca varía de 22 a 50 t ha⁻¹ año⁻¹ (Araya, 1990; Rojas, 1999).

Otro de los forrajes utilizados es la Estrella africana (*Cynodon nlemfluensis*) que se desarrolla en alturas desde 0 hasta los 1600 m s.n.m., con temperaturas de 17 a 30 °C y con una producción promedio de materia seca de 25 ton ha⁻¹ año⁻¹ manejado a intervalos de cosecha de 21 a 28 días (Montiel et ál., 1990). Por otra parte, Rojas (1999) reporta rendimientos de Materia seca que varían de 25 a 50 t ha⁻¹ año⁻¹. El rango de altura a la cual se presenta este forraje le permite estar ubicado en dos de los tres sistemas de producción, siendo base fundamental en la alimentación de la ganadería de doble propósito y carne.

El Kikuyo y la Estrella africana son cultivos perennes, rastreros con estolones superficiales y subterráneos que dan frondosas ramificaciones, con raíces en la parte inferior de los nudos un tanto profundas y de color blanco (Montiel, 1983, UCLA, 1997).

Requisitos de suelo

En general, las propiedades físicas y químicas del suelo, y especialmente su fertilidad, afectan al rendimiento, la composición química (valor nutritivo en cierta medida) y la persistencia de los pastos. La topografía, la capacidad de retención de agua, el drenaje, la temperatura y algunos factores perjudiciales del suelo (elevado contenido de aluminio intercambiable, desbalance calcio/magnesio, pH, etc.) son los factores que determinan la especie de pasto más apropiada dentro de una zona ecológica determinada (Gutiérrez, 1996).

Dentro de los requisitos generales están los suelos fértiles para la obtención de altos rendimientos en biomasa, aunque las especies forrajeras son

medianamente tolerantes a la acidez alta presente en el suelo; por otra parte, estos suelos deben ser profundos para que las raíces puedan expandirse y acumular nutrientes que le permitan soportar épocas de sequía (figura 1). Además de lo anterior, cuando se utilizan plantas poco tolerantes al encharcamiento, se requiere de un buen drenaje del suelo que disminuya las posibilidades de estrés por exceso de agua (Lascano y Spain, 1991).

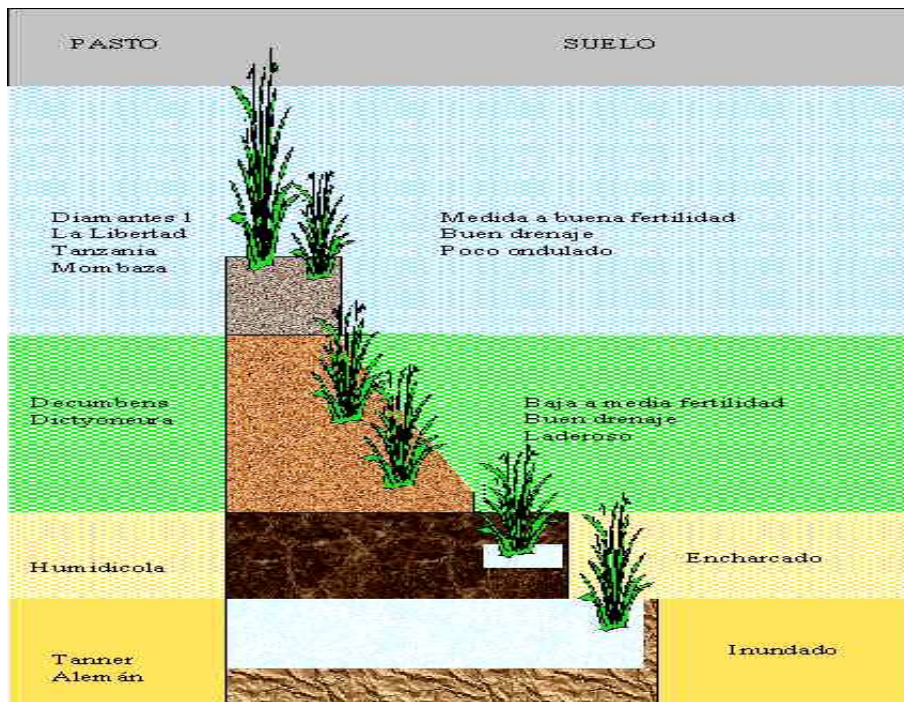


FIGURA 1. Condiciones aptas de crecimiento de las pasturas mejoradas en Costa Rica (Monge et ál., sin año)

Los suelos en los cuales se produce forraje para ganadería de leche en Costa Rica, son principalmente Andisoles, Inceptisoles y Ultisoles. En los Ultisoles se encuentran, normalmente, problemas de acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$), pH bajo ($<5,5$) y deficiencias de calcio y magnesio entre otros. Los Inceptisoles se consideran suelos con características intermedias, por lo que no se puede generalizar y es mejor referirse a cada caso por separado, aunque los problemas de acidez los encontramos en los Grandes Grupos Dystrudepts y Dystrusteps, y en Andisoles como los Haplustands, que poseen una fertilidad de moderada a baja, pH cercano o ligeramente superior a 5,5, así como una alta capacidad de fijación de P (Cabalceta, 1999). Para el caso de la ganadería de carne se pueden encontrar casi todos los órdenes de suelo presentes en el país, entre los que resaltan los

Inceptisoles, Alfisoles, Entisoles y los Vertisoles principalmente en la zona de Guanacaste, los cuales no presentan limitaciones nutricionales para el crecimiento del pasto sino problemas de tipo físico.

Los elementos que limitan más la productividad de los pastos, por presentar deficiencias más acentuadas, son el nitrógeno y el fósforo. Otros elementos que pueden también limitar la producción de pastos son el potasio, boro y zinc.

En términos de tierras, los suelos dedicados a la producción de pastos se consideran como aquellos que no poseen una vocación agrícola ni forestal. Por esta razón, estos terrenos deberían ocupar tierras de clase IV, V o VI, en los cuales se presentan serias limitaciones para el desarrollo de actividades agrícolas, pero no son tan «malos» como para destinarlos a cobertura forestal (Alvarado y Salas, 1997).

La compactación del suelo influye en el desarrollo del sistema radicular. Se ha demostrado que una planta no puede alcanzar su desarrollo y producción máxima si no tiene suficiente espacio o volumen de suelo para desarrollar sus raíces, aun cuando actúen en forma óptima todos los demás factores ambientales que influyen sobre el crecimiento de la pastura (Agüero y Alvarado, 1983). En este sentido, es importante conocer la profundidad efectiva, la cual se define como el espesor de suelo que exploran las raíces, ya que esta determina la capacidad de reserva de agua y el suministro de elementos para la nutrición del forraje. Esta profundidad efectiva la determinan principalmente: el nivel freático y la presencia de capas compactadas; ambos considerados en relación con la superficie del suelo. Por lo tanto, la adecuada selección del área para pastizales, así como el manejo de la carga animal, son dos aspectos importantes de considerar (Alvarado y Salas, 1998).

Aspectos generales de la nutrición de forrajes

A. Nutrimentos

1. Nitrógeno

Es el principal elemento que limita el crecimiento de las plantas forrajeras y cualquier planta en general. Las pasturas toman el nitrógeno del suelo, mayormente en forma de nitratos (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) (Fageria et ál., 1997). Posee mucha importancia en la producción de materia seca e influye en la calidad de los pastos, al intervenir en el contenido de proteína cruda y digestibilidad.

La disponibilidad de nitrógeno tiene su efecto sobre la composición botánica de la pradera. Las gramíneas, por ejemplo, utilizan el nitrógeno con más eficiencia, lo que en la mayoría de los casos las hacen ser las especies dominantes. En las pasturas de gramíneas/leguminosas, el contenido de nitrógeno en el suelo

controla el equilibrio de la mezcla y en suelos de baja disponibilidad de nitrógeno, la gramínea depende de la leguminosa para su crecimiento, lo que permite tener un equilibrio a la pastura. En pastoreo intensivo y en regiones de altas temperaturas aún cuando el contenido de nitrógeno es bajo en el suelo, la alta mineralización de la materia orgánica suministra una cierta cantidad de nitrógeno, por lo que la gramínea tiende a dominar en la mezcla. En efecto, las gramíneas generalmente son más aptas para obtener iones monovalentes (N, K, etc.) que las leguminosas; este efecto del nitrógeno es todavía más evidente cuando se fertiliza y la leguminosa puede desaparecer por completo (Alvarado y Salas, 1998).

El nitrógeno es el componente fundamental de todas las moléculas orgánicas involucradas en los procesos de crecimiento y desarrollo vegetal: aminoácidos (proteínas estructurales y enzimas), ácidos nucleicos, clorofila, citocromos, coenzimas, hormonas, y otros compuestos nitrogenados (ureidos, amidas, alcaloides, etc.). Por esta razón, participa en los principales procesos metabólicos: fotosíntesis, respiración y síntesis proteica.

Las plantas con una adecuada provisión de nitrógeno desarrollan un exuberante follaje de color verde intenso producto de la gran actividad fotosintética que se realiza en ellas. Es un elemento de gran movilidad en el tejido vegetal, produciéndose movimientos masivos hacia los puntos de crecimiento de las plantas. En caso de deficiencia ocurren amarillamientos o clorosis de las hojas debido a la presencia de cantidades reducidas de clorofila, que se inicia en las hojas más viejas y según la intensidad puede ascender y generalizarse. El pigmento verde de la clorofila absorbe la energía de la luz necesaria para iniciar la fotosíntesis; la clorofila ayuda a convertir el carbono (C), el hidrógeno (H) y el oxígeno (O) en azúcares simples, los cuales junto con los productos de su transformación, son usados para el crecimiento y desarrollo de la planta. En algunas plantas puede observarse una coloración púrpura en los pecíolos y nervios de las hojas, debido a la formación de pigmentos antociánicos. Plantas pequeñas y de crecimiento lento son también síntomas de deficiencia de N (Bertsch, 1995, Instituto de la Potasa y el Fósforo, 1997).

El nitrógeno influye sobre el crecimiento de los pastos ya que facilita la formación y desarrollo de nuevos brotes, aumenta el número de hojas por planta y con ello el área foliar, por lo que en exceso propicia que se vuelquen, aumenta la susceptibilidad a plagas y enfermedades, y alarga el ciclo vegetativo. El contenido de nitrógeno fluctúa notablemente y depende de su disponibilidad en el suelo, de la especie y edad del pasto, época del año, etc.

La descomposición de la materia orgánica provee más del 90% del N nativo en el suelo, sin embargo, la mayoría de los suelos posee generalmente menos de 2%. La materia orgánica contiene aproximadamente 5% de N, pero solamente alrededor del 2% de la materia orgánica se descompone cada año y a menudo

menos. Cada porcentaje de materia orgánica libera únicamente de 10 a 40 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, cantidad insuficiente para cubrir las necesidades de los cultivos. Además las cantidades liberadas son afectadas por las prácticas de manejo. El proceso de mineralización o descomposición es afectado por: pH, temperatura, aireación, humedad, adición de materiales orgánicos, relación C/N, presencia de taninos, mineralogía de arcillas y hasta manejo. En los trópicos la temperatura pocas veces es limitante, y quizás el factor dominante que afecta las tasas de mineralización del N es el contenido de humedad en el suelo.

Otra forma de ingreso de N al suelo o a la planta es por el proceso de fijación. Este se da cuando el N atmosférico (N_2) se combina con H_2 u O_2 . Puede ocurrir de varias formas:

a) *Fijación biológica*, que puede ser simbiótica o no simbiótica. La fijación simbiótica de N se refiere al trabajo de las bacterias que fijan N mientras crecen en asociación benéfica (para ambos) con una planta huésped, el ejemplo más conocido es la bacteria *Rhizobium* y las raíces de las leguminosas; las bacterias forman nódulos en las raíces, donde fijan el N de la atmósfera y lo hacen disponible para la leguminosa. Por su parte, las leguminosas entregan carbohidratos que proveen la energía necesaria para que las bacterias fijen N. Se han estimado cantidades fijadas de 220, 200, 120 y 45 kg $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ en alfalfa, trébol ladino, trébol blanco y maní, respectivamente. La fijación no simbiótica, que se lleva a cabo mediante bacterias que viven libremente en el suelo. La cantidad fijada por estos organismos es mucho menor y se estima un máximo de 20 kg $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$.

b) *Oxidación natural*, que ocurre cuando el calor generado por los rayos en una tormenta, permite que el O_2 reaccione con el N_2 que se encuentra en el aire, formando NO_3^- . La lluvia y la nieve aportan aproximadamente de 5 a 10 kg $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$.

c) *Fijación industrial*, que fija el N_2 con H_2 para formar NH_3 (amoníaco anhidro). El H_2 se obtiene generalmente de gas natural y el N_2 proviene directamente del aire. El NH_3 producido es la fuente principal para la fabricación de otros fertilizantes nitrogenados.

Según la forma en que el N está presente en los fertilizantes, se distinguen 4 tipos de fuentes:

a) Nítricos: nitrato de calcio (15% N, 19,4% Ca y 1,5% Mg) y nitrato de potasio (13% N y 44% K).

b) Amoniacaes: sulfato de amonio (21% N y 23,7% S), fosfato monoamónico o MAP (11% N y 48% P_2O_5), fosfato diamónico o DAP (16% N y 48% de P_2O_5) y fosfato de amonio y sulfato (16% N, 20% P_2O_5 y 15% S).

c) Nítrico-amoniacales: nitrato de amonio (33,5% N), nitrato de amonio calcáreo o calnitro (20,5% N, 7% MgO y 7% Ca) y nitrosulfato de amonio (26% N y 15% S).

d) Amidas: urea (46% N) y cianamida de calcio (21% N y 38,5% Ca).

2. Fósforo

Puede considerarse el segundo nutrimento en importancia en el crecimiento de las plantas en general. Su absorción ocurre en forma de ion H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} . Se traslada rápidamente en los tejidos vegetales y su movilización va de aquellos tejidos más viejos a las zonas más jóvenes de las plantas, por lo que su deficiencia se presenta primero en hojas más viejas (Bertsch, 1995, Instituto de la Potasa y el Fósforo, 1997).

Interviene como factor clave en una serie de procesos metabólicos de las células vivas, regulando varios procesos enzimáticos. Es importante en la floración, fructificación, producción y calidad de semillas. También promueve el desarrollo radical, sobre todo de las raíces laterales, aumenta el número de renuevos, evita el vuelco de las plantas, aumenta el tenor de carbohidratos, aceites, grasas y proteínas, aumenta la resistencia a enfermedades y participa en la fijación simbiótica del N. El P es constituyente de muchos compuestos esenciales en las plantas como ácidos nucleicos, azúcares fosforilados, las nucleoproteínas, enzimas, de las coenzimas NAD y NADP, vitaminas, fosfolípidos, fitina y una de sus funciones principales está relacionada con los procesos energéticos dentro de la planta, por formar parte de la molécula de transportadora de energía ATP (Bertsch 1995).

El primer síntoma de que falta fósforo es una planta pequeña y la hoja se distorsiona. Cuando la deficiencia es severa se desarrollan áreas muertas en la hoja, fruto y el tallo. Las hojas viejas se afectan antes que las nuevas por la gran movilidad del elemento. Un color rojizo o púrpura, o también verde oscuro azulado, asociado con acumulación de azúcares aparece a menudo.

La roca fosfórica es el material básico usado en la producción de los fertilizantes fosfatados, que contiene alrededor de 33% de P_2O_5 y 33% de Ca. Esta se trata con ácidos (sulfúrico y fosfórico). Los principales fertilizantes son: superfosfato simple o normal (SFS) que contiene 20% de P_2O_5 , 20% de Ca y 12% de S, superfosfato triple (SFT) o superfosfato concentrado (SFC) con 46% de P_2O_5 y 13% de Ca, fosfato monoamónico (MAP) con 11% de N y 48% de P_2O_5 , fosfato diamónico (DAP) con 18% de N y 46% de P_2O_5 , fosfato diamónico saturado con 21% N y 53% P_2O_5 , y fosfato de amonio-sulfato con 16% N, 20% P_2O_5 y 15% S.

Este elemento no presenta compuestos que puedan ser volatilizados o lixiviados (como los nitrogenados), lo que provoca una gran estabilidad como resultado de su baja solubilidad, debido a una muy alta capacidad de los suelos tropicales de fijarlo, lo que causa deficiencias en la disponibilidad de P por las plantas, a pesar de la continua mineralización de compuestos orgánicos del suelo.

De los elementos mayores (N, P, K) el P es requerido por las plantas en cantidades menores, pero se acostumbra a aplicarlo en grandes cantidades porque se fija en el suelo y no porque las plantas absorban mucho.

El balance del P disponible para las plantas se puede describir esquemáticamente de la siguiente forma:

- a) Pérdidas: en la cosecha que sale de la finca, escorrentía superficial y erosión del suelo.
- b) Ganancias: fertilizantes fosfatados, meteorización muy lenta de los minerales primarios.
- c) Redistribuciones: desechos animales y humanos, residuos de cultivos.

El suelo debe liberar diariamente una cierta cantidad de P para satisfacer las necesidades de las plantas en su ciclo y si no puede aportar esta demanda el rendimiento final del cultivo disminuye. El P es bastante insoluble en el suelo y por esta razón apreciable cantidad de P nativo y aplicado como fertilizante se localiza lejos de la raíz para ser absorbido, lo que ocasiona una recuperación del 5 al 30% de P aplicado en el primer año.

El análisis de laboratorio para determinar P en el suelo predice bien la probabilidad de obtener un rendimiento con la aplicación de P, como también la respuesta promedio a largo plazo, pero no predice bien la cantidad de P que debe aplicarse para obtener un determinado rendimiento en un año. Sin embargo, en promedio existe buena relación entre el nivel de P en el suelo y el rendimiento relativo promedio al estimarse en una curva de regresión. Si enfocamos los análisis a largo plazo, se involucra el efecto residual de la fertilización fosfatada: hay que empezar por identificar el nivel inicial de P en el suelo (para cada lote y cultivo) e irlo calibrando; si el contenido está por debajo de lo óptimo las dosis que se deben aplicar deben ser mayores a las cantidades removidas del campo, si está o se ha llevado a un nivel óptimo se agregan dosis de mantenimiento o lo que se remueve en la cosecha, y si el análisis llega a niveles más altos que el óptimo, se puede o existe la opción de aplicar menores cantidades de P que aquellas removidas por la cosecha.

Al momento no existe un sustituto del análisis de suelos para predecir respuesta a la aplicación de P. Si las cantidades de P son bajas existe más de un 80% de probabilidades de obtener respuesta económica a la aplicación del nutrimento y si el análisis indica un contenido muy alto, la probabilidad de una

respuesta económica es menor del 20%. Pero existen otros factores que afectan a la respuesta de los cultivos a la aplicación de P como son la variabilidad del contenido de P dentro del campo, condiciones de drenaje, compactación del suelo, colocación del P en el suelo, inundación del suelo, variedades e híbridos utilizados, salinidad del suelo, contenido de aluminio y hierro, y una nutrición balanceada. El plan de manejo de P debe ser dinámico, evolucionando a medida que se conoce más de las necesidades particulares de los suelos en cada lote, los requerimientos de los cultivos y las prácticas empleadas.

3. Potasio

Es absorbido en forma de ión K^+ , en cantidades a veces mayores que cualquier otro elemento mineral. Es probablemente el elemento más móvil en la planta, siendo trasladado a los tejidos meristemáticos cuando se presenta deficiente en el tejido vegetal. Su función es de naturaleza catalítica; imprescindible en el metabolismo de carbohidratos, formación, transformación y traslado de almidones; metabolismo del nitrógeno y síntesis de proteína; controla y regula la actividad de otros elementos esenciales. Interviene muy activamente en la regulación osmótica e hídrica de la planta, en el mantenimiento de la electroneutralidad celular y en la permeabilidad de las membranas. Está involucrado muy directamente en el transporte de azúcares vía floema (Fageria et ál., 1997). También estimula el llenado de granos, mejora la calidad de los productos, evita los efectos severos de la sequía y de las heladas, aumenta la resistencia a enfermedades y plagas, reduce la caída de plantas y ayuda a la fijación simbiótica del N (Bertsch, 1995).

Muchos trabajos han demostrado que el K juega un papel fundamental en la reducción de la incidencia de *Helminthosporium sp.* y *Sclerotinia sp.* en pastos.

Los síntomas de deficiencia del K aparecen de muchas formas. Uno de los síntomas más comunes de carencia de K es el marchitamiento o quemado de los márgenes de las hojas, que aparece primero como un moteado de manchas cloróticas, seguido por el desarrollo de zonas necróticas en la punta y borde de las hojas. Por la alta movilidad del K estos síntomas suelen darse primero en las hojas maduras. En general, se produce en la planta un aspecto achaparrado debido al acortamiento entre nudos.

Las fuentes de K más comunes son: cloruro de potasio (KCl) o muriato de potasio (MOP) que es la más usada en el mundo (60-62% K_2O), sulfato de potasio (K_2SO_4) o sulfato de potasa (SOP) que contiene 50% de K_2O y 18% de S, sulfato de potasio y magnesio ($K_2SO_4 - 2 MgSO_4$, llamado también sul-Po-Mag y K-Mag) que contiene 22% de K_2O , 11% Mg y 22% de S y nitrato de potasio (KNO_3) con aproximadamente 44% de K_2O y 13% de N.

Es importante resaltar que al aplicar más nitrógeno en los forrajes y aumentarse los rendimientos, también se incrementa la extracción de K; debe indicarse que los pastos extraen mayores cantidades de K del suelo que de N. Además, el uso de altas cantidades de N incrementa el rendimiento, da color verde y mejora el contenido de proteínas, y el K se muestra menos por lo que se tiende a olvidarlo.

4. Calcio

Es el nutrimento mineral más importante de las paredes celulares, convirtiéndose en el factor mayormente determinante en la organización estructural y de fortaleza de la planta. Es absorbido como Ca^{2+} . Su función es darle rigidez e impermeabilidad a la planta, además de favorecer el desarrollo de raíces y de hojas, intervenir en la mitosis, división y elongación celular, en la síntesis de proteínas, la transferencia de carbohidratos, ayuda a desintoxicar la planta de metales pesados y como activador en varios sistemas de enzimas. Se relaciona con la nodulación y la fijación de N (Instituto de la Potasa y el Fósforo, 1997, Bertsch, 1995). Por otra parte este elemento tiende a aumentar su concentración conforme el pasto madura y también durante la época seca.

Un síntoma común de la deficiencia de Ca es un pobre crecimiento de las raíces, se tornan negras y se pudren. Las hojas jóvenes y otros tejidos nuevos desarrollan los síntomas debido a que el Ca no se traslada bien dentro de la planta. Los tejidos nuevos necesitan Ca para la formación de sus paredes celulares, por lo tanto su deficiencia causa que los filos de las hojas y puntos de crecimiento sean gelatinosos y adquieran forma de gancho o de cuchara en las puntas de las hojas. Los bordes de las hojas jóvenes muestran una clorosis seguida de necrosis.

Si se considera que la mayoría de los suelos que tienen deficiencias de Ca son ácidos, un buen programa de encalado lo incrementará. El carbonato de calcio (40% Ca) y dolomita (21% Ca) son excelentes fuentes. El yeso (sulfato de calcio) se puede utilizar cuando el pH del suelo sea lo suficientemente alto como para no necesitar cal, pero al mismo tiempo sea deficiente en Ca (este caso es poco común). Otras fuentes son: superfosfato simple (20% Ca), superfosfato triple (13% Ca) y la roca fosfórica (33% Ca). Se debe tener precaución cuando se añaden grandes cantidades de Ca y Mg a suelos deficientes en K, o al añadir Ca a suelos deficientes en Mg, debido a que pueden causar desbalance nutricional y un pobre crecimiento del cultivo (Molina, 1998).

5. Magnesio

Es el átomo central de la molécula de clorofila, de allí su importancia en el proceso de fotosíntesis. El Mg y el N son los únicos nutrimentos provenientes del suelo que son parte de la clorofila, y por esta razón la mayoría de Mg en las

plantas se encuentra en este compuesto. Se absorbe como ión Mg^{2+} . Interviene en la síntesis de proteínas y como activador de muchas enzimas, especialmente en reacciones de fosforilación del ATP en el metabolismo de los azúcares. Entre los efectos del Mg en las plantas están: producción del color verde y ayuda en la absorción de P (Bertsch, 1995). El magnesio ha adquirido relevancia en el sistema animal-planta, por cuanto su deficiencia en los forrajes es causa de la «tetania de los pastos», mal que afecta al ganado debido a la poca o ninguna presencia del elemento en la pastura (<0,2%) (Kubota et ál., 1980).

Los síntomas de deficiencia de Mg aparecen primero en las hojas inferiores (hojas viejas), debido a que se trastoca dentro de la planta de tejido viejo a tejido joven. Las hojas presentan un color amarillento (clorosis) intervenal (venas permanecen verdes). En el maíz se presentan fajas amarillas a lo largo de las hojas, mientras que las venas se mantienen verdes. La deficiencia de Mg se puede acentuar en suelos de baja CIC y encalados con calcita, con aplicaciones de altas dosis de K o por una alta disponibilidad de amonio, en suelos con bajos niveles de Mg. La fuente más común de Mg es la dolomita (3-12% Mg), que además aporta Ca y al mismo tiempo neutraliza la acidez del suelo. Otras fuentes son: sulfato de potasio y magnesio (11% Mg), sulfato de magnesio (9-20% Mg), cloruro de magnesio (7,5% Mg), óxido de magnesio (55-60% Mg) y escorias básicas (3% Mg).

6. Azufre

Es componente de aminoácidos esenciales como metionina, cistina y cisteína. Participa en la síntesis de clorofila y la formación de varias vitaminas como la biotina, glutaniona y coenzima A, además de glucósidos que son componentes de aceites esenciales que originan el olor a plantas como liliáceas y crucíferas. El S causa los siguientes efectos en las plantas: aumenta el crecimiento vegetativo y fructificación, estimula el crecimiento de raíz, propicia la formación de semilla y aumenta el tenor de carbohidratos, aceites, grasas y proteínas (Bertsch, 1995, Fageria et ál., 1997).

Las plantas que tienen deficiencias de S presentan un color verde pálido en las hojas más jóvenes y cuando es más severa, toda la planta presenta el color verde pálido y crecimiento lento. Las hojas se arrugan a medida que la deficiencia progresa y en algunas especies, se pueden producir pigmentos antociánicos. El S al igual que el N, es un componente de las proteínas, por lo tanto, los síntomas de deficiencia son similares a los del N. Los síntomas de deficiencia de N son más severos en las hojas viejas, debido a que el N es un nutrimento móvil que se trastoca de tejido viejo hacia lugares de crecimiento nuevo en la planta. El S en cambio es inmóvil en la planta, por lo tanto, si existe deficiencia, esta aparece primero en las hojas nuevas. Esta diferencia en sintomatología es importante

cuando se quiere distinguir cuál de los dos nutrimentos es limitante, particularmente en etapas tempranas de la deficiencia.

El N y el S se relacionan también, por el hecho de que el S juega un papel importante en la activación de la enzima nitrato reductasa, necesaria para la conversión de NO_3^- a aminoácidos en las plantas. Una baja de esta enzima reduce los niveles de proteínas solubles, a la vez que incrementa la concentración de NO_3^- en los tejidos de las plantas. El NO_3^- acumulado puede también ser tóxico para los animales que consumen forraje con deficiencia de S. Niveles adecuados de S mejoran la utilización de Mg por parte de los rumiantes al reducir los niveles de N no proteico (NO_3^-) en los forrajes.

En Guatemala, Gutiérrez (1996), reporta respuesta a la aplicación de azufre en ciertos casos, muy semejante a la obtenida en una aplicación de nitrógeno, por lo que es importante considerarlo siempre en un programa de fertilización. Muchas veces no se toma en cuenta ya que en la aplicación de fertilizantes nitrogenados, fosfóricos y potásicos, como el Sulfato de amonio, superfosfato simple y sulfato de potasio o sulfato de calcio, se incluye este elemento.

7. Manganeso

Es activador enzimático en la respiración y en el metabolismo del N (activando las reductasas). Participa también en la síntesis proteica y formación de ácido ascórbico (vitamina C). En la fotosíntesis participa solo en la fase oscura y ayuda a la planta a sintetizar clorofila. El Mn acelera la germinación y la maduración de las plantas e incrementa la disponibilidad de P y Ca. Además, es capaz de destruir u oxidar el AIA (Bertsch, 1995).

Debido a que el Mn no se traslada adecuadamente en la planta, los síntomas de deficiencia aparecen primero en las hojas jóvenes como un amarillamiento entre las venas, y en algunas ocasiones aparecen una serie de puntos de color café oscuro o manchas necróticas en las hojas. Se han reportado casos de síntomas que han aparecido primero en las hojas viejas.

La humedad del suelo también afecta la disponibilidad de Mn. Los síntomas de deficiencia son más severos en suelos con altos contenidos de materia orgánica, durante los períodos en los cuales el suelo está saturado. Los síntomas desaparecen a medida que el suelo se seca y se incrementa la temperatura. Estas condiciones pueden ser el resultado de una menor actividad microbiana en suelos fríos y húmedos. El pH de estos suelos también es más alto durante el invierno y esto reduce la disponibilidad de Mn.

Generalmente las deficiencias de Mn se relacionan con un pH alto del suelo o con alto contenido de materia orgánica. Cuando el nivel del elemento es alto en el suelo y su pH es ácido, puede causar toxicidad hasta pH de 5,8, por lo que el encalado elimina este problema, al aumentar el pH a 6,0. También se pueden

agregar sales solubles, como sulfato de Mn, con el fertilizante aplicado antes de la siembra al voleo o en banda, o una aplicación inicial de P ayuda a movilizar el Mn a la planta. La deficiencia en el campo se puede corregir con una aplicación foliar de $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de MnSO_4 . Fuentes comunes de Mn son: sulfato de manganeso (26-30,5% Mn), óxido de manganeso (41-68% Mn), quelato de manganeso (12% Mn, según marca comercial), carbonato de manganeso (31% Mn), cloruro de manganeso (17% de Mn).

8. Zinc

Es el micronutriente que con más frecuencia limita los rendimientos de los cultivos. Actúa como activador de varias enzimas como la anhidrasa carbónica (convierte el ácido ascórbico en CO_2 y H_2O) y la deshidrogenasa alcohólica, así como de enzimas transportadoras de fosfatos. Es necesario para la producción de clorofila y carbohidratos. Interviene en la síntesis de la hormona de crecimiento AIA (a través del trifófono) y síntesis proteica (Bertsch, 1995).

El Zn no se traslada en la planta, por lo tanto, los síntomas de deficiencias aparecen primero en las hojas nuevas y otras partes jóvenes de la planta. La deficiencia en maíz hace que el ápice se torne amarillento claro o blanco en las etapas iniciales de crecimiento de la planta. Las hojas desarrollan franjas de color amarillento (clorosis) localizadas a un lado o a ambos lados de la nervadura central. En otras plantas, se produce un retardo en el crecimiento que se manifiesta en forma de hojas más pequeñas con clorosis intervenal y entrenudos más cortos. Un aspecto irregular de las hojas es el síntoma más fácil de reconocer. La planta entera adquiere un aspecto de roseta.

Para corregir las deficiencias de Zn se aplican de 1 a $10 \text{ kg de Zn ha}^{-1}$, dependiendo de los niveles del nutriente en el suelo. Posee un efecto residual excelente y aplicaciones altas pueden ser suficientes por 3 o 4 años. También las aplicaciones foliares son excelentes en condiciones de pH alto, o una situación de emergencia en un cultivo establecido. Las aplicaciones foliares varían de 0,5 a $1,0 \text{ kg de Zn ha}^{-1}$. Las fuentes más comunes de Zn son: sulfato de zinc hidratado (23-36% Zn), óxido de zinc (78% Zn), sulfato de zinc básico (55% Zn), complejos amonio-zinc (10% Zn), quelato de zinc (9-14% Zn) y fuentes orgánicas (5-10% Zn).

La disponibilidad de Zn varía por influencia de varios factores:

a) pH del suelo: el Zn es menos disponible a medida que el pH sube. Suelos encalados con un pH mayor de 6,0 pueden desarrollar deficiencias de Zn, pero no es generalizado. La concentración de Zn en el suelo se reduce 30 veces por cada unidad de incremento en pH entre 5,0 y 7,0.

b) Alta cantidad de P en el suelo: existe una interacción Zn-P a pH altos. La aplicación de uno u otro en un suelo marginal puede inducir una deficiencia del

otro. El aplicar P en un suelo con niveles adecuados de Zn no produce deficiencias de Zn. Sin embargo se recomienda, para obtener rendimientos altos, aplicaciones de 1 kg de Zn por cada 20 kg de fosfato.

c) Materia orgánica: altas cantidades de materia orgánica puede fijar al Zn. También los microorganismos pueden inmovilizarlo temporalmente en sus cuerpos al ingerirlos. Niveles bajos de materia orgánica son indicativos de una baja disponibilidad de Zn.

d) Irrigación: cuando se nivela el suelo, el Zn puede volverse deficiente, ya que esta operación remueve la materia orgánica, compacta el suelo y expone capas inferiores.

e) Actividad biológica del suelo: un efecto benéfico es el hongo en el suelo, denominado micorriza, que forma una relación simbiótica con las raíces de las plantas y les ayuda a absorber Zn.

f) Suelos fríos y húmedos: las deficiencias de Zn ocurren temprano en el ciclo de crecimiento, en suelos fríos y húmedos. En estas condiciones el crecimiento radicular es lento y las raíces no pueden absorber suficiente Zn.

9. Cobre

Es necesario para la formación de clorofila. Forma parte de enzimas fenolasas, lactasas y de la oxidasa del ácido ascórbico, como de proteínas presentes en el cloroplasto, por lo que participa en la fotosíntesis. Interviene en la formación de vitamina A. Actúa como conductor electrónico en la actividad respiratoria. Está implicado en la biosíntesis de ligninas.

Su deficiencia suele provocar una necrosis en el ápice de las hojas jóvenes que progresa a lo largo del margen de la hoja, enrollando los bordes. Las hojas pueden presentar clorosis y puede producirse la muerte de los brotes jóvenes (Bertsch, 1995). En otros cultivos provoca la muerte descendente (cítricos) y rajado (cebolla y algunas hortalizas). Los suelos orgánicos son los más propensos a las deficiencias de Cu, ya que aunque contienen cantidades adecuadas del elemento, lo retienen fuertemente. Los suelos arenosos, bajos en materia orgánica, también pueden llegar a ser deficientes, debido a pérdidas por lixiviación. Los suelos arcillosos, son los que menos probabilidades tienen de desarrollar la deficiencia.

Las fuentes más comunes de Cu son: sulfato de cobre (22,5-24% Cu), fosfato amonio-cobre (30% Cu) y quelatos de cobre (variable).

10. Hierro

Participa como activador enzimático en la síntesis de clorofila. Interviene en síntesis de algunas proteínas. Es componente de algunas metaloflavoproteínas que

intervienen en diferentes oxidaciones y reducciones biológicas, y de algunas proteínas ferroporfirínicas como citocromos y la leghemoglobina (Bertsch, 1995).

La deficiencia de Fe aparece en las hojas como un color verde pálido (clorosis), mientras que las venas permanecen verdes, desarrollando un agudo contraste, en las hojas jóvenes (por su inmovilidad en la planta). Una deficiencia severa puede dar a toda la planta un color amarillento a blanquecino. Entre los factores que pueden promover la deficiencia están: desbalance con otros metales como Mo, Cu o Mn, exceso de P en el suelo, niveles bajos de materia orgánica en el suelo y una combinación de un pH alto, dosis altas de cal, altos niveles de bicarbonatos, y suelo húmedo y frío. Para controlar la deficiencia, el mejor método es vía foliar, debido a que el Fe aplicado al suelo pasa rápidamente a formas no disponibles (Instituto de la Potasa y el Fósforo, 1997).

Las fuentes de Fe son: sulfato de hierro (19-23% Fe), óxido de hierro (69-73% Fe), sulfato de amonio-hierro (14% Fe), polisulfato de amonio-hierro (22% Fe) y quelatos (5-14% Fe).

11. Boro

Su papel específico no es muy claro, pero participa en el transporte de azúcares al formar complejos con los O_2 y OH presentes en ellos, reduciendo su polaridad y facilitando su paso por las membranas. Participa en la diferenciación y desarrollo celular, en el metabolismo del N, en la absorción de sales, en el metabolismo hormonal, en las relaciones hídricas, en el metabolismo lipídico y de ligninas, en el metabolismo del P y en la fotosíntesis. Es esencial para la germinación de los granos de polen, el crecimiento del tubo polínico y para la formación de semillas y paredes celulares.

Su deficiencia generalmente detiene el crecimiento de la planta, siendo los tejidos apicales y las hojas más jóvenes los que primero dejan de crecer, formando una roseta de color amarillento y luego mueren; esto indica que el B no se traslada fácilmente (Bertsch, 1995).

El rango entre deficiencia y toxicidad al B es muy estrecho, más estrecho que cualquier otro nutrimento esencial, por lo que debe utilizarse con mucho cuidado. Dosis de hasta 3 kg B ha^{-1} se pueden utilizar en cultivos con buena respuesta a su aplicación y en cultivos de respuesta baja a media, de $0,5$ a $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$ (Instituto de la Potasa y el Fósforo, 1997).

Fuentes comunes de boro son las siguientes: bórax (11,3% B), ácido bórico (17% B), pentaborato de sodio (18% B), tetraborato de sodio (borato 46, con 14% B y borato 65, con 20% B), colemanita (10% B, posee baja solubilidad), solubor (20% B) y superfosfato simple boratado (0,18% B).

12. Molibdeno

La planta lo requiere para sintetizar y activar la enzima nitrato reductasa, la cual reduce el nitrato a amonio dentro de la planta. El Mo es vital para el proceso de fijación simbiótica de N, llevada a cabo por la bacteria *Rhizobium* en los nódulos de las raíces de las leguminosas. Es necesario para convertir el P inorgánico a su forma orgánica en la planta. También se postula su participación en la absorción y transporte de Fe, y está relacionado con los niveles del ácido ascórbico que sirven para proteger el cloroplasto (Instituto de la Potasa y el Fósforo, 1997, Bertsch, 1995).

Los síntomas de deficiencia de Mo se presentan como un moteado clorótico intervenal de las hojas inferiores, seguido por una necrosis marginal. Las hojas pueden llegar a secarse por completo. La floración se inhibe, o si llegan a formar flores, estas se desprenden antes de producir fruto. Su deficiencia promueve la aparición de síntomas de deficiencia de N en leguminosas como soya y alfalfa, debido a que su carencia no permite que fijen N del aire. El Mo se hace más disponible a medida que el pH del suelo aumenta (opuesto a la mayoría de los otros micronutrientes), por lo tanto, su deficiencia ocurre comúnmente en suelos ácidos y el encalado la corrige si el suelo posee suficiente cantidad de este nutriente. También, aplicaciones altas de P incrementan la absorción de Mo por la planta, mientras que altas aplicaciones de S reducen su absorción. Un exceso de Mo es tóxico, especialmente para animales en pastoreo. El ganado que consume forraje con exceso de Mo puede desarrollar diarrea. El metabolismo del Cu también se afecta y el ganado que consume pasto de bajo contenido de Mo puede desarrollar toxicidad de Cu, si los niveles de Cu son lo suficientemente altos. Por otro lado, los animales que comen pasto con alto contenido de Mo pueden desarrollar deficiencia de Cu y desarrollar la enfermedad conocida como «molibdenosis». Esta enfermedad se puede corregir mediante el suministro de sulfato de cobre (CuSO_4) en forma oral, mediante inyección de medicinas que contengan Cu o aplicando CuSO_4 directamente al suelo (Instituto de la Potasa y el Fósforo, 1997).

Fuentes comunes de molibdeno son: molibdato de amonio (54 Mo), molibdato de sodio (39-41% Mo) y ácido molibdico (47,5% Mo, ligeramente soluble).

13. Cloro

Está involucrado en las reacciones energéticas de la planta, específicamente en la descomposición química del agua en presencia de la luz solar (estimula la fase luminosa de la fotosíntesis), y en la activación de varios sistemas enzimáticos. También se relaciona con el transporte de cationes dentro de la planta (K, Ca, Mg) que regulan la apertura y cierre de las células guardianes de

los estomas, controlando así la pérdida de agua, el estrés de humedad y manteniendo la turgencia (Instituto de la Potasa y el Fósforo, 1997).

El cloro reduce el efecto de las enfermedades en las raíces causadas por hongos en cereales de grano pequeño, como también la incidencia de la pudrición del tallo en el maíz. Se especula que el cloro compite con la absorción de nitratos, esto promueve el uso de amonio por las plantas. Altas concentraciones de nitratos por las plantas han sido relacionadas con la severidad de las enfermedades fungosas. El coco y la palma de aceite son particularmente sensibles a la deficiencia de este nutrimento.

Aproximadamente 60 kg de Cl ha⁻¹ parecen ser adecuados para obtener rendimientos óptimos en cereales de grano pequeño. La fuente más común es el cloruro de sodio (47% Cl). El cloruro de amonio (52% Cl) y el cloruro de magnesio (74% Cl) son también fuentes disponibles. El Cl es altamente móvil en el suelo y debe manejarse de acuerdo a esta característica.

El cloro puede tener efectos negativos en cultivos como el tabaco, algunas variedades de soya, papas y ciertos frutales (uva). Los efectos varían con las variedades.

B. Nutrición de pasturas

La rentabilidad de la empresa ganadera en Costa Rica ha permitido que el uso de fertilizantes y enmiendas se limite a los sectores más productores de esta actividad como es el caso de la empresa de leche. En ella, se maneja un programa definido de aplicaciones de fuentes fertilizantes como complemento a la extracción de nutrientes realizada por el pasto y transportada en la leche y/o la carne.

Ante este movimiento de los nutrientes del suelo, Pezo (1997) propone una serie de factores que influyen sobre el uso de fertilizantes en pasturas:

Intensidad del sistema y potencial de retorno económico, los cuales a su vez son función de:

- Tipo y calidad de animales
- Precio del producto animal
- Costo de los fertilizantes
- Nivel tecnológico aplicado
- Capacidad de manejo del operador
- Especies forrajeras presentes en la pastura
- Nivel de fertilidad del suelo (Contenido y disponibilidad de nutrientes)

- Nivel de extracción de nutrientes, el cual es, a su vez, función de:
 - o Especie forrajera
 - o Tipo de sistema de uso de forraje
 - o Sistema de producción animal (Intensidad)
 - o Productividad del sistema
- Pérdidas de nutrientes del sistema

C. Estimación de la absorción de nutrimentos

Paretas y Berna (1980) y Vicente-Chandler et ál., (1974) reportados por Gutiérrez (1996), determinaron extracciones anuales de fósforo de 47 a 59 kg ha⁻¹ año⁻¹, 40 a 70 kg de Mg ha⁻¹ año⁻¹ y de 50 a 85 kg S ha⁻¹ año⁻¹ en forrajes manejados intensivamente con aplicaciones considerables de N y con rendimientos de más de 25 t de MS ha⁻¹ año⁻¹.

Por otra parte Pezo (1997) propone un modelo de estimación de la fertilización nitrogenada y fosfórica teniendo en cuenta factores como el tipo de sistema, carga animal, concentración de nutrientes en los productos vendidos, aplicable a cualquiera de los tres sistemas existentes en el país.

Ejemplo:

En una finca de doble propósito se tienen 17 ha en *Brachiaria ruziziensis*, la cual es pastoreada por 22 vacas y 14 terneros. Las vacas producen en promedio 5,4 kg de leche vendible día⁻¹. En el año se venden además 10 terneros con un peso promedio de 160 kg, más 3 vacas de desecho con un peso promedio de 240 kg.

La fertilización está orientada a mantener la productividad del sistema, por tanto, se busca reponer la extracción de nutrimentos, con especial atención al N y al P (posteriormente, se utilizan las fuentes disponibles en el mercado para suplir los requerimientos).

NITRÓGENO:

a) Por leche producida: 5,4 kg vaca⁻¹ día⁻¹ x 22 vacas x 365 días = 43 362 kg de leche año⁻¹ en 17 ha

$$(43\,362\text{ kg} \times 0,61^*)/100 = 264,51\text{ kg. N año}^{-1}\text{ en 17 ha}$$

b) Por venta de terneros: 10 terneros año⁻¹ x 160 kg = 1600 kg año⁻¹ en 17 ha
 $(1600 \times 2,6^*)/100 = 41,6\text{ kg N año}^{-1}\text{ en 17 ha}$

c) Por venta de vacas de desecho: 3 vacas año⁻¹ x 420 kg = 1260 kg año⁻¹ en 17 ha

$$(1260 \times 2,4^*)/100 = 30,24 \text{ kg. N año}^{-1} \text{ en 17 ha}$$

d) Extracción total de nitrógeno: $264,51 + 41,60 + 30,24 = 336,35 \text{ kg N año}^{-1}$ en 17 ha

$$336,35/17 = 19,79 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$$

*Valor específico de tabla.

FÓSFORO: (Se asume que no hay fijación de P en el ejemplo)

a) Por leche producida: $5,4 \text{ kg vaca}^{-1} \text{ día}^{-1} \times 22 \text{ vacas} \times 365 \text{ días} = 43\,362 \text{ kg de leche año}^{-1}$ en 17 ha.

$$(43\,362 \text{ kg} \times 0,10^*)/100 = 43,36 \text{ kg P año}^{-1} \text{ en 17 ha}$$

$$43,36 \times 2,25 = 97,56 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ año}^{-1} \text{ en 17 ha}$$

b) Por venta de terneros: $10 \text{ terneros año}^{-1} \times 160 \text{ kg} = 1600 \text{ kg año}^{-1}$ en 17 ha

$$(1600 \times 0,67^* \times 2,25)/100 = 24,12 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ año}^{-1} \text{ en 17 ha}$$

c) Por venta de vacas de desecho: $3 \text{ vacas año}^{-1} \times 420 \text{ kg} = 1260 \text{ kg año}^{-1}$ en 17 ha

$$(1260 \times 0,68^* \times 2,25)/100 = 19,28 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ año}^{-1} \text{ en 17 ha}$$

d) Extracción total de fósforo: $97,56 + 24,12 + 19,28 = 140,96 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ año}^{-1}$ en 17 ha

$$140,96/17 = 8,3 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$$

*Valor de tabla establecida.

Estimación de las dosis

NITRÓGENO

Nivel de extracción: $19,79 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$

Eficiencia de uso: 40%

Dosis: $19,79/0,40 = 49,5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$

FÓSFORO (P₂O₅)

Nivel de extracción: $8,29 \text{ kg (P}_2\text{O}_5) \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$

Eficiencia de uso: 60%

Dosis: $8,29/0,60 = 13,82 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$

En este caso se recomienda la utilización de dosis de $20\text{--}40 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ por efectos de fijación.

D. Curvas de absorción de nutrimentos

En Costa Rica, se realizaron curvas de absorción de nutrimentos en el pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) en Carrizal de Alajuela, a 1750 m s.n.m., con una precipitación promedio de 3686,5 mm (1 m^{-2}) anuales (IMN, 1988). El suelo presente es un Typic Hapludands, franco arenoso fino, con un pH 5,86, 12,1% de materia orgánica, con contenidos de Ca, Mg, K y acidez intercambiable de 6,60, 3,00, 1,29 y $0,14 \text{ cmol l}^{-1}$, respectivamente (en KCl 1N y Olsen modificado para el K); 87,5, 16,4, 919, 8,7 y $7,5 \text{ mg l}^{-1}$ de P disponible, Cu, Fe, Mn y Zn respectivamente (Olsen modificado); $0,41$ y $12,0 \text{ mg l}^{-1}$ B y S, respectivamente, $[\text{CaHPO}_4 \text{ } 0,008 \text{ M (} 500 \text{ mg P l}^{-1}\text{)}]$. Los otros pastos fueron Estrella africana (*Cynodon nlemfluensis*) y Toledo (*Brachiaria brizantha* cv. Toledo) en Muelle de San Carlos, provincia de Alajuela, a 100 m s.n.m., con una precipitación promedio de 2865,7 mm (1 m^{-2}) anuales (IMN, 1988). El suelo presente es un Fluventic Dystrudepts, franco arenoso, pH 4,95, 8,85% de materia orgánica, con contenidos de Ca, Mg, K y acidez intercambiable de 7,90, 2,06, 0,37 y $0,33 \text{ cmol l}^{-1}$ respectivamente (en KCl 1N y Olsen modificado para el K) y 7,50, 11,70, 267, 76 y $4,80 \text{ mg l}^{-1}$ de P disponible, Cu, Fe, Mn, Zn; $0,83$ y $5,10 \text{ mg l}^{-1}$ $[\text{CaHPO}_4 \text{ } 0,008 \text{ M (} 500 \text{ mg P l}^{-1}\text{)}]$ de B y S, respectivamente. En los tres casos la fertilización base consistió de 400 kg ha^{-1} de la fórmula 10-30-10-4,5(S) a la siembra y luego la fertilización de la finca de 250, 40, 20, 40 y 20 kg ha^{-1} de N, P_2O_5 , K_2O , MgO y S, respectivamente. Se realizó la curva de absorción de nutrimentos (tabla 1) desde la siembra hasta el primer pastoreo, tomando todas las partes de la planta (aérea y raíz).

Elemento	Kikuyo	Toledo	Estrella
	kg ha^{-1}		
K	400	211	105
N	245	118	64
Ca	49	28	9
P	43	16	11
Mg	39	28	6
S	34	10	11
Fe	58,76	18,77	2,74
Cu	0,36	0,10	0,13
Zn	0,86	0,28	0,15
Mn	1,95	1,10	0,26
B	0,02	0,12	0,03
Peso seco	14 343	9 044	4 229

TABLA 1. Curvas de absorción de nutrimentos por el pasto Kikuyo (*Kikuyo chloa clandestinum*) en Carrizal, Alajuela, y los pastos Toledo (*Brachiaria brizantha* cv. Toledo) y Estrella africana (*Cynodon nlemfluensis*) en San Carlos, Alajuela, durante el período de establecimiento del cultivo (Costa Rica).

Se cuantificó la absorción total de nutrimentos por el pasto en cada período de descanso (lo que hay disponible) con muestreos sucesivos realizados al final de cada período de descanso de la pastura y luego se sumó todo el año (tabla 2) y la extracción total (exportación) por parte de los animales en ese año (tabla 3).

Elemento	Kikuyo	Toledo	Estrella
	kg ha ⁻¹		
K	2184	2081	1381
N	1273	1048	1109
Ca	173	274	205
P	183	168	171
Mg	145	241	94
S	123	82	145
Fe	32,17	10,07	8,46
Cu	0,81	0,81	1,17
Zn	2,32	2,98	2,88
Mn	3,85	8,62	5,25
B	0,24	0,31	0,18
Peso seco	51 868	89 478	59 281

TABLA 2. Peso seco y absorción total de nutrientes por periodo de descanso durante un año, en potreros sometidos a pastoreo rotacional con ganado lechero en el pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) en Carrizal, Alajuela, y los pastos Estrella africana (*Cynodon nlemfluensis*) y Toledo (*Brachiaria brizantha* cv. Toledo) en San Carlos, Alajuela (Costa Rica).

Importante es mencionar que los datos de Fe son muy elevados en la curva de absorción, debido a la gran adhesión de este a las raíces de las plantas que impide un buen lavado y los autores reportaron los valores para información de otros trabajos, debido a que el Fe en curvas de absorción generalmente es muy alto. Para determinar estos valores, se muestreó antes de la entrada a los potreros del ganado y después del pastoreo (Rivera, 2008).

Elemento	Kikuyo	Toledo	Estrella
	kg ha ⁻¹		
K	540,5	617,5	325,0
N	321,7	278,2	264,8
Ca	43,7	68,8	47,7
P	43,9	49,5	42,5
Mg	36,9	65,3	22,6
S	30,4	25,7	33,1
Fe	9,65	2,92	1,92
Cu	0,16	0,19	0,29
Zn	0,56	0,84	0,82
Mn	0,96	2,39	1,33
B	0,06	0,11	0,03
Peso seco	12 992	25 213	14 435

TABLA 3. Peso seco y nutrimentos EXPORTADOS en los pastos Kikuyo (*Kikuyo chloa clandestinum*), Toledo (*Brachiaria brizantha* cv. Toledo) y Estrella africana (*Cynodon nlemfluensis*), sometidos a pastoreo por período de descanso, en Costa Rica

E. Análisis del tejido foliar

El diagnóstico foliar constituye una de las técnicas más avanzadas para evaluar el estado nutricional de una planta. Está basado en la necesidad que tienen las plantas de una determinada concentración de cada uno de los elementos esenciales para el normal desarrollo de las funciones que en ella tienen lugar.

En el caso de los forrajes se debe tener claro, que la forma de tomar una muestra debe comprender aspectos muy relevantes que son los que, al final, van a permitir la representatividad adecuada del área en estudio, por tanto, se deben tomar en cuenta los siguientes puntos:

Elección de la planta a muestrear: se toman cortes generales como lo hace el ganado; considerando que la concentración de los elementos en las hojas, varía de acuerdo con factores como la edad fisiológica de la hoja, posición en la planta, estado fenológico del cultivo, efecto del ambiente y del suelo.

Área a muestrear: depende de los criterios de definición de unidad de muestreo, los cuales son muy parecidos a los aplicados en el muestreo de suelos. Para estos muestreos las áreas deben ser homogéneas en pendiente, tipo de suelo, textura, manejo, profundidad del suelo, etc. Estas áreas pueden medir de 1 a 5 ha, o 10 según las situaciones, pero no deben ser mayores de 20 ha, si las condiciones son homogéneas (Ramírez, 1998).

➤ Número de submuestras: según los investigadores (Ramírez, 1998; Bowen, 1978) se deben tomar de 15 a 25 submuestras por cada muestra, para minimizar la variabilidad del área de estudio y así poder estimar la verdadera cantidad de nutrimentos disponibles en la zona muestreada, las cuales se deben tomar en zig-zag. Un buen número es 20 submuestras.

Importante señalar que, si bien los análisis foliares indican, por ejemplo, la deficiencia de tal o cual elemento, nada dicen del porqué de la deficiencia. Por ello, los análisis foliares y de suelos se complementan entre sí en la evaluación del estado nutricional de un pastizal.

La edad y el nivel de producción de un forraje influyen en las exigencias nutricionales y por ello el productor y técnico deben conocer el ciclo de vida productivo del mismo. El mantenimiento de pasturas debe decidirse en función de las tasas de crecimiento de las especies componentes, su fisiología, de su reacción al pastoreo, su palatabilidad y el grado de competencia de las malezas (Alvarado y Salas, 1998).

Costa Rica no cuenta con tablas de niveles críticos, pero se evaluaron en un estudio realizado por Vargas y Fonseca (1989), en que se determinó el contenido mineral y proteico de los principales forrajes del país. Con estos valores de concentración y datos de producción de materia seca obtenidos en otras

investigaciones, se calcularon los niveles foliares para Costa Rica en ganadería de leche (tabla 4) y carne (tabla 5).

<i>Elemento</i>	<i>Deficiencia</i>	<i>Nivel crítico</i>	<i>Óptimo</i>	<i>Tóxico</i>
Proteína cruda %	<7,0	11,0	>11	----
N %	<1,12	1,76	>1,76	----
P %	<0,26	0,31	0,31-0,60	>1,0
K %	<0,80	0,80	0,80-2,00	>3,0
Ca %	<0,37	0,43	0,43-0,80	>2,0
Mg %	<0,16	0,20	0,20-0,40	>0,5
Na %	<0,10	0,18	0,18-1,00	>2,0
NaCl %	<0,25	0,46	0,46-2,55	>5,0
Fe mg kg ⁻¹	<50	50	50-100	>1000
Cu mg kg ⁻¹	<10	10	10-20	>80
Mn mg kg ⁻¹	<40	40	40-100	>1000
Zn mg kg ⁻¹	<40	40	40-100	>500
Co mg kg ⁻¹	<0,10	0,10	0,10-1,00	>10
I mg kg ⁻¹	<0,25	0,50	0,50-2,00	>50
Se	<0,10	0,20	0,20-1,00	>5

TABLA 4. Estimación de niveles foliares de nutrientes (base seca) en pastos para ganado de leche en Costa Rica. Fuente: Vargas y Fonseca, 1989

<i>Elemento</i>	<i>Deficiencia</i>	<i>Nivel crítico</i>	<i>Óptimo</i>	<i>Tóxico</i>
Proteína cruda %	<7,0	7,0	>8	----
N %	<1,12	1,76	>1,76	----
P %	<0,18	0,18	0,20-0,60	>1,0
K %	<0,50	0,65	0,65-2,00	>3,0
Ca %	<0,18	0,18	0,20-0,80	>2,0
Mg %	<0,04	0,10	0,10-0,25	>0,4
Na %	<0,06	0,08	0,08-1,00	>3,5
NaCl %	<0,15	0,20	0,20-2,55	>9,0
Fe mg kg ⁻¹	<50	50	50-100	>1000
Cu mg kg ⁻¹	<4	8	8-20	>115
Mn mg kg ⁻¹	<40	40	40-100	>1000
Zn mg kg ⁻¹	<30	30	40-100	>500
Co mg kg ⁻¹	<0,07	0,10	0,10-1,00	>5
I mg kg ⁻¹	<0,20	0,50	0,50-2,00	>50
Se	<0,10	0,20	0,20-1,00	>5

TABLA 5. Estimación de niveles foliares de nutrientes (base seca) en pastos para ganado de carne en Costa Rica. Fuente: Vargas y Fonseca, 1989

De igual forma, los mismos investigadores obtuvieron estimaciones de los niveles específicos para el pasto Estrella africana, resumidos a continuación (tabla 6):

Elemento	Ambito adecuado*, Georgia, USA.	Valor crítico Costa Rica**
N %	2,20-4,00	1,76***
P %	0,25-0,60	0,3
K %	1,80-3,00	1
Ca %	0,25-0,50	0,4
Mg %	0,13-0,30	0,2
S %	0,18-0,50	0,2
B mg kg ⁻¹	3-7	3
Cu mg kg ⁻¹	5-25	10
Fe mg kg ⁻¹	5-350	50
Mn mg kg ⁻¹	25-300	40
Zn mg/Kg	20-50	40

TABLA 6. Niveles críticos foliares para pasto estrella (*Cynodon nlemfluensis*) en Georgia, USA y Costa Rica

* Benton et ál., 1999.

**Vargas y Fonseca, 1989.

***estimado, con 11% de proteína cruda (1,76 x 6,25).

Al igual que los anteriores investigadores, Botero (1994) obtuvo los niveles foliares para los forrajes de Colombia (tabla 7):

Elemento	Ambito adecuado	Promedio
N %	1,34-1,52	1,43
P %	0,19-0,22	0,21
K %	0,60-1,00	0,80
Ca %	0,28-0,37	0,32
Mg %	0,05-0,20	0,13
S %	0,08-0,15	0,12
B mg kg ⁻¹	4,00-8,00	6,00
Cu mg kg ⁻¹	4,00-10,00	7,00
Fe mg kg ⁻¹	50,00-100,00	75,00
Mn mg kg ⁻¹	20,00-50,00	35,00
Zn mg kg ⁻¹	20,00-40,00	30,00

TABLA 7. Resumen de niveles críticos foliares o concentraciones foliares óptimas de Colombia. Fuente: Botero R., 1994

F. Análisis de suelo

A través del análisis químico del suelo se puede evaluar en qué magnitud está la disponibilidad de ciertos nutrimentos. Es importante destacar que la obtención de las muestras de suelo para el análisis, es decir, el Muestreo de los Suelos, constituye una de las fases principales y de ella dependen la exactitud, utilidad y confiabilidad que pueden tener los resultados analíticos.

De la misma forma que el análisis foliar, se debe tener presente los mismos puntos de importancia en el suelo, dada la cantidad de variantes que presentan los suelos tropicales en áreas relativamente pequeñas.

Cabalceta (1999) propone que en el caso de los forrajes el muestreo foliar debe ir acompañado del muestreo del suelo, teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Topografía del terreno (pendiente, plano, ondulado) y uniformidad.
- Presencia de caminos del ganado, ríos, etc.
- Especie utilizada y edad de corte.
- Manejo particular del forraje (riego, aplicación de estiércol, etc.).

Para obtener mayor información sobre los análisis que se realizan en suelos y su correcto uso, estudiar el capítulo «Análisis de suelos y su interpretación en zonas tropicales».

Respuesta al encalado

Es una práctica no muy común en suelos forrajeros, pero cuando se realiza se acostumbra a utilizar carbonato de calcio y/o dolomita para tratar de reducir la acidez y aumentar un poco el magnesio, en el caso de la segunda.

Bajo las condiciones tropicales en pastos no se ha observado un buen resultado a la aplicación de cales, probablemente porque gran parte de las especies que comúnmente crecen son menos exigentes en Ca y son tolerantes a la acidez intercambiable. Pero se debe aplicar en suelos con problemas de acidez y bajos en Ca, donde existan especies mejoradas no tolerantes a la acidez del suelo. Otra ventaja del encalado es que aumenta el pH del suelo, disminuido principalmente por el lavado de bases y por la aplicación masiva de nitrógeno amoniacal, que genera un efecto residual ácido.

Tanto Molina (1998) como Bertsch (1995) concuerdan en que la decisión de encalar se debe tomar luego de estudiar las condiciones de acidez del suelo, tomando como base el análisis de suelo y considerando los siguientes indicadores de acidez:

- $\text{pH} < 5,5$
- acidez o Al intercambiable $> 0,5 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$
- suma de bases $< 5 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$
- % de saturación de acidez o Al intercambiable > 10 a 60%.

Para obtener mayor información sobre el encalado de los suelos y su correcto uso, estudiar el capítulo «Acidez y encalado de los suelos».

Fertilización

A. Fuentes de fertilizantes

Existen pocas limitaciones a la aplicación de las diferentes fuentes de fertilizantes existentes en el mercado, por lo que la mayoría de las fuentes pueden ser utilizadas sin problemas. Aún así Jiménez y Rojas (1996) proponen las siguientes fuentes de nutrimentos (tabla 8). El uso adecuado de las mismas dependerá del conocimiento del tipo de suelo, su grado de fertilidad actual y de las condiciones climáticas imperantes. Es importante destacar que los fertilizantes se deben aplicar para suplir nutrimentos que el suelo no puede suplir a la pastura en forma adecuada. Además, se debe considerar el efecto que produce en el suelo la adición de un determinado fertilizante, ya que algunos producen acidificación (fertilizantes nitrogenados amoniacales o que en su reacción generan amonio, pues el amonio al nitrificarse genera H^+ que disminuye el pH del suelo) y otros generan problemas de sales al suelo.

Fertilizante	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Observaciones
Nutrán	33,5	0	0	Rápida disposición para la planta.
Urea	46	0	0	Mayor aporte de nitrógeno
TSP	0	46	0	Mayor aporte de fósforo (13% Ca)
DAP	18	46	0	Buena fuente de fósforo y nitrógeno
10-30-10	10	30	10	Fórmula completa.
Estiércol*	18	30	33	kg secos animal ⁻¹ año ⁻¹ , aproximado.

TABLA 8. Fuentes de fertilizantes más frecuentes en la fertilización de pastos en Costa Rica.

* Mediante la aplicación de paleteo en los potreros (utilizado en ganadería de leche).

Más recientemente, La cooperativa de productores de leche (1998) promueve la utilización de otras fuentes de nutrientes específicamente para fincas de leche con un programa de pastoreo rotacional establecido; algunas de estas fuentes se citan a continuación (tabla 9):

Fertilizante	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	B ₂ O ₃	CaO	S
Pasto Fértil	20	12	7	5,6	0,44		7,33
Urea	46						
Urea + S	40						5,6
TSP		46				18,2	
Nutrasul	27						8,22
10-30-10 Nutrofer	10	30	10				
Nitramón	20			8		11	
Magmesamón	21			7,5		11	
Nitrato de amonio	33,5						

TABLA 9. Fórmulas comerciales propuestas para la fertilización de forrajes en fincas lecheras

B. Dosis de fertilizantes

A continuación, se presentan una serie de dosis recopiladas en la literatura para los pastos Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y Estrella africana (*Cynodon nlemfluensis*) (tablas 10 y 11):

N (kg ha ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	REFERENCIA
213	40	Acosta, 1995
240	-	Machado, 1997
240	-	Alvarado, 1985
215	40 – 130	Dos Pinos, 1997
200	65	López, 1985
240	-	Arriaga, 1983
Ámbito (213-240)		(40-130)

TABLA 10. Dosis de fertilizante recomendadas por varios autores para Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*).

N kg ha ⁻¹	P ₂ O ₅ kg ha ⁻¹	REFERENCIA
213	40	Acosta, 1995
250	60	Arriojas, 1989
215	60	CATIE, 1991
250	80 – 130	Dos Pinos, 1997
320	65	López, 1985
Ámbito (213-320)		(40-130)

TABLA 11. Dosis de fertilizante recomendadas en la literatura para Estrella africana (*Cynodon nlemfluensis*).

Por otra parte, la cooperativa de productores de leche (Dos Pinos, 1997) difunde entre sus productores las siguientes dosis de nutrimentos (tabla 12):

Elemento	Fertilidad baja	Fertilidad media	Fertilidad alta
		kg ha ⁻¹ año ⁻¹	
Nitrógeno (N)	180-250	180-250	180-250
Fósforo (P ₂ O ₅)	80-130	40-80	20-40
Potasio (K ₂ O)	30-40	20-30	10-20
Magnesio (MgO)	30-40	30-40	30-40
Azufre (S)	20-30	10-20	10-20

TABLA 12. Recomendaciones generales para la fertilización de pastos, según los requerimientos y condiciones de suelo. Cooperativa de productores de leche (Dos Pinos)

C. Métodos de fertilización

La forma de fertilización de la pastura va a depender mucho del tipo de explotación lechera y de la forma de manejo de la misma. Existen diferentes formas de fertilizar, sin embargo, cada una de ellas se debe modificar y adaptar a cada sistema en particular. Una vez establecida la pastura debe tomarse en consideración la disposición del sistema radical, cuya distribución está influenciada por las características físico-químicas de los suelos y de la especie forrajera. Estudios de distribución de raíces, demuestran que la mayor

concentración de raíces se localiza en los primeros 15-20 cm de profundidad; es en esta zona donde debe colocarse el fertilizante para un mayor aprovechamiento por parte del follaje. Generalmente la fertilización en pastos se hace al voleo aunque también se puede aplicar en forma localizada especialmente cuando se establecen pasturas y con elementos que se fijan al suelo como el fósforo, pero por costos de mano de obra no es frecuente (Rojas, 1999).

D. Época de aplicación de fertilizantes

Se recomienda fertilizar cuando haya humedad, pero no demasiada, ya que esto favorece la incorporación de los nutrimentos al suelo, mayor aprovechamiento por la planta y menos pérdidas por volatilización (N). Debe cuidarse de las pérdidas por lixiviación; esto para fincas donde no hay sistemas de riego, suelos con texturas gruesas, con baja CIC, bajo contenido de materia orgánica, etc. (Bertsch, 1995).

Para la época de aplicación del fertilizante se deben considerar: las exigencias nutricionales de la planta y el comportamiento del fertilizante en el suelo. Se debe tener presente que la absorción de nutrimentos por las pasturas ocurre durante todo el año; sin embargo, las mayores exigencias se localizan en los períodos de desarrollo vegetativo. Los fertilizantes presentan diversos grados de solubilidad y los elementos esenciales difieren en cuanto a su movilidad en el suelo. Esto trae como consecuencia que la aplicación del fertilizante debe hacerse en la época apropiada para lograr satisfacer las exigencias de la pastura y también evitar la pérdida por lavado de los fertilizantes aplicados. Para determinar esos momentos es importante conocer el ciclo de vida de la planta (número de días, etapas), conocer los requisitos nutricionales a lo largo del ciclo, o sea, por etapas, y seleccionar aquellas épocas críticas para cada elemento de acuerdo con: la esencialidad del nutrimento en procesos fisiológicos específicos y las cantidades de absorción máximas.

E. Programas de fertilización:

Cada programa de fertilización es específico para cada finca, ya que como se mencionó anteriormente, en el trópico las variaciones de suelo son muy amplias, por lo que no se puede uniformar criterios para uno y otro lugar. Por otra parte, hay que mencionar que la aplicación de fertilizantes depende de la capacidad monetaria de la finca. Es por esto que la fertilización de pasturas en Costa Rica se limita más que nada a los productores de leche, siendo más limitado para los productores de carne del país.

Ante esto Cabalceta (1999) confirma la inexistencia de programas de fertilización en las zonas de producción de ganado de carne, debido a la baja rentabilidad de la empresa.

A continuación se presenta una serie de programas de fertilización establecidos por productores y/o empresas para diferentes fincas de leche y doble propósito del país:

Rivera (2008) propone unos programas de fertilización para el establecimiento de potreros con los pastos Estrella africana, Toledo y Kikuyo, Alajuela, Costa Rica, basados en las curvas de absorción de nutrimentos (tabla 13).

Estrella																
Época	Saco ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	Fórmula del fertilizante							kg de nutriente ha ⁻¹						
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	Zn	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	Zn
15 DDS	1	45	12,0	30,0	8,0	6,0		8,0	0,0	5,4	13,5	3,6	2,7		3,6	
15 DDS	1	45	24,0	12,0	6,0	6,0		7,0	0,4	10,8	5,4	2,7	2,7		3,2	0,2
50 DDS	1	45	46,0							20,7						
50 DDS	2	90	21,5			7,0	11,0			19,4			6,3	9,9		
Total	5	225						Total kg ha ⁻¹ :		56,3	18,9	6,3	11,7	9,9	6,8	0,2
Toledo																
Época	Saco ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	Fórmula del fertilizante							kg de nutriente ha ⁻¹						
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	Zn	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	Zn
15 DDG	1	45	12,0	30,0	8,0	6,0		8,0	0,0	5,4	13,5	3,6	2,7		3,6	
15 DDG	2	90	24,0	12,0	6,0	6,0		7,0	0,4	21,6	10,8	5,4	5,4		6,3	0,4
80 DDG	2	90	46,0							41,4						
80 DDG	2	90	21,5			7,0	11,0			19,4			6,3	9,9		
Total	7	315						Total kg ha ⁻¹ :		87,8	24,3	9,0	14,4	9,9	9,9	0,4
Kikuyo																
Época	Saco ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	Fórmula del fertilizante							kg de nutriente ha ⁻¹						
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	Zn	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	Zn
15 DDS	2	90	18,0	46,0	0,0	0,0		0,0	0,0	16,2	41,4					
15 DDS	2	90	24,0	12,0	6,0	6,0		7,0	0,4	21,6	10,8	5,4	5,4		6,3	0,4
75 DDS	2	90	46,0							41,4						
75 DDS	2	90	21,5			7,0	11,0			19,4			6,3	9,9		
Total	8	360						Total kg ha ⁻¹ :		98,6	52,2	5,4	11,7	9,9	6,3	0,4

TABLA 13. Programas de fertilización para el establecimiento de potreros con los pastos Estrella africana, Toledo y Kikuyo, Alajuela, Costa Rica

DDS: Días Después de la Siembra, DDG: Días Después de la Germinación

SACOS ha ⁻¹	FUENTE	N	P ₂ O ₅	ÉPOCA	MÉTODO
2,5	NUTRAN*	37,7	----	MAYO	VOLEO
3	DAP**	27	69	JUNIO	LOCALIZADA
2,5	NUTRAN	37,7	----	JULIO	VOLEO
2,5	NUTRAN	37,7	----	AGOSTO	VOLEO
3	DAP	27	69	SEPTIEMBRE	LOCALIZADA
2,5	NUTRAN	37,7	----	OCTUBRE	VOLEO
2,5	NUTRAN	37,7	----	NOVIEMBRE	VOLEO
		242,5	138		

TABLA 14. Programa de fertilización de una finca lechera en Coronado, Costa Rica

*Nitrato de amonio (sacos 45 kg). **Fosfato diamónico (sacos 50 kg)

SACOS ha-1	FUENTE	N	P2O5	ÉPOCA	MÉTODO
2	NUTRAN*	30,15	----	MAYO	VOLEO
2,5	DAP**	22,5	57,5	JUNIO	LOCALIZADA
2	NUTRAN	30,15	----	JULIO	VOLEO
2	NUTRAN	30,15	----	AGOSTO	VOLEO
2,5	DAP	22,5	57,5	SEPTIEMBRE	LOCALIZADA
2	NUTRAN	30,15	----	OCTUBRE	VOLEO
2	NUTRAN	30,15	----	NOVIEMBRE	VOLEO
		195,75	1115		

TABLA 15. Programa de fertilización de una finca lechera en Rancho Redondo, Costa Rica

*Nitrato de amonio (sacos 45 kg). **Fosfato diamónico (sacos 50 kg)

SACOS ha ⁻¹	FUENTE	N	ÉPOCA	MÉTODO
2,5	NUTRAN*	37,7	MAYO	VOLEO
2,5	NUTRAN	37,7	JUNIO	VOLEO
2,5	NUTRAN	37,7	JULIO	VOLEO
2,5	NUTRAN	37,7	AGOSTO	VOLEO
2,5	NUTRAN	37,7	SEPTIEMBRE	VOLÉE
2,5	NUTRAN	37,7	OCTUBRE	VOLEO
2,5	NUTRAN	37,7	NOVIEMBRE	VOLEO
		263,9		

TABLA 16. Programa de fertilización de una finca lechera en Coronado (Las Nubes), Costa Rica

* Nitrato de amonio (sacos 45 kg)

SACOS ha ⁻¹	FUENTE	N	ÉPOCA	MÉTODO
2	NUTRAN*	30,2	MAYO	VOLEO
2	NUTRAN	30,2	JUNIO	VOLEO
2	NUTRAN	30,2	JULIO	VOLEO
2	NUTRAN	30,2	AGOSTO	VOLEO
2	NUTRAN	30,2	SEPTIEMBRE	VOLÉE
2	NUTRAN	30,2	OCTUBRE	VOLEO
2	NUTRAN	30,2	NOVIEMBRE	VOLEO
		211,4		

TABLA 17. Programa de fertilización de una finca lechera en San Carlos, Alajuela, Costa Rica

* Nitrato de amonio (sacos 45 kg)

La Cooperativa de productores de leche Dos Pinos, R.L., en Costa Rica, posee programas de fertilización de pasturas con base en la fertilidad natural del suelo. Se dividen en suelos de baja, media y alta fertilidad (Dos Pinos, 1997) (tablas 18, 19 y 20):

Mes	Fertilizante	Sacos ha ⁻¹	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	B ₂ O ₃	CaO	S
Ene	Pasto fértil	2	18	11	6,3	5	0,4		6,6
Feb.	Urea	2	41,4						
Mar	****								
Abr.	0-46-0	2		46					
May	Nutrasul	2	24,3						7,4
Jun.	10-30-10	2	10	30	10				
Jul.	N:Mg 20:8	2	18			7,2		10	
Ago	Nitrofertil	2	30						
Set	10-30-10	2	10	30	10				
Oct.	N:Mg 20:8	2	18			7,2		10	
Nov.	Pasto fértil	2	18	11	8	5	0,4		6,6
Dic.	N:Mg 20:8	2	18			7,2		10	
Total		22	205,7	128	34,3	31,6	0,8	30	20,6

TABLA 18. Programa de fertilización para suelos lecheros de *baja* fertilidad, Dos Pinos/FERTICA (Dos Pinos, 1997), Costa Rica. **** Época para aplicar enmiendas si el análisis de suelo lo indica

Mes	Fertilizante	Sacos ha ⁻¹	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	B ₂ O ₃	CaO	S
Ene	Nitrofertil	2	30						
Feb.	Urea	2	41,4						
Mar	****								
Abr.	****								
May	Nutrasul	2	24,3						7,4
Jun.	10-30-10	2	10	30	10				
Jul.	N:Mg 20:8	2	18			7,2		10	
Ago	N:Mg 20:8	2	18			7,2		10	
Set	10-30-10	2	10	30	10				
Oct.	N:Mg 20:8	2	18			7,2		10	
Nov.	Pasto fértil	2	18	11	6,3	5	0,4		6,6
Dic.	N:Mg 20:8	2	18			7,2		10	
Total		20	205,7	71	26,3	33,8	0,4	40	14

TABLA 19. Programa de fertilización para suelos lecheros de *media* fertilidad, Dos Pinos/FERTICA (Dos Pinos 1997), Costa Rica. **** Época para aplicar enmiendas si el análisis de suelo lo indica.

Mes	Fertilizante	Sacos ha ⁻¹	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	B ₂ O ₃	CaO	S
Ene.	Pasto fértil	2	18	11	6,3	5	0,4		6,6
Feb.	Urea	2	41,4						
Mar.	****								
Abr.	****								
May.	Nitrofertil	2	30						
Jun.	N:Mg 20:8	2	18			7.2		10	
Jul.	Nitrofertil	2	30						
Ago.	N:Mg 20:8	2	18			7.2		10	
Sep.	Nutrasul	2	24,3						7,4
Oct.									
Nov.	Pasto fértil	2	18	11	6.3	5	0.4		6,6
Dic.	N:Mg 20:8	2	18			7,2		10	
Total		18	215,7	22	12,6	31,6	0,8	30	20,6

TABLA 19. Programa de fertilización para suelos lecheros de *alta* fertilidad, Dos Pinos/FERTICA (Dos Pinos 1997), Costa Rica. **** Época para aplicar enmiendas si el análisis de suelo lo indica

F. Eficiencia de la fertilización

Es posible estimar el porcentaje de fertilizante aplicado que es absorbido por la planta, cuando realizamos el cálculo de la dosis de nutrientes en la finca. Para ello debemos tomar en cuenta los siguientes factores que determinan la eficiencia de la fertilización: propiedades del nutriente, características del suelo, características de la fuente fertilizante, método y época de aplicación y las condiciones climáticas. A continuación se presentan una serie de situaciones para el N, P y K, y los porcentajes de eficiencia para cada uno. Para estimar la eficiencia de la fertilización se utilizan los valores más altos (p.ej., Nitrógeno 70%), cuando los factores que la limitan son los mínimos, y bajos (p.ej., Nitrógeno 50%) cuando se estiman pérdidas máximas (Bertsch, 1998).

Nitrógeno: eficiencia de fertilización del 50 al 70%

Se lixivia:

- Principalmente, cuando se aplica como NO₃⁻, aunque el NH₄⁺ también se lava.
- Cuando se aplica en dosis fuertes, sin fraccionar.
- En suelos de texturas gruesas, de baja superficie de retención (baja CICE y CIA).
- En suelos con muy buen drenaje, con la tabla de agua muy profunda.
- En zonas de alta, frecuente y continua precipitación.
- En terrenos sin cobertura vegetal.

Se volatiliza:

- Cuando se aplican fertilizantes amoniacales o urea.

- En forma superficial
- Si se aplica en mezcla con otros fertilizantes de reacción básica.
- En suelos de pH alto, alcalinos o neutros.
- En suelos de baja CICE.
- En suelos secos.
- En regiones cálidas o en momentos de alta evaporación.

Se desnitrifica:

- Cuando está presente como NO_3^-
- En suelos con mala aireación (condiciones reducidas y anaerobias), en forma total, en los suelos inundados, o parcial, en los volcánicos.
- En presencia de organismos anaerobios.
- Durante el proceso de nitrificación, si el medio se presenta anaerobio.

Se fija:

- Como NH_4^+
- Cuando se aplican fuertes dosis de amoniacales.
- En suelos ricos en arcillas 2:1.
- En regímenes ústicos que favorecen la expansión y contracción de arcillas.

Se inmoviliza:

- Si se aplican residuos orgánicos desbalanceados con relación C/N altas.
- Cuando se favorece la actividad microbiana (encalado por ejemplo).
- En suelos muy pobres en N disponible.

Fósforo: eficiencia de fertilización del 30 al 50%

Se fija y precipita:

- Cuando se aplica al voleo.
- Cuando se aplica muy fraccionado.
- En suelos volcánicos, porque reacciona con la alofana.
- En suelos ácidos, porque reacciona con el Fe y Al.
- En suelos de pH alto, porque reacciona con el Ca.
- Cuando se aplica en mezcla con enmiendas calcáreas.

Se inmoviliza:

- Cuando se aplica residuos orgánicos desbalanceados.
- Cuando se favorece la actividad microbiana (encalado por ejemplo).
- En suelos muy pobres en P disponible.

Potasio: eficiencia de fertilización del 60 al 80%

Se lixivia:

- Cuando se aplica en dosis fuertes.
- En suelos de texturas gruesas.
- En suelos ácidos y de baja CICE.
- En suelos con muy buen drenaje, con la tabla de agua muy profunda.
- En zonas de alta, frecuente y continua precipitación.
- Cuando se utilizan altas dosis de fertilizantes nitrogenados amoniacales que compiten con el K por las posiciones de fijación.

Se fija:

- En suelos ricos en arcillas 2:1.
- En regímenes ústicos que favorecen ciclos alternos de humedecimiento y secado.

G. Respuesta a abonos foliares

En Costa Rica no se tiene información de respuesta de forrajeras a la fertilización foliar aunque ya se están utilizando fuentes de nutrientes principalmente menores, pero no se tienen datos concisos del efecto en la producción de pastos. Por otra parte, por costumbre no se utilizan fuentes foliares en las pasturas, pero algunos productores han realizado aplicaciones al follaje con muy buen éxito. Por esta razón, es importante realizar investigación en este campo.

H. Respuesta a abonos orgánicos

Al aplicar abonos orgánicos al suelo es útil para mantener la fertilidad y productividad de los suelos, ahorra fertilizantes y contribuye a darle sostenibilidad al sistema de producción, aprovechando un subproducto abundante de la ganadería como es el estiércol (Rojas, 1999).

La aplicación de abonos orgánicos tiene un efecto tardío (a mediano o largo plazo), porque los nutrimentos se encuentran, en su mayoría, en formas orgánicas que requieren mineralizarse. Este efecto tardío puede llegar a ser igual o mejor que una aplicación individual de fertilizantes (Cabalceta, 1999).

Es importante considerar que la composición química de los estiércoles y otros residuos orgánicos, varía mucho con la especie animal, con la actividad de la cual procede y con las condiciones en que se mantuvo. También hay que tener presente que el estiércol es una mezcla de heces y orina, con una población

microbial abundante, un gran potencial fermentativo y que puede aportar patógenos (Pezo, 1997)

El abono orgánico se debe distribuir bien y aplicarlo en períodos con suficiente disponibilidad de agua. Debido a que los estiércoles no abundan lo suficiente para cubrir la demanda de abono en la finca, existe la posibilidad de realizar una compostera (o pila de descomposición de los residuos) para descomponer previamente el material, proceso que es beneficioso porque el material es más rico en elementos químicos disponibles para las plantas.

En Guatemala se han realizado ensayos con abonos orgánicos en *Pennisetum purpureum* o pasto gigante aplicando 0, 10, 20, 30 y 40 toneladas en base fresca ha⁻¹ de gallinaza y 0, 30, 60, 90, 129 toneladas en base fresca ha⁻¹ de estiércol bovino, donde se obtuvo que la aplicación de cualquiera de esos materiales aumentó el rendimiento del forraje del 45 al 83%, y que no se justificaba aplicar cantidades mayores de 20 y 30 toneladas por hectárea en base fresca de gallinaza y estiércol bovino, respectivamente (Gutiérrez, 1996). En la tabla 21 se presenta la composición de algunos residuos orgánicos.

Material residual	N	P	K
	% (materia seca)		
estiércol vacuno	1,14	0,15	0,70
estiércol porcino	1,12	0,22	0,22
estiércol ovino	2,15	0,47	2,05
gallinaza	1,94	0,71	2,38
excretas de conejo	1,91	1,38	1,3
estiércol caprino	2,38	0,57	2,5
estiércol caballar	1,98	1,29	2,41
cachaza	2,89	1,52	0,39
guano de murciélago	8,5-9,2	4,6-5,5	1,8-2,6
residuo de matadero de aves	7,05	1,08	0,21
residuales de fábrica de tórrula; mg l ⁻¹	190	50	615
aguas albañales; mg l ⁻¹	12,30	1,26	11,04

TABLA 21. Composición química de algunos residuos orgánicos. Fuente: Gutiérrez, 1996

Conclusiones

El efecto de la fertilización en pastos permite obtener mejores rendimientos en toneladas de MS ha⁻¹ año⁻¹, con lo cual se garantiza una mejor nutrición y un manejo adecuado del complejo suelo-pasto-animal.

El programa de fertilización es característico para cada finca. Se debe basar en características físicas (topografía, drenaje, capacidad de retención de agua, temperatura, compactación, aireación, etc.) y químicas del suelo (fertilidad natural), comportamiento de los nutrimentos tanto en el suelo como en la planta,

especie forrajera, curvas de absorción de nutrimentos (o su estimación), análisis de suelos y plantas, y el % de eficiencia de fertilización. También considerar el método y la época de aplicación.

El uso de fertilizantes en la empresa ganadera de Costa Rica se restringe básicamente a fincas con un considerable margen de ganancia que permita pagar la inversión realizada.

La selección adecuada de las fuentes de fertilizantes permite al productor obtener un mayor beneficio y un manejo más apropiado de los recursos presentes en la finca.

La utilización de pastos mejorados es una forma de aumentar la calidad nutricional de la dieta ofrecida a los animales.

El uso de pastos mejorados en las fincas permite una mayor adaptabilidad a las condiciones climáticas, edáficas y de manejo imperantes en la zona.

Bibliografía

- ABARCA R., MADRIZ A. 1999. Determinar la competitividad económica de la explotación lechera especializada de las zonas altas del Valle Central (Cartago) y San Carlos (Alajuela) ante el convenio GATT. Tesis Lic. Economía Agrícola, Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica, pp. 8-17, 22-44, 85-139.
- ACOSTA R. 1995. Fertilizantes y pastoreo rotacional: dos técnicas para alta producción de leche y carne. CAFESA. San José, Costa Rica. 75 pp.
- AGÜERO J.M., ALVARADO A. 1983. Compactación y compactabilidad de suelos agrícolas y ganaderos de Guanacaste. *Agronomía Costarricense* 7(1/2): 23-27.
- ALVARADO A. 1985. Efecto de la fertilización nitrogenada y edad de corte sobre la producción. Acapulco, México.
- ALVARADO A., SALAS R.E. 1997. Fertilización de pasturas para producción de leche en Costa Rica: primera aproximación. VI Congreso Lechero Nacional. San José, Costa Rica. pp. 1-10.
- . 1998. Manejo de suelos para producción de forrajes en sistemas de ganadería lechera en Panamá. IV Congreso Internacional de la Asociación de Productores de ganado lechero de Panamá. David, Chiriquí, 26-28 enero, pp. 1-14.
- ARAYA E. 1990. Respuesta del pasto Kikuyo a la fertilización foliar en base a aminoácidos y a la fertilización nitrogenada. Tesis: Grado Lic. Zootecnia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- ARRIAGA M. 1983. Efecto de cinco edades de corte y cinco niveles de nitrógeno, fósforo y potasio sobre el rendimiento y calidad del pasto estrella africana. UCV. Venezuela. 34 pp.
- ARRIOJAS L. 1989. Aspectos relevantes de la fertilización de pastizales. UCV. Maracay, Venezuela. 25 pp.

- BENTON, J.J., WOLF, B., MILLS, H.A. 1991. Plant analysis handbook: a practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide Micro-Macro. Publishing, Inc. Georgia, USA. 213 pp.
- BERTSCH F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS), San José, Costa Rica. 157 pp.
- BOTERO R. 1994. La ganadería intensiva basada en praderas como opción sostenible de diversificación para la zona cafetalera colombiana. Carta ganadera. Colombia 31 (2): 36-37.
- BOWEN. 1978. Técnicas de muestreo foliar sugeridas para análisis de plantas como guía de fertilización, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 23 pp.
- CABALCETA G. 1999. Fertilización y nutrición de forrajes de altura. Congreso Nacional y Agronómico y de Recursos Naturales. Memorias Recursos Naturales y Producción Animal, III Congreso Nacional de Suelos. Floria Bertsch Hernández. UNED, Colegio de Ingenieros Agrónomos. San José, Costa Rica, vol. 3. pp. 239-254.
- CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA (CATIE) 1991. Ganadería y recursos naturales en América Central: Estrategias para la sostenibilidad. Memorias de simposio. San José, Costa Rica. 145-151.
- COOPERATIVA DE PRODUCTORES DE LECHE DOS PINOS, R.L. (DOS PINOS). 1997. Manual de nutrición de pastos. San José, Costa Rica. 26 pp.
- FAGERIA N., BALIGAR V., JONES CH. 1997. Growth and Mineral Nutrition of field crops. 2ª ed. MARCELL DEKKER, INC. New York, United States of America. 624 pp. <http://www.dekker.com>.
- GUTIÉRREZ M. 1996. Pastos y forrajes en Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de medicina veterinaria y zootecnia. Guatemala. 318 pp.
- INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL (IMN), 1988. Catastro de las series de precipitaciones medidas en Costa Rica. Instituto Meteorológico Nacional año del Centenario 1888-1988. Ministerio de Recursos Naturales Energía y Minas. San José, Costa Rica, pp. 26, 239.
- INSTITUTO DE LA POTASA Y EL FÓSFORO (INPOFOS). 1997. Manual internacional de fertilidad de suelos. 1.ª ed. en español. Copyright Potash & Phosphate Institute, USA. 149 pp.
- JIMÉNEZ C., ROJAS W. 1996. Composición química aproximada de las principales fuentes orgánicas e inorgánicas, más utilizadas para el abonamiento de pasturas y recomendaciones de uso. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- KUBOTA J., OBERLY H., NAPHAN. 1980. Magnesium in grasses of three selected regions in the United States and its relation to grass tetany. Agron. J. 72: 907-914.
- LASCANO, C., SPAIN, J. 1991. Establecimiento y renovación de pasturas: Conceptos, experiencias y enfoque de investigación. CIAT, Cali, Colombia. 34p p.
- LÓPEZ C.A., GONZÁLEZ, L. 1985. Respuesta del kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) a dosis crecientes de fósforo en un Typic Dystrandept, bajo condiciones de invernadero. Agronomía Costarricense, 9(1):93-97.
- MACHADO D., DÁVILA C. 1997. Efecto de preplantas a la fertilización. Universidad de Los Andes, Venezuela. CAB Abstracts 1996-1/1998.

- MOLINA E. 1998. Encalado para la corrección de la acidez del suelo. Universidad de Costa Rica. Centro de Investigaciones agronómicas. San José, Costa Rica. 45 pp.
- MONGE P., ALVARADO J., WILLE C., ALFARO O., SOLANO O. (s.a.). Establecimiento y manejo de los forrajes mejorados.
<http://www.infoagro.go.cr/tecnología/pastos.htm>
- MONTIEL M. 1983. Principios básicos de gramíneas y leguminosas forrajeras. Editorial Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 99 pp.
- MONTIEL M., JIMÉNEZ C., ROJAS W. 1990. Principales plantas forrajeras de uso en Costa Rica. Diversidad de Costa Rica, Escuela de Zootecnia, Servicio de Asistencia Técnica (SAT, Forrajes), San José, Costa Rica.
- PEZO D. 1997. Fertilización de especies forrajeras. Curso “Producción de Pasturas”. Universidad de Costa Rica. Escuela de Zootecnia. San José, Costa Rica.
- RAMÍREZ F. 1998. Muestreo de suelos para diagnóstico de fertilidad. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACSS). San José. Costa Rica. 6 p.
- ROJAS A. 1999. Comunicación personal. Profesor Catedrático Universidad de Costa Rica. Escuela de Zootecnia. San José, Costa Rica.
- RIVERA A. 2008. Curvas de absorción de nutrimentos durante el establecimiento de potreros; absorción total de nutrimentos y efecto de las excretas, durante el pastoreo rotacional con ganado lechero, en los pastos Kikuyo (*Kikuyo chloa clandestinum*), Estrella africana (*Cynodon nlemfluensis*) y Toledo (*Brachiaria brizantha* cv. Toledo). Tesis presentada para optar al grado de *Magister Scientae* en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos. Universidad de Costa Rica, Costa Rica. 93 pp.
- UCLA. 1997. Uc pest management guidelines. Division of Agriculture and Natural Resources. University of California. USA. Ipmitg@acdavis.edu.
- VARGAS E., FONSECA H., 1989. Contenido Mineral y proteico de forrajes para rumiantes en pastoreo en Costa Rica. 1.^a ed., San José, Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 217 pp.

Caso II.3.3 Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales

Introducción

Durante los últimos 60 años se ha generado mucha información relacionada con cantidad y compartimentos de nutrimentos en el bosque tropical, sobre reciclaje de nutrientes y sobre propiedades que le son peculiares a este tipo de bosque y su suelo. En contraste, se conoce extremadamente poco acerca del grado de limitación que representa para el bosque tropical la falta de nutrientes o cómo su adición puede afectar a cada especie y tipo de suelo particular en el que se desarrolla (Grubb, 1995).

Hace algunas décadas, mencionar el tema de nutrición forestal se consideraba un sin sentido, pues los árboles debían «crecer por si mismos» y de acuerdo a la usanza de entonces, «en suelos de vocación forestal», es decir, aquellos en los que no se podía realizar actividades agrícolas. Hoy en día, no se duda de que los árboles puedan crecer de esa manera y en esos sitios; sin embargo, se trata de maximizar su rendimiento, sea a través de buscar especies adaptadas a condiciones específicas, o por el contrario de mejorar el medio en el que los árboles deben crecer, en el presente caso a través de la aplicación de enmiendas. Surgen así dos corrientes de pensamiento distintas desde el punto de nutrición forestal: 1) El reciclaje de nutrimentos en bosques primarios y secundarios y 2) La fertilización de plantaciones forestales. Estos dos aspectos serán analizados en el presente trabajo.

Reciclaje de nutrimentos en plantaciones y bosques tropicales

El reciclaje de nutrientes asociado a bosques tropicales es tan variado como lo es su producción de biomasa, la adición de residuos y la descomposición de los mismos, y puede explicarse con modelos simples y coherentes, con criterios fisiológicos y edafológicos. Heal, Anderson y Swift (1997) hacen un recuento histórico de la evolución del conocimiento sobre calidad y descomposición de residuos, de manera que, para ampliar conceptos sobre el tema, el lector puede referirse a este documento.

En el neotrópico, la información disponible sobre el tema puede agruparse como proveniente de sistemas oligotróficos o distróficos, en los cuales los suelos son de fertilidad natural baja, o eutróficos en los que la fertilidad natural es elevada, de manera que las referencias sobre la mayoría de la Amazonía caen en

el primer grupo y las de Centroamérica y la región de valles altos, altiplanos y puna de los Andes en el segundo (Jordán y Herrera, 1981; Sarmiento, 1984). Bruijnzeel (1991) menciona que en el caso de los sistemas distróficos, el reciclaje de nutrimentos y la producción de biomasa es posible a través de una serie de mecanismos que mantienen un sistema cerrado y con poca pérdida de nutrientes; por el contrario, en los sistemas eutróficos el sistema de reciclar nutrientes es más abierto y permite una pérdida o salida de nutrientes del sistema mayor a la encontrada en sistemas distróficos.

1. El ciclo de los residuos orgánicos

El ingreso de nutrientes al ecosistema está más ligado a su reciclaje que a la forma en que funciona la adición de residuos provenientes del mismo, sin que se encuentren diferencias significativas entre lo que ocurre en las plantaciones o en los bosques tropicales (Bernhard y Loumeto, 2002). Algunos autores (Heaney y Proctor, 1989), consideran que el análisis de los residuos puede ser un mecanismo de diagnóstico de la nutrición del bosque o de la plantación, más seguro que el análisis foliar, ya que estos representan la concentración nutricional del árbol, incluyendo el fenómeno de reabsorción durante la senescencia del follaje y además todo el material producido por los árboles.

Un esquema simplificado de las principales funciones que tienen los residuos en el ecosistema, separa las funciones de mineralización (liberación de nutrimentos ligados a los residuos) y de humificación (proceso que conlleva a la formación de sustancias orgánicas que se acumulan en el suelo) y, de allí en adelante, los efectos específicos que cada una de estas dos fracciones juega sobre las propiedades del suelo (Bernhard y Loumeto, 2002); otra opción es la acumulación de los residuos orgánicos recalcitrantes, cuando las condiciones de mineralización o humificación son restringidas (condiciones de reducción o exceso de humedad y temperaturas bajas).

2. Producción de biomasa

La cantidad total de biomasa producida por un árbol o un bosque, corresponde a la suma de su producción de hojas, ramas, tronco, raíces, y en menor escala de flores, frutos y otras estructuras. Existen varios métodos para estimar la biomasa total, encontrándose que cuando esta se estima midiendo el promedio de biomasa por árbol, los valores que se obtienen pueden ser un 27 % menores que cuando la determinación se hace a través de un muestreo estratificado, es decir, estimando la biomasa por promedio ponderado en función del tamaño de las clases diamétricas del bosque o plantación (Kaul et ál., 1979).

En la fase inicial del crecimiento de los árboles, los pesos de materia seca de los tallos y las copas son equivalentes, mientras que con el desarrollo del árbol, el aumento en materia seca del tronco crece en forma exponencial y el de la copa sigue el mismo comportamiento de crecimiento inicial (Haag, 1983).

Bruijnzeel (1991) separa los bosques primarios y bosques secundarios en etapas de sucesión avanzada, los cuales tienden a alcanzar un estado de equilibrio dinámico, de las plantaciones forestales y bosques secundarios en sus primeras etapas de sucesión, los que generalmente representan ecosistemas con un requerimiento de nutrientes muy activo. En el primer tipo de bosques, la absorción de nutrientes para producir una cierta cantidad de biomasa depende casi exclusivamente del reciclaje de nutrientes liberados por descomposición de residuos y vía adiciones húmedas (agua de lluvia) y secas (polvo). En plantaciones y bosques secundarios en etapas de sucesión tempranas, el rápido crecimiento de los árboles requiere de un fuerte proceso de absorción de nutrientes en períodos de tiempo cortos, el cual excede en mucho la cantidad de nutrientes producto de la descomposición de residuos o de su lavado de la biomasa, en particular durante los primeros diez años de crecimiento. Las especies arbóreas de etapas de sucesión temprana tienen una mayor concentración foliar de nutrientes que las especies de etapas de sucesión tardías, hecho que se relaciona con su enorme velocidad de crecimiento, cobertura del suelo y reducción de pérdida de nutrientes por erosión y lavado (Davidson et ál., 1998).

Szott, Palm y Buresh (1999) mencionan que la acumulación de biomasa en bosques tropicales secundarios es esencialmente lineal durante los primeros 10 años de crecimiento y del orden de 4-15 t/ha/año en regiones húmedas, mientras que solo alcanza entre 1-8 t/ha/año en regiones más secas, debido a la limitación de humedad. Montagnini (2002) muestra que el incremento anual de biomasa de madera (tronco) de especies de hoja ancha en plantación oscila entre 1 y 28 t/ha/año y que la productividad de plantaciones forestales de rotaciones cortas y medias varía entre 1-2 a 25-30 m³/ha/año. Para especies de crecimiento rápido como *Gmelina arborea* y *Eucalyptus saligna*, varía entre 10-20 y 8-28 t/ha/año, respectivamente, y en otras especies de un crecimiento relativamente menor como *Swietenia spp.* y *Tectona grandis* entre 1-4 y 3-12 t/ha/año, respectivamente.

3. Nutrientes asociados a la biomasa aérea

La cantidad de nutrientes asociada a la parte aérea del bosque depende, entre otros factores, de la edad y la composición florística del bosque, la región bioclimática en que se desarrolla y la fertilidad natural del ecosistema. La biomasa y el total de nutrientes acumulados en el bosque aumentan con la edad del mismo hasta que este alcanza su madurez.

Antes de que los residuos provenientes de los árboles lleguen al suelo, los árboles tienen un mecanismo de translocación de nutrientes que causa una disminución de los mismos en algunos tejidos (p.ej., hojas) y su acumulación en otros (p.ej., madera); en el caso de la teca, Karmacharya y Singh (1992) documentan la translocación de nutrientes entre tejidos reproductivos, mencionando que el 90 % de los nutrientes del pedúnculo floral se reabsorben en las semillas. Algunos nutrientes como N y P se translocan hacia los tejidos leñosos antes de la senescencia en especies deciduas, mientras que este mecanismo de conservación es menos eficiente en especies siempre verdes. En especies deciduas, la producción de follaje nuevo cada año hace necesario que los árboles transloquen los nutrientes hacia las hojas, ya que la absorción de los mismos desde el suelo requiere mucha más energía (Samra y Riazada, 2002).

3.1. Los residuos y su efecto sobre el reciclaje de nutrientes

La adición de residuos del bosque tropical húmedo aporta una gran cantidad de nutrientes, los cuales pueden ser utilizados por los individuos del bosque a través del proceso de reciclaje natural, que consiste en su caída y descomposición. Además de las prácticas silviculturales que se efectúen en un bosque o plantación forestal, la cantidad de nutrientes reciclados por este mecanismo, depende de la edad del bosque, del tipo de bosque, de la época del año, ocurrencia de fenómenos atmosféricos devastadores (p.ej., huracanes) y de la fertilidad natural del suelo, entre otros factores. El reciclaje de nutrientes es de especial importancia en bosques secundarios en sistemas distróficos, en los cuales la poca cantidad de nutrientes disponible determina, en parte, la duración de las etapas de sucesión.

Las concentraciones de Ca y N en todos los residuos, normalmente son más elevadas que las de K, Mg y P, mayores en los residuos de hojas que en los de ramas y, en general, mayores en las especies caducifolias (p.ej., teca) que en las siempre verdes (p.ej., pinos y eucaliptos). La concentración de nutrientes en los residuos de hojas correlaciona en forma negativa con la magnitud de su caída y con aumentos en la biomasa; la caída de hojas aumenta hasta el cierre de copa de la plantación y después es proporcional a la productividad primaria neta, para decrecer en la fase de crecimiento lento de los árboles (Sharma y Pande, 1989).

Bruijnzel (1991) demuestra que en los suelos de fertilidad muy baja, ocurren pérdidas ligeras de Ca, Mg y K. En los Oxisoles y Ultisoles, las pérdidas son un tanto mayores, excepto la de K que es mucho mayor. En los Inceptisoles las pérdidas de nutrientes del ecosistema son aún mayores que en el ecosistema dominado por Oxisoles y Ultisoles y en los Vertisoles y Mollisoles ocurre la mayor pérdida de Ca y Mg, sin que se pierda nada de K. En todos los bosques

estudiados se presentó una acumulación neta de P en el suelo, el cual se encuentra asociado a las fracciones orgánicas y su contenido de aluminosilicatos.

Una buena cantidad de los residuos que caen al suelo, especialmente en rodales de coníferas en regiones tropicales de montaña, se acumulan o inmovilizan en esta fracción. La cantidad de residuos (hojarasca) acumulados en el suelo en plantaciones de coníferas entre 9 y 12 años en el altiplano de Popayán, Colombia, mostró valores mayores para *Pinus kesiya* (3352 kg/ha), que *Pinus patula* (2090 kg/ha), que *Pinus oocarpa* (1888 kg/ha) y que *Cupressus lusitanica* (1590 kg/ha), por lo que se puede asumir que *P. kesiya* es más eficiente en extraer y reciclar nutrientes del suelo que las otras especies comparadas (Cannon, 1983).

3.2. Acumulación de residuos sobre el suelo

Los nutrientes en los bosques tropicales de zonas bajas (alta temperatura y humedad relativa) son rápida y eficientemente reciclados, por lo que tienen un tiempo de residencia corto en el sistema (Montagnini, 2002). Según Bernhard y Loumeto (2002), la acumulación de residuos sobre el suelo en plantaciones forestales se puede emplear como un indicador del sistema de deposición y del funcionamiento de la plantación.

La cantidad de residuos producidos en plantaciones de crecimiento rápido es mayor que la proveniente de bosques naturales y su acumulación es mayor en climas medios, en los cuales se da una alta producción de residuos y una tasa de descomposición media. En plantaciones de especies nativas no ocurre una acumulación de residuos debido a que los organismos que los descomponen están adaptados a las condiciones climáticas en que viven; por esta razón, la acumulación de residuos es mayor bajo plantaciones de exóticas que en plantaciones nativas.

La acumulación de grandes cantidades de residuos en plantaciones forestales es poco frecuente. Según Reddy (2002) la acumulación de residuos en plantaciones de especies de hoja ancha como la teca (*Tectona grandis*) no es común, la vegetación del sotobosque se ve literalmente suprimida y las hojas que caen sufren un proceso de descomposición acelerado. En el caso de plantaciones de varias especies de *Eucalyptus*, la copa abierta y el tamaño pequeño de las hojas permite el crecimiento de plantas herbáceas, produciéndose residuos que se desmenuzan y descomponen muy rápidamente. Aún en el caso de adiciones grandes de residuos de especies leguminosas fijadoras de N, no se produce una gran acumulación de residuos, pues el alto contenido de N en las hojas hace que estas sean muy apetecidas por los microorganismos del suelo.

3.3. Descomposición de los residuos

Los residuos de los árboles pueden jugar un papel de cobertura con diferentes objetivos: como un producto de descomposición rápida que acelera el crecimiento de otras plantas asociadas en suelos pobres, mientras que en otros casos puede que sea más importante mantener sobre el suelo un residuo resistente a la descomposición. Por ejemplo, grandes cantidades de residuos de baja velocidad de descomposición se acumulan en plantaciones de *Vochysia ferruginea*, lo que hace que esta especie sea más conveniente para proteger el suelo contra la erosión. Lo opuesto ocurre con los residuos de *Hyeronyma alchornoides*, los cuales son menos abundantes y mucho más fáciles de descomponer (Montagnini, 2002).

Poels (1994) propone diferentes velocidades de descomposición de los tejidos adicionados al suelo en plantaciones de teca, de manera que se considera que las hojas se descomponen en 2 años, mientras que la madera fina y gruesa pueden tardar en descomponerse hasta 4 y 10 años, respectivamente. Mientras que en bosques tropicales montanos los valores de descomposición varían entre el 15 y el 70% de su peso por año, en ecosistemas boscosos de bajura estos valores son superiores al 80% (Fassbender, 1987) por lo que en este último ecosistema todos los residuos se descomponen prácticamente en 15 meses (Montagnini y Jordan, 2002).

Varios autores utilizan el coeficiente de descomposición de residuos (K), definido como las cantidades de «residuos depositados/residuos remanentes», como variable para estudiar la velocidad de paso de este tipo de materiales en un ecosistema. Otra forma de estimar la descomposición de residuos es utilizando bolsas de descomposición (en inglés, *litter bags*), en las cuales se subestima la velocidad de descomposición, debido a que impiden el acceso de la macro y mesofauna al material.

La concentración de nutrientes minerales y orgánicos, así como las propiedades físicas asociadas a los restos orgánicos sobre el suelo, definen la calidad de los residuos. En la mayoría de los casos esta variable se refiere a la calidad de las hojas como residuo, aunque algunos autores la determinan en el residuo total. Las características físicas de los residuos, tales como el grosor de las hojas, son muy poco conocidas; por el contrario, la literatura disponible acerca del efecto del contenido de N es abundante y no tanto lo es la de sustancias orgánicas solubles, metabolitos secundarios como fenoles, taninos o el contenido de fibra, celulosa y lignina. En pocas ocasiones se menciona la presencia de terpenos, los cuales se considera actúan como agentes alelopáticos (Bernhard y Loumeto, 2002).

La fauna asociada al suelo y a los residuos es un factor clave en su descomposición debido a que su reducción en tamaño e incorporación al suelo depende del trabajo de la micro (protozoarios y nematodos), meso (tartígrados, colémbolos, ácaros, proturas, dipluras, sinfílidos y paurópodos), todos entre 0.02 y 2 mm de tamaño, y la macrofauna (entre ellos, isópodos, ciempiés, milpiés, lombrices y mamíferos y aves). Durante la época lluviosa la velocidad de descomposición de residuos se ve favorecida por la actividad microbiana, la penetración de raíces finas y el incremento de la población de macroartrópodos, especialmente las termitas y hormigas. La microfauna de hongos y bacterias es muy selectiva y específica en la selección de residuos y juega un papel importante durante todo el año, sin embargo, son mucho más importantes durante la época seca cuando la actividad de los macroartrópodos es mínima (Costa et ál., 2002).

3.4. Nutrientes en los residuos liberados al suelo

La cantidad de nutrientes proveniente de los residuos que retorna al suelo, está relacionada con la cantidad de residuos y la concentración de nutrientes en los mismos, los cuales varían con la especie y la edad de la misma. La cantidad de nutrimentos aumenta con la edad de las plantaciones de *P. patula* debido principalmente al aumento de la biomasa con la edad, más que a la concentración de los diferentes elementos en los tejidos que la componen (Samra y Riazada, 2002).

A plazo largo, el impacto de las plantaciones sobre las propiedades del suelo depende de: 1) la cantidad total de nutrientes absorbidos por los árboles en relación a la capacidad de suplir nutrientes por el suelo, 2) la cantidad y velocidad de descomposición de los residuos de hojas adicionados al suelo, 3) la acumulación de nutrientes en los diferentes tejidos del árbol (tronco, ramas, hojas, raíces, etc.) y 4) las partes del árbol que se remueven del ecosistema como cosecha y los nutrientes asociados a la misma (Montagnini, 2002).

3.5. Inmovilización de nutrientes liberados de la descomposición de residuos

Durante el proceso de mineralización de los residuos, la relación C:N decrece en un corto período de tiempo, al igual que sucede con los tejidos de las bacterias y los hongos (Samra y Riazada, 2002). Los nutrientes que se liberan por este mecanismo pueden perderse por lavado o ser absorbidos para la síntesis de proteínas y otros componentes de los microorganismos, y la retención de nutrientes por la biomasa microbiana es lo que se conoce como inmovilización de

nutrientes. Los microorganismos mueren cuando la disponibilidad de materia orgánica se reduce al mínimo, liberando entonces los nutrientes que se habían inmovilizado en sus tejidos.

4. La quema de la vegetación y los residuos y la liberación rápida de nutrientes

En forma natural, los bosques pueden quemarse bajo condiciones climatológicas determinadas (períodos secos prolongados) y de manejo (acumulación de residuos después de la poda o de la época seca), liberando todos los nutrientes asociados a la biomasa que se quema en forma instantánea. La cantidad de elementos que se libera de la biomasa boscosa y pasa a engrosar la disponibilidad de los mismos en el suelo ocurre en forma moderada cuando se practican fuegos controlados (Richter, Ralston y Harms, 1982; Zelaya y Guillén, 2002). La adición de nutrientes al ecosistema cuando se corta y quema el bosque tiene un impacto significativo sobre el suelo (Nye y Greenland, 1960), a veces reconocido como efecto de fertilización inicial.

El efecto del fuego sobre las propiedades del suelo se da principalmente como una reducción del contenido de materia orgánica y de la saturación de acidez, asociado a un aumento en la suma de bases cambiables, lo que también puede acelerar la erosión del suelo descubierto y la volatilización de algunos elementos. De manera negativa, la quema del bosque se relaciona con un aumento en la erosión de suelos al reducirse la cobertura del mismo, fenómeno que va asociado con pérdida de nutrientes y retardo del crecimiento inicial en plantaciones. Hartemink (2003) menciona que como resultado de la quema, además disminuye la capacidad de infiltración del agua en el suelo, debido al bloqueo de los poros en la superficie del suelo, así como a que se eleva la hidrofobicidad del suelo, es decir, disminuye la afinidad entre las moléculas de agua y las partículas del suelo.

La adición de nutrientes en bosques por quema controlada es poca y puede variar según la intensidad calórica del fuego entre 0.58 y 1.14 t/ha (Zelaya y Guillén, 2002). Es preferible realizar las quemas durante los momentos del día en que haya menos viento, de manera que se pueda controlar mejor el proceso y se reduzcan las pérdidas de ceniza por el viento. La cantidad de ceniza, y los nutrientes asociados, que cae al suelo como resultado de la quema total del bosque es muy variable y oscila entre 1.2 y 12.1 ton/ha, dependiendo del tipo y edad del bosque y del sustrato en el que haya crecido el mismo. Es notorio que la cantidad de N, Ca, Mg y K adicionados es mayor que la de Fe, S, P y Mn, con cantidades de Zn, Cu y B aún muy inferiores.

Szott, Fernández y Sánchez (1991) mencionan que no todos los nutrientes asociados a la ceniza depositada después de la quema del bosque son aprovechados por la vegetación subsiguiente, ya que una buena parte de los mismos se pierde a través del ciclo hidrológico (lixiviación, erosión, escorrentía) o intercambio gaseoso. La cantidad de nutrientes perdidos depende del tipo de suelo, en tanto que determina el proceso de reciclarlos/lixiviarlos y en general la velocidad de los procesos de pérdida de nutrientes. Cuanto más arenoso sea el suelo menor es su capacidad de intercambio de cationes, lo que facilita la pérdida de los nutrientes asociados a la ceniza proveniente de la quema.

Ewel et ál., (1981), al quemar un bosque secundario del bosque tropical húmedo, encontraron pérdidas por volatilización de 1600 g/m^2 de C, 49 g/m^2 de N y 13 g/m^2 de S, con pérdidas por erosión eólica y lavado de 34 g/m^2 de N, 20 g/m^2 de K, 1 g/m^2 de P, 39 g/m^2 de Ca y 7 g/m^2 de Mg. En el momento de la quema del bosque, la cantidad total de S en la biomasa puede alcanzar valores de 5 kg/ha (asumiendo un contenido de 0.1% y una biomasa de 500 g/m^2), cantidad similar a la que se deposita por efecto de lluvia y aerosoles, por lo que su volatilización no es relevante para el establecimiento de bosques o nuevas plantaciones forestales en el mismo ecosistema (Sarmiento, 1984).

5. Efectos en el suelo causados por el reciclaje de residuos

Las propiedades del suelo de un sitio tienen un efecto directo sobre el crecimiento de las especies maderables y también sobre su habilidad para restaurar la fertilidad del suelo. Sin embargo, la contribución de los nutrientes liberados de los residuos para el mantenimiento sostenido de plantaciones forestales también depende de otros factores como son el efecto de la maquinaria de extracción sobre la estructura del suelo, las condiciones necesarias para la regeneración del bosque y los efectos del pastoreo sobre los terrenos recién explotados (Grubb, 1995).

En plantaciones forestales tropicales y en bosques naturales, la dinámica del C y de los nutrientes se logra a través de dos procesos principales: 1) la absorción de nutrientes del suelo por la vegetación y 2) las salidas de nutrientes, incluyendo la remoción de la vegetación y retorno como residuos, lavado por la lluvia y secreción y descomposición de las raíces. La cantidad envuelta en este proceso depende de la especie, el tipo de suelo, el clima, la edad del árbol y los aspectos de manejo de la plantación (Akinifesi, Tian y Kang, 2002). Bajo condiciones de plantaciones forestales en los trópicos, los cambios de las propiedades químicas del suelo pueden ser negativos, aunque varios estudios reflejan un incremento de

la fertilidad del suelo con el tiempo (Hartemink, 2003). En términos de nutrientes, puede ocurrir que las entradas al sistema sean iguales a las salidas (estado de equilibrio), que entren menos nutrientes de los que salen (estado de acumulación), o que salgan más que los que entran (estado de pérdida). La determinación de la situación particular se realiza a través de estudios de balance de nutrientes, los cuales deben hacerse en períodos de tiempo de más de 10 años de duración.

En un estudio con plantaciones puras y mixtas de *Stryphnodendrum excelsum*, *Vochysia ferruginea*, *Vochysia hondurensis* y *Hyeronyma alchorneoides*, llevado a cabo en el trópico húmedo de Costa Rica, Montagnini y Sancho (1994) encontraron que el requerimiento de nutrientes de cada una de estas especies es diferente y que las cantidades de cada uno de ellos en el tronco, las hojas y las ramas también es diferente. El requerimiento de N de *S. excelsum*, el de Ca de *V. ferruginea* y el de K de *H. alchorneoides* duplican el requerimiento por esos elementos de las otras especies comparadas. Montagnini (2000) encontró que la cantidad de nutrientes asociados a la biomasa en rodales mixtos y en los de *Terminalia amazonia* son mayores que los encontrados en rodales puros de las mismas especies, concluyendo que esta es una ventaja ecológica comparativa de sobrevivencia y que permite un turno de corta espaciado en el tiempo (las especies llegan a su madurez a tiempos diferentes); además la biomasa de ramas y follaje constituyó entre el 25 y el 35% de la biomasa total, pero contribuyó con un 50% de los nutrientes arbóreos totales.

El efecto que tiene el crecimiento del bosque secundario en sus diferentes etapas de sucesión sobre las propiedades del suelo está íntimamente relacionado con otras variables que afectan al crecimiento del bosque, principalmente de tipo bioclimático. Las especies forestales que crecen en el trópico húmedo son diferentes a las que dominan el paisaje en el trópico seco y los cambios que estas especies producen sobre el suelo, también son diferentes, principalmente en magnitud.

El cambio en vegetación acarrea una mejora de las propiedades químicas y físicas del suelo a través de los siguientes mecanismos: 1) adiciones de materia orgánica al ecosistema; 2) fijación biológica de N por parte de especies arbóreas leguminosas; 3) capacidad de almacenamiento y reciclaje de grandes cantidades por parte de los árboles; 4) efecto de moderación del microclima por los árboles; 5) la rizosfera de los árboles favorece el reciclaje y la disponibilidad de nutrientes, y 6) la adición vía goteo de nutrientes acumulados en la superficie de las hojas. La mayoría de estos cambios se presentan en la superficie del suelo, en donde se encuentra la mayor parte de la biomasa aérea y subterránea del bosque, se acumulan y mineralizan los detritos vegetales que llegan al suelo y se concentra la mayor actividad microbiana (Alexander, 1973; Alfaro, Alvarado y Cháverri, 2001).

6. Balance de nutrientes en plantaciones y bosques

Reponer los nutrientes que salen del ecosistema es imperativo, en particular en plantaciones de ciclo corto diseñadas para plantar los árboles que consumimos (Yamada et ál., 2004). Los autores documentan cómo plantaciones de *Acacia mangium*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus grandis* extraen cantidades apreciables de nutrientes asociados a la madera (75-236 kg N/ha, 4-49 kg P/ha, 37-217 kg K/ha y 54-215 kg Ca/ha), los cuales no pueden ser repuestos por los procesos naturales de meteorización o deposición atmosférica y, por tanto, deben reponerse a través de la adición de fertilizantes.

Spagenberger y Fölster (2002) consideran los balances de nutrientes como una herramienta útil para describir la dinámica de la nutrición de las plantaciones forestales. Ilustran la pérdida de nutrientes asociada a la exportación del producto cosechado (pérdidas de exportación), las pérdidas de nutrientes asociadas a prácticas de manejo durante y después de la cosecha (pérdidas de transformación) causadas por la quema de residuos, erosión y lavado, pérdida de nutrientes que debe balancearse con su adición por otros mecanismos. En este sentido, el manejo de nutrientes debe cubrir los siguientes aspectos de la dinámica de la nutrición: 1) cuantificación de las pérdidas y su compensación para lograr una producción sostenida; 2) ahorro y mantenimiento de nutrientes dentro del ciclo de producción, tanto como sea posible y 3) optimización de los fertilizantes aplicados.

El contenido de nutrientes disponibles en el suelo hasta una profundidad de 1 m se calcula sumando los parámetros que se deseen utilizar (por ejemplo, los contenidos de Ca, Mg, K, P, etc.) en función de los diferentes horizontes del suelo involucrados, con lo que se logra caracterizar el sitio y generar el concepto de nivel base de nutrientes. De esta manera, para que el sistema se encuentre en estado de equilibrio, en relación al contenido de nutrientes, debe cumplirse con la ecuación (Mackensen, 1999):

$$\text{Entrada de Nutrientes} = \text{Salida de Nutrientes}$$

El contenido de nutrientes puede ser positivo o negativo, según sea que su entrada sea mayor o menor que su salida. Una vez que se hace el balance de nutrientes de un sistema (plantación), si este es negativo, deben adicionarse los nutrientes que estén por debajo del nivel original, lo que se conoce como compensación por pérdida de nutrientes; en este quehacer, debe recordarse que algunos elementos que se exportan del sistema tales como el Fe, Mn y Al, no

requieren ser repuestos, pues normalmente estos elementos se encuentran en cantidades apreciables en el sistema y su reposición más bien podría ser perjudicial. En capítulos subsiguientes, se discute sobre algunos aspectos que determinan que la reposición de los nutrientes sea eficiente, por lo que se reserva para ese entonces discutir aspectos como tipo de fertilizantes, eficiencia de uso del fertilizante y corrección de la acidez del suelo; además, queda por discutir cómo reponer, por ejemplo, 1500 g N/árbol en un turno de corta, todo en función de las condiciones fisiológicas que determinan su absorción.

Diagnóstico de la nutrición en plantaciones forestales

1. Requerimientos nutricionales de los árboles

Al igual que para cualquier otro tipo de plantas, los requerimientos nutricionales de los árboles maderables son: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), cobre (Cu), cloro (Cl), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn) y molibdeno (Mo), los cuales son absorbidos en medio líquido (agua), más carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) que son tomados del aire a través de la fotosíntesis y del agua del suelo. Muchos de esos elementos los suple el suelo sin problema, excepto los que el árbol requiere en cantidades apreciables en momentos específicos de su crecimiento y que pueden adicionarse como fertilizante para llenar las exigencias del mismo. En la mayoría de los textos generales de nutrición y fertilización de árboles, tiende a discutirse el efecto de adicionar varios nutrientes en conjunto, aunque es factible encontrar artículos que tratan exclusivamente con un elemento determinado, tal es el caso del P (Ballard, 1980) y del B (Stone, 1990).

Cuando se presentan síntomas agudos de deficiencia, es importante conocer si el elemento se recicla de hojas viejas a las jóvenes. Si un elemento es inmóvil la deficiencia aparece, primero, en hojas jóvenes, mientras que si es móvil en el interior de la planta la deficiencia se observa en hojas viejas. Se consideran elementos móviles N, K, Mg, P, Cl, Na, Zn y Mo, e inmóviles Ca, S, Fe, B y Cu.

El elemento que más limita el crecimiento de los árboles en plantaciones en todo el mundo es el N, aunque en regiones tropicales el P puede ser igualmente limitante (Sarmiento, 1984) debido a que los suelos pueden reternerlo fuertemente y a que durante la estación seca su movimiento en el suelo y absorción por las plantas es reducido. Bajo condiciones particulares, puede encontrarse extensiones apreciables de plantaciones forestales afectadas en su crecimiento por deficiencias de elementos menores, caso del B en plantaciones de coníferas en Andisoles de Colombia (Ladrach, 1980b; Castaño y Quiroga, 1990), de coníferas y eucaliptos

en Andisoles de Chile (Stone, 1990) y de eucalipto en Oxisoles de las sabanas de África (Mackensen, 1999), o por la toxicidad de otros elementos relacionados con la acidez del suelo. Por lo anteriormente mencionado, los fertilizantes comerciales incluyen principalmente N-P-K y en algunas ocasiones B-Mg-Zn.

Algunos autores mantienen que las especies arbóreas forestales tienen un sistema de absorción de nutrientes extensivo, en vez del sistema intensivo de los cultivos agrícolas, y que por esa razón no dependen tanto de la adición de fertilizantes. Si este fuera el caso, no debería aplicarse nutrientes a las especies arbóreas de frutales las que, aunque menos espaciadas que los árboles forestales, responden en forma espectacular a la adición de fertilizantes (Nwoboshi, 1975).

No todos los árboles tienen el mismo comportamiento cuando de necesidades nutricionales se trata ya que existen marcadas diferencias entre especies forestales. Es normal que las especies arbóreas de crecimiento rápido tengan requerimientos nutricionales más elevados que aquellas de crecimiento lento. También es cierto que la cantidad de nutrientes que se extraen en el producto cosechado, por ejemplo madera, sean mayores en este último tipo de especies. Todo lo anterior está íntimamente ligado a las características fotosintéticas de cada especie forestal, como lo mencionan López et ál., (2001).

2. Estado nutricional de los bosques o plantaciones forestales

Conocer el estado nutricional de un bosque o plantación forestal, requiere de un inventario que permita entender, además de la fertilidad del ecosistema, todas las condiciones que puedan alterar el mecanismo normal de absorción de nutrientes por parte del árbol. El conocimiento adquirido a través de un inventario ayuda a determinar si la presencia de un problema la provoca o aumenta la aparente escasez de nutrientes, o si por el contrario, es causada por algún otro tipo de factor.

2.1. Variables edáficas asociadas a la absorción de nutrientes

Las características edáficas se ven fuertemente afectadas por el impacto que ejercen actividades en la plantación como la cosecha de los árboles, la preparación del sitio para la siembra, la fertilización inicial y el control de malezas. Estas prácticas afectan la estructura del suelo, causan compactación y pueden reducir el crecimiento de los árboles, al aumentar la resistencia del suelo a la penetración de raíces, reducir la aereación y cambiar los flujos de agua, calor y disponibilidad de nutrientes.

Temperatura del suelo: La absorción de nutrientes por el árbol es lenta en suelos fríos, lo que eleva la posibilidad de encontrar deficiencias nutricionales en suelos en los que la cantidad disponible de nutrientes es limitada. Este problema ocurre porque la difusión de los elementos en el suelo es lenta y la actividad radical es reducida. Cuando la temperatura del suelo es elevada, puede ocurrir una disminución del crecimiento de las raíces y hasta la muerte de las más finas, por lo que también se reduce la velocidad de absorción de nutrientes. En zonas tropicales bajas y calientes, la recirculación de nutrientes de especies caducifolias es muy rápida y compensa la baja fertilidad de los suelos; por el contrario, en las montañas el proceso de descomposición se ve limitado por la baja temperatura y la menor actividad biológica (Salas, 1987).

pH del suelo: La condición ácida del suelo reduce la disponibilidad de calcio (Ca), magnesio (Mg), molibdeno (Mo) y fósforo (P) pero aumenta la disponibilidad de hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B), cobre (Cu) y zinc (Zn), como ocurre en la mayoría de los suelos rojos, arcillosos muy meteorizados (Ultisoles y Oxisoles) de las regiones tropicales húmedas. La mayor disponibilidad de nitrógeno (N) ocurre a pH entre 6.0 y 7.0. En regiones tropicales húmedo-secas donde se encuentran Alfisoles y Vertisoles, el pH del suelo suele ser mayor a 6.5, elevándose la disponibilidad de elementos como el Ca, el Mg y el potasio (K) pero reduciéndose la disponibilidad de elementos menores como el Zn, B y azufre (S).

Salinidad: Bajo condiciones de baja precipitación, se presentan suelos muy secos a menudo clasificados dentro del orden Aridisoles, en los cuales se pueden presentar acumulaciones de sales solubles y sodio (Na), las cuales afectan negativamente el desarrollo de muchas especies forestales. Este problema también se asocia a mal manejo del riego (utilización de agua de riego de baja calidad y/o falta de canales de drenaje) y a la presencia de suelos con tabla de agua alta.

Condiciones de humedad: Las condiciones de sequía causan que elementos como el B, Zn, Cu, K y P sean menos asequibles al sistema radical que otros. El bronceamiento (deficiencia de Mg) y el amarillamiento de la hojas de la parte inferior de la copa hacia arriba (deficiencia de N), son problemas que se asocian comúnmente a períodos de sequía. Novais et ál., (1990) documentan cómo la absorción de P y el crecimiento del sistema radical del eucalipto se reducen significativamente, aún cuando los suelos se encuentran a capacidad de campo. En el otro extremo, cuando los suelos son mal drenados, los elementos como el Fe y el Mn, que son fácilmente reducibles, pueden llegar a alcanzar niveles de toxicidad para especies forestales no adaptadas a dichas condiciones. En el trópico

húmedo el crecimiento de los árboles es casi continuo, por lo que su ritmo de crecimiento se ve más afectado por déficits de humedad que por las estaciones del año; sin embargo, es difícil asociar cambios en concentración de nutrientes al déficit de humedad, ya que este va comúnmente asociado a otros factores climáticos como radiación solar, temperatura y humedad (Brunck, 1987).

2.2. Variables de manejo silvicultural

Identificación y control de malezas: Algunas malezas son más agresivas que otras, en particular durante los años de establecimiento de la plantación por lo que deben ser controladas, sea con herbicidas o en forma mecánica. Las malezas compiten con los árboles por agua, luz, aire y nutrientes y en algunos casos pueden liberar sustancias que inhiben el crecimiento de los árboles. El control mecánico de las malezas (motoguadañas) muy a menudo se asocia a la estrangulación de árboles recién trasplantados y la quema por herbicidas aplicados a plantaciones vecinas también tiene síntomas que debe aprenderse a reconocer, antes de atribuírselos a deficiencias nutricionales.

Prácticas de labranza: Cuando las plantaciones se realizan sobre terrenos anteriormente cultivados o dedicados a la cría de ganado, es común encontrar capas compactadas sea por el uso de la maquinaria o por el pisoteo del ganado, problema que a menudo induce a deficiencias nutricionales al impedir el crecimiento normal de las raíces. Este tipo de problema puede resolverse con una labranza profunda, de preferencia a realizarse en la banda donde se van a sembrar los árboles y nunca en la entrecalle después de que estos han sido sembrados.

Espaciamiento de la plantación: Esta variable debe calcularse de forma tal que permita maximizar la utilización de agua, luz y nutrientes por parte de los árboles, respetando la arquitectura de la especie a plantar. La competencia inter- e intraespecífica, si bien tiende a favorecer un tipo de desarrollo deseado del tronco del árbol, también puede conducir a favorecer nichos especiales para el desarrollo de enfermedades y plagas, y además a elevar la necesidad de aplicar nutrientes del suelo para mantener el crecimiento deseado.

Podas y raleos: La adición de residuos, producto de la poda o del raleo en plantaciones forestales, tiene un efecto de adición de nutrientes asociados a la mineralización del material orgánico, pero también puede causar una inmovilización biológica de nutrientes causada por fijación biológica de los microorganismos que descomponen el mismo material.

Extracción de madera: El proceso de extracción de la madera conlleva la apertura de caminos, actividad que tiene efectos profundos sobre las propiedades físicas y químicas del suelo entre las que sobresalen: 1) la infiltración, 2) compactación (aumento de la densidad aparente), 3) hidrología (decrece la retención de humedad y la conductividad hidráulica), 4) calidad del agua, y 5) pérdida de nutrientes (Lang, 2000; Arce, 2003). Los caminos de extracción de madera son la principal causa de pérdidas de suelo por erosión (con los nutrimentos ligados a las partículas de suelo), debido a que tienen una superficie muy compactada (lo que redundaría en una mayor escorrentía), las cunetas no están revestidas y concentran el flujo lento del agua para convertirlo en uno con velocidad erosiva, comúnmente no tienen recolectores de agua y causan la formación de cárcavas en sus márgenes.

3. Deficiencias nutricionales

Causas: Las principales causas de las deficiencias nutricionales pueden resumirse, de acuerdo con Evans (1992), de la siguiente manera:

- Suelos pobres de cualquier tipo, por ejemplo: arenosos, erosionados o formados a partir de desechos humanos.
- Reciclaje de nutrientes inadecuado en suelos infértiles; por ejemplo, puede ocurrir una acumulación excesiva de residuos que tiende a inmovilizar una cantidad grande de nutrimentos sobre el suelo.
- Deficiencias nutricionales inducidas por otros factores tales como:
 - o Lavado de nutrientes en áreas muy lluviosas.
 - o Muy poca lluvia, lo que causa deficiencias durante la época seca.
 - o Sobreencalado induciendo deficiencias de Fe y Mn.
- Efectos del pH del suelo como precipitación de P en suelos alcalinos o como P-Al y/o P-Fe en suelos ácidos, ó retención del mismo elemento en arcillas de bajo rango de cristalización.
- Interacción con otros nutrientes. Los niveles de un nutrimento pueden afectar los requerimientos de otros, de manera notable las relaciones N-P y P-K. La aplicación de P como fertilizante puede inducir una deficiencia de K, cuando en condiciones naturales la deficiencia de K no existía, cosa que no ocurre cuando se adicionan los dos elementos al mismo tiempo.
- Pobre o inexistente asociación con micorrizas o pobre nodulación en árboles fijadores de N.
- Demasiada competencia con malezas.
- Siembra de especies en sitios inadecuados, por ejemplo *Leucaena leucocephala* en suelos con pH menor a 5.

Ocurrencia: La ocurrencia de deficiencias nutricionales puede deberse: 1) a los diferentes estadios de crecimiento del árbol o 2) a las interacciones entre el suelo, el sitio y las especies arbóreas. En el primer caso puede acotarse que la dinámica de los nutrientes en una plantación cambia conforme el árbol crece ya que pasa de un estado de desarrollo a otro; sin embargo, es más común que las deficiencias se presenten durante el primer estado de crecimiento, a los pocos meses después de establecida la plantación debido a que:

- Durante las primeras semanas las plántulas no muestran la deficiencia sino hasta que dejan de obtener nutrientes que se les aplicó en el vivero.
- Una vez establecidas, período que toma de unas semanas a pocos meses, las plántulas inician un proceso de crecimiento acelerado en altura, número de ramas, superficie foliar y sistema radical, lo que aumenta la necesidad de nutrientes.
- Casi no se da un reciclaje de nutrientes en el suelo, lo que no ocurre sino hasta que se desarrolle la corona.
- Las raíces que se desarrollan pueden no ser suficientes para competir con las malezas, en particular cuando la micorrización es pobre o se presentan barreras de orden físico del suelo.

En el segundo caso, son muchos los factores que pueden afectar la disponibilidad de los nutrientes, por lo que es difícil predecir cuándo estas se van a producir. Normalmente solo la experiencia en cada sitio permite conocer cuándo la falta de crecimiento se debe a un factor de este tipo (por ejemplo, la falta de agua puede causar deficiencias de N o poca absorción de P).

Síntomas: Los síntomas visuales más comunes incluyen 1) cambios en el tipo de crecimiento, 2) de color de los tejidos y 3) en la anatomía del árbol. Cuando las deficiencias nutricionales son severas, se desarrollan síntomas visibles en las hojas, tales como baja producción de follaje, crecimiento lento del árbol, malformaciones como crecimiento en tipo de roseta (deficiencia de B), aborto de semillas y flores, muerte descendente, hojas torcidas o simplemente un amarillamiento aparente. Naturalmente, los síntomas visuales varían según la especie y los cambios climáticos y a menudo se manifiestan asociados a daños causados por insectos, hongos y sequía, lo que dificulta su interpretación. Aunque algunos síntomas pueden relacionarse con la deficiencia de algún elemento en particular, se recomienda realizar el análisis foliar para corroborar la deficiencia (Cannon, 1983a, Fisher y Binkley, 2000) y se describen en varios documentos para coníferas y especies latifoliadas (Zöttl y Tschinkel, 1971; Cannon, 1983b). En forestería tropical deben establecerse diferencias de tolerancia a condiciones

adversas entre especies de ciclo de crecimiento corto, medio y largo; se consideran como de ciclo corto *Eucalyptus*, *Gmelina* y *Pinus*, de ciclo medio especies como *Cedrela*, *Terminalia*, *Aucoumea*, *Triclochiton scleroxylon*, *Araucaria* y *Agathis*, y por último como de ciclo largo especies como teca, caoba (*Khaya* y *Entandophragma* spp.), *Chlorophora excelsa* y *Acacia* (Brunck, 1987).

De acuerdo con INPOFOS (2003), los síntomas causados por plagas (insectos, nemátodos y ácaros) y las enfermedades (hongos, bacterias y virus) pueden ser confundidos con síntomas de algunas deficiencias nutricionales. En el caso de los síntomas causados por enfermedades, el daño se puede diferenciar del causado estrictamente por deficiencias nutricionales porque: 1) las deficiencias nutricionales son generalizadas mientras que en el caso de las enfermedades los síntomas ocurren en manchas o plantas aisladas, 2) los síntomas de deficiencias nutricionales presentan una gradiente de intensidad en las hojas que, dependiendo del elemento, se intensifica de las hojas viejas a las nuevas, cosa que no ocurre en el caso de las enfermedades y 3) los síntomas de deficiencias nutricionales son simétricos y aparecen en pares de hojas opuestas o adyacentes.

Diagnóstico: Uno de los principales problemas asociados al manejo de la fertilización de una plantación consiste en encontrar el mejor método de diagnóstico para determinar los factores que más limitan la producción. Se pueden emplear varias técnicas para reconocer deficiencias de nutrientes en plantaciones forestales, entre las cuales sobresalen: 1) Síntomas visuales en las plantas; 2) Pruebas de invernadero; 3) Ensayos de campo (para determinar tipos y cantidades de fertilizante, necesidad de encalado, definición del método estadístico a utilizar, etc.); 4) Plantas indicadoras en el campo; 5) Análisis químico y físico de suelos (diferentes metodologías, profundidades de muestreo, definición de niveles críticos, etc.); 6) Análisis de tejidos (diferentes metodologías, definición del tejido a muestrear, definición de niveles críticos, etc.) y 7) Mapas de suelos (sitios). A continuación, se discuten los métodos de síntomas visuales, de análisis de suelos y de análisis de tejidos; las pruebas de invernadero no se discuten debido a la dificultad que tiene el comparar los resultados que se generan con las condiciones reales de campo; la utilización de plantas indicadoras es poco confiable y el uso de mapas de suelo ya se discutió en el capítulo sobre índices de sitio.

4. Métodos de diagnóstico nutricional

4.1. Análisis foliares

Definición: Se entiende por análisis foliar aquel que se utiliza para determinar la concentración total de los nutrientes minerales presentes en las agujas y hojas de los árboles y se utiliza con frecuencia debido a que es un análisis rápido de hacer. Con los resultados obtenidos con este tipo de análisis y su relación con las variables de crecimiento de los árboles, se pueden definir los niveles de carencia, crítico, óptimo, de consumo de lujo y de toxicidad para cada especie.

Los árboles que sufren de deficiencia tienen concentraciones menores que la normal en el tejido analizado, como consecuencia de una suplencia inadecuada de algún nutrimento; por el contrario, cuando las concentraciones son muy elevadas, esto puede implicar toxicidad o intoxicación con el mismo elemento. A pesar de que existe una correlación generalizada entre la concentración promedio foliar de nutrientes y la biomasa total, no existe una relación simple entre la concentración foliar de nutrientes y el contenido de los nutrimentos en el bosque, porque estos pueden tener concentraciones similares en el tejido vivo y cantidades muy diferentes en el mecanismo de reciclaje interno. Se ha encontrado que una especie en particular puede no mostrar diferencias apreciables en la concentración foliar de nutrientes cuando crece en suelos con una marcada diferencia en disponibilidad de nutrientes, lo que dificulta el empleo de métodos de rutina establecidos, a no ser que se calibren para cada una de las especies (Grubb, 1995).

Factores que lo afectan: Varios autores (Zöttl y Tschinkel, 1971, Cannon, 1983a, Brunck, 1987, Bonneau, 1988, Evans, 1992, Fisher y Binkley, 2000) consideran importante observar ciertas reglas cuando se toman muestras para análisis foliar, teniendo en consideración que los contenidos de nutrientes en el follaje varían con la estación (período del año), con las variaciones climáticas de un año a otro, el desarrollo del tejido foliar (edad de la hoja), su posición en la copa del árbol, la clase diamétrica de los árboles, la variación natural entre los árboles de la plantación y la competencia y sanidad del árbol en el rodal.

Niveles críticos foliares: Se entiende por nivel crítico foliar, el contenido de un elemento en las hojas que parece necesario para asegurar el buen crecimiento del árbol (Stuhrman et ál., 1994). Para cada nutrimento, pueden determinarse los niveles de deficiencia, suficiencia y toxicidad, tomando muestras de tejido proveniente de árboles vigorosos, creciendo en sitios o parcelas de crecimiento diferente. Este método de diagnóstico, se basa en las correlaciones existentes

entre el contenido de elementos en las hojas, acículas o escamas de los árboles y su tasa de crecimiento, estimada como incremento medio en altura, diámetro o volumen, las cuales normalmente son de tipo cuadrático y descansan en la ley del mínimo de Liebig que establece que el crecimiento está determinado por el factor (nutriente) que se encuentre en menor disponibilidad.

La concentración de nutrientes entre tejidos del árbol es grande y difiere entre los varios componentes de la biomasa. De esta manera, la mayor acumulación de nutrientes se espera ocurra en la parte más rica de la corona de los árboles durante los primeros años de la rotación. Una vez que se cierra el dosel, la demanda por nutrientes disminuye, ya que se requiere absorberlos mayormente para la producción de madera. En pinos, a pesar de que la biomasa foliar representa tan solo el 15% del total de la biomasa, los nutrientes asociados a esta fracción representan el 48% del P y el 59% del Ca, mientras que la madera cosechada representa el 70% de la biomasa total y tan solo contiene el 37% del P y el 20% del Ca (Waterloo, 1994), por lo que la extracción y reposición posterior de nutrientes del ecosistema en este tipo de plantaciones es poca.

Es necesario conocer la variación estacional de los nutrientes en las hojas para definir el mejor momento en que este tejido debe muestrearse, logrando coleccionar hojas con alta concentración de nutrientes y bajo coeficiente de variación (Vidal et ál., 1984). Bajo condiciones naturales en ecosistemas tropicales distróficos con época seca definida, los árboles disminuyen a la mitad o la tercera parte de la concentración de N, K, P y S y un aumento del contenido foliar de Ca desde que se inicia el desarrollo de las hojas hasta la mitad de la estación seca, mientras que el contenido de Mg primero aumenta y luego disminuye durante el mismo período, de manera que los valores más bajos se encuentran en enero (época seca) y los más elevados en junio-julio (época de mayor actividad de crecimiento); los cambios observados se atribuyen principalmente al lavado de nutrientes durante la época lluviosa y la translocación de los mismos desde el final de la misma época y durante parte de la época seca (Sarmiento, 1984). Bajo condiciones similares, al inicio de la época de lluvias, también es factible encontrar un aumento de la concentración foliar de nutrientes debido a la mineralización rápida de la materia orgánica acumulada en el ecosistema durante la estación seca, efecto pasajero pues, al igual que cuando se adicionan fertilizantes en plantaciones, el efecto de dilución y lavado lo hace desaparecer rápidamente. Birkelbach et ál., (1996) demuestran que las pocas correlaciones obtenidas entre la concentración de nutrientes disponibles en el suelo y la concentración de los mismos en el tejido foliar en 5 especies del bosque montano bajo de Costa Rica, solo se encuentra durante la estación lluviosa y nunca durante la estación seca, lo que atribuyen a que, entre otras, las especies se mantienen por

un período dominante de 9 meses de estación lluviosa, cuando además pueden explorar capas húmedas del subsuelo.

De acuerdo con Drechsel y Zech (1994), los valores foliares de los diferentes elementos utilizados como punto de referencia tienen un valor limitado ya que a menudo se presentan deficiencias múltiples y varias interacciones fisiológicas entre los elementos, asociados además a efectos de dilución y a problemas de muestreo relacionados con la época y la posición en el árbol de la muestra a analizar. El nivel crítico de un elemento en la planta, depende de que los demás nutrientes hayan sido proporcionados en forma adecuada, ya que la deficiencia de otro elemento puede alterar el nivel crítico del primero en consideración y varían en el follaje según su edad y con la procedencia del material genético.

Como el contenido foliar de nutrientes representa el resultado de la extracción, absorción, translocación y utilización de los nutrientes del suelo por la planta a través del tiempo, normalmente este contenido correlaciona bien con el desarrollo y el vigor del árbol (Cannon, 1983a). Sin embargo, el análisis foliar no siempre es un buen método para predecir la respuesta a la aplicación de fertilizantes en el área forestal, debido principalmente a errores de muestreo, o cometidos en el laboratorio al realizar los análisis o a variaciones del contenido foliar de nutrientes de las hojas causadas por variables ambientales como el mal drenaje.

Muestreo: En general, Brunck (1987) recomienda tomar las muestras foliares en: 1) los períodos de máxima actividad fisiológica del árbol (por ejemplo, al inicio de la formación de hojas o 4 semanas después del inicio de las lluvias); 2) tomar las primeras hojas totalmente desarrolladas (máxima estabilidad de la concentración, siguiendo el protocolo de muestreo para cada especie); 3) en especies deciduas, muestrear bastante antes de que se inicie su caída; 4) de la parte más alta (iluminada) de la copa y 5) preferiblemente de árboles dominantes o co-dominantes (mayor diámetro). Para disminuir el efecto de la variación genética de los individuos, la muestra debe ser compuesta y tomada de un promedio de 10-20 árboles para cada sitio, rodal o parcela. Las muestras, de aproximadamente medio kg de peso, deben conservarse en bolsas de plástico oscuro, no exponerse a temperaturas elevadas y ser transportadas con la mayor brevedad posible al laboratorio (entre 1 y 3 días).

Para realizar los análisis foliares, se recomienda tomar anualmente muestras compuestas de 10-20 árboles y que contengan unas 100 hojas o 1000 agujas (15-20 g hojas frescas/árbol). Se prefiere tomar las hojas más recientes completamente desarrolladas y en especies resinosas cuando los árboles entren en un período de reposo. En sitios donde se mantengan parcelas permanentes de monitoreo, estas pueden utilizarse para muestreos, dado que los valores de concentración pueden

correlacionarse con las variables de crecimiento estimadas. Dependiendo de la especie, los tejidos a muestrear pueden tomarse en varias partes de la copa de los árboles, siempre y cuando se encuentren en posiciones iluminadas. Deberán evitarse árboles dañados (insectos, plagas, rayería, etc.) y en la planilla de muestreo deberán anotarse las observaciones necesarias relacionadas con el crecimiento de los árboles (p.ej., año muy seco-lluvioso, incendios, huracanes, etc.).

En casos específicos para obtener diferencias significativas de los datos de laboratorio menores al 10% con relación a la media en *Eucalyptus deglupta*, se requiere muestrear 147 árboles en el caso del contenido de Ca, 37 para los elementos menores y 4 para N y P; en *Terminalia superba*, se recomienda muestrear 12 árboles si solo se va a estimar el contenido de elementos mayores (Brunck, 1987).

Interpretación: Para poder comparar los niveles foliares de nutrientes encontrados en un sitio particular, se han desarrollado resúmenes de valores publicados en varios países, similares a los desarrollados por Drechsel y Zech (1991) y Boardman et ál., (1997) para diferentes especies. El uso de varias herramientas para basar la recomendación de fertilización a efectuar es conveniente, incluyendo como herramienta el conocimiento local sobre el crecimiento de la especie que tengan los lugareños. La utilización del análisis de componentes principales o de discriminantes puede ser de utilidad, aunque no identifican efectos causales mientras que los análisis multivariados (regresión múltiple y el análisis de factores) pueden generar información valiosa aunque difícil de obtener; por estas razones, la mejor alternativa es utilizar técnicas flexibles que se adapten a problemas específicos que consideren conocimientos de fisiología y resultados experimentales relevantes (Brunck, 1987).

4.2. Curvas de absorción

Bertsch (2003) discute y documenta la técnica conocida como «absorción de nutrientes» o «curvas de absorción», la cual permite: 1) estimar la extracción total de nutrientes por parte de una especie, 2) cuantificar los requisitos nutricionales de un turno de cosecha, 3) estimar la cantidad de nutrientes que se recicla a través de los residuos, 4) justificar aplicaciones mínimas de nutrientes y 5) restituir nutrientes en sistemas orgánicos. Las curvas de absorción de nutrientes, se calculan multiplicando la concentración de cada elemento por el peso seco de la biomasa de cada tejido del árbol y sumando estos valores (también expresados como cantidad total absorbida por hectárea, si se multiplican los valores por el

número de árboles en la hectárea). En el caso de plantaciones forestales, la metodología descrita concuerda con el muestreo de árboles promedio, mientras que para lograr una mejor determinación, se sugiere utilizar la metodología de muestreo de árboles estratificados por clases diamétricas (Kaul et ál., 1979); sin embargo, debe considerarse que este último método es más costoso en tiempo y en análisis de laboratorio. Normalmente, para calcular el máximo de nutrientes que una especie puede absorber, estos estudios deben realizarse en los mejores sitios, de manera que si se repone esta cantidad de nutrientes en cualquier otro ecosistema, se estaría manteniendo el balance ecológico.

La tasa de acumulación de nutrientes en una plantación forestal depende de la tasa de producción de biomasa, del estado de desarrollo de la plantación, la disponibilidad de nutrientes en el suelo y la especie forestal en consideración. Debido a lo largo del período de rotación de la plantación, normalmente no es posible monitorear una plantación desde el período de inicio hasta su cosecha, por lo que, en forma alternativa, se utilizan series de tiempo falsas (árboles de plantaciones de diferente edad), en las cuales los factores ambientales de cada plantación estudiada son similares, en particular el tipo de suelo, procurando que los sitios de estudio incluyan los períodos de acumulación de biomasa y nutrientes más importantes, entre otros, los períodos juvenil, intermedio y de madurez de la plantación. Lo anteriormente mencionado es cierto, siempre y cuando no se presenten situaciones que afecten negativamente la distribución de los diferentes componentes de la biomasa en la plantación o el bosque, como puede ocurrir cuando se presenten incendios forestales (Zelaya y Guillén, 2002) o huracanes (Waterloo, 1994).

En la figura 1 se observa que la cantidad total de nutrientes absorbida por *T. grandis* *P. caribaea*. Indiferentemente de la edad de la plantación, los requerimientos nutricionales de *T. grandis* son al menos 20 veces más que los requeridos por el *P. caribaea* y *T. grandis* absorbe más K que ningún otro elemento, mientras que *P. caribaea* requiere desde su inicio más nitrógeno que los demás elementos para producir la misma cantidad de madera y en un mismo período de tiempo. De esta manera, la teca requiere de suelos mucho más fértiles que el pino para llenar sus necesidades fisiológicas, mientras que el pino muestra una capacidad de adaptación a suelos infértiles muy superior a la adquirida por la teca.

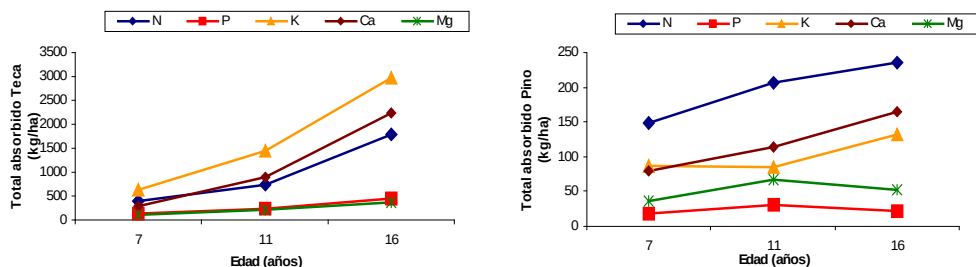


FIGURA 1. Curvas de absorción de nutrientes de *T. grandis* y *P. caribaea* en plantaciones de Nigeria y Fiji (Adaptado de Nwoboshi, 1984; Waterloo, 1994)

4.3. Análisis de suelos

Definición: Se entiende por análisis de suelos aquel que se utiliza para determinar la cantidad de nutrientes minerales disponibles en el suelo y que los árboles pueden utilizar para llenar sus necesidades fisiológicas. El análisis de suelos pretende extraer cantidades de nutrientes similares a las que el árbol podría absorber bajo condiciones normales de crecimiento. La utilización de esta técnica de análisis es la más común en el manejo de plantaciones forestales debido a que el muestreo es sencillo y se reconocen con cierta facilidad las diferencias edáficas que pueden causar diferencias pedológicas. Con los resultados obtenidos con este tipo de análisis y su relación con las variables de crecimiento de los árboles, se pueden definir los niveles críticos y de toxicidad para cada elemento y para cada especie.

El análisis de suelos pueden ofrecer un primer diagnóstico del estado nutricional de un sitio, aunque debe reconocerse que es una estimación grosera de la situación, sobre todo cuando se buscan tierras nuevas para plantaciones, en las cuales es difícil contar con análisis foliares de la especie a sembrar. Los resultados obtenidos en el laboratorio deben ser correlacionados con la respuesta de la plantación a niveles crecientes de cada uno de los elementos analizados y este conocimiento solo existe para pocas especies forestales, sobre todo de plantación. Además, no puede asegurarse que la adición de algún elemento como abono tendrá un efecto positivo, ni prever la importancia del efecto a alcanzar con base en la interpretación del análisis de suelos.

Muestreo: Los resultados de un análisis de suelo, normalmente se refieren a muestras tomadas superficialmente (0-20 cm de profundidad), tomadas al azar con una pala o barreno en al menos 10 posiciones dentro de la plantación, las cuales se mezclan para conformar una muestra compuesta de medio kilogramo. Debe recordarse que una muestra mal tomada, por ejemplo fuera del área cubierta

por las raíces de los árboles, o tomada inmediatamente después de una quema o fertilización, no es representativa y, por lo tanto, los resultados de laboratorio que se obtengan tienen una interpretación muy limitada.

Calibración: Si bien los ensayos de calibración son comunes en la literatura agrícola, desafortunadamente no lo son para el sector forestal, por lo que la interpretación de los resultados de los análisis de suelos debe hacerse por extensión del conocimiento agrícola. En el caso de los árboles, especialmente las coníferas, cabe recordar que estos tienen un poder de asimilación superior al de los cultivos agrícolas ya que su sistema radical es más profundo y permanecen en el suelo por períodos de tiempo más prolongados (Zöttl y Tschinkel, 1971).

Interpretación: Algunos principios generales utilizados en cultivos agrícolas pueden utilizarse para la interpretación de los análisis de suelos en plantaciones forestales, sin temor a equivocarse significativamente. Entre otros, se acepta que la fisiología de las plantas es muy similar, sean estas de uso agrícola o forestal, por lo que las metodologías de extracción de nutrientes empleadas en la mayoría de los laboratorios pueden utilizarse para el caso forestal; por esta razón, se asume que los valores de laboratorio que se obtienen por una metodología determinada, sirven para interpretar la condición real para «la mayoría» de las especies vegetales bajo estudio. Las diferencias en la interpretación de los resultados pueden darse posteriormente, cuando los análisis de laboratorio se calibren en el campo a través de ensayos de fertilización con niveles crecientes de cada nutriente y por especie.

Las cantidades de nutrientes que absorbe una planta en particular son específicas para la misma, por lo que debe tenerse este factor en cuenta a la hora de realizar las interpretaciones. Otras consideraciones importantes al momento de hacer la interpretación de los análisis de suelo tienen que ver con las características del sitio (si se fertilizó o no la plantación con anterioridad, si el terreno fue o no quemado, si el sitio está o no sujeto a inundaciones periódicas, si el sitio tiene mal drenaje, etc.), del origen y génesis del suelo (normalmente consideradas en su clasificación) y de laboratorio (método de extracción, cuadros de interpretación debidamente calibrados, etc.).

Requerimiento y manejo de nutrientes en plantaciones forestales

A continuación, se resume los principios de nutrición de algunas especies forestales tropicales relevantes, sin incluir una discusión sobre tipos y calidades

de materiales fertilizantes, información disponible en otros muchos textos generales.

1. Experimentos de fertilización

Los ensayos de fertilización forestal se llevan a cabo para determinar el efecto de diferentes tipos de fertilizante, solos o en combinación, sobre el crecimiento y la concentración foliar de nutrientes de los árboles. A pesar de que estos ensayos son lentos (varios años) y caros, son concluyentes en el diagnóstico de problemas nutricionales y, por lo tanto, un mecanismo de diagnóstico de primer orden. Normalmente este tipo de ensayos de campo o de vivero se realizan para confirmar un diagnóstico de deficiencia basado en otras evidencias y permite determinar la forma más eficiente de resolver el problema y estimar el grado de respuesta a la adición de los nutrientes comparados.

En ocasiones algunos autores que desean describir los síntomas de deficiencia de los diferentes elementos esenciales utilizan la técnica del elemento faltante en solución nutritiva. La mayoría de los trabajos consideran la utilización de la solución de Hogland como medio de cultivo, aunque Hernández y Lombardo (1987) mencionan que también puede utilizarse una solución nutritiva sencilla que se puede preparar diluyendo 1 gramo del fertilizante comercial 12-12-17-2, más 0,25 gramos de yeso ($\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), más 0,50 centímetros cúbicos de un fertilizante foliar (Bayfolan, Greenzit, Crescal, etc.), por cada litro de solución nutritiva que se desea preparar. De esta manera, se generan diferentes soluciones en las cuales crecen las plántulas con todos los elementos, sin ninguno de ellos o con todos menos uno de ellos en cada caso particular.

2. Efecto de la fertilización en plantaciones forestales

Fisher y Binkley (2000) mencionan que la fertilización de plantaciones forestales incrementa la producción de madera, al aumentar la producción total de los árboles y la acumulación de carbohidratos en la madera, como resultado de un incremento en la cantidad de nutrimentos en el follaje y una mayor cantidad de copa que favorecen la fotosíntesis neta. El incremento en concentración de nutrientes y en área foliar puede o no asociarse con un aumento en la producción total de madera debido a que no todas las hojas reciben la misma cantidad de luz y a que la cantidad de transpiración por parte del tejido fotosintético puede verse disminuida por falta de humedad en el suelo. Además de estimular el crecimiento de los árboles, la fertilización comúnmente altera la mortalidad, el espaciamiento, la distribución diamétrica y en algunos casos hasta la altura máxima que pueden alcanzar los árboles; cuanto más crezcan los árboles con la fertilización mayor

será la mortalidad de los árboles suprimidos y mayor el crecimiento de los árboles dominantes. Los efectos mencionados son mucho mayores en plantaciones jóvenes donde se puede esperar incrementos en altura anual del 60 al 100%, aunque en volumen de producción los porcentajes se reduzcan ligeramente (Bonneau, 1978).

Los estudios realizados en Ecuador por Davidson et ál., (1998) muestran que cuando se utilizan especies nativas para la recuperación de Andisoles degradados de la Amazonía, las especies pioneras tempranas sobreviven significativamente más a las conciciones ambientales que las tardías. Aunque los autores no encontraron respuesta a la fertilización de ninguno de los dos tipos de especies, sería de esperar que las especies tardías respondan más a la adición de insumos después del primer año de crecimiento que las tempranas, debido a que su crecimiento tiende a ser más lento; en adición, la posibilidad de respuesta de las especies tempranas es mayor, al igual que lo es su requerimiento nutricional.

Según Allen (1987), a pesar de que los beneficios de la fertilización forestal pueden demostrarse con facilidad, la implementación de un sistema de fertilización adecuado para cada sitio en particular no es tan fácil. La respuesta de un bosque o plantación a los fertilizantes depende de cuán buena sea la suplencia, en relación a la demanda de los nutrientes, que varía con el estado de desarrollo de la plantación. La adición de nutrientes puede aumentar después de que se disturbe el ecosistema (quemadas, raleas, etc.), cuando comúnmente ocurre la regeneración en bosques naturales. La mayor demanda por nutrientes se presenta cuando se da la expansión del tejido foliar (después de la época seca) en la fase de rápido crecimiento de la plantación y antes de que culmine el incremento anual de volumen. La respuesta de una plantación a una mejora en la nutrición se debe estimar después de que pasa el momento de influjos naturales causados por perturbación del ecosistema y antes de que el reciclaje interno de nutrientes contribuya a llenar la demanda de los árboles.

Algunos autores, en particular de zonas templadas, se han preocupado por el efecto de la fertilización sobre la calidad de la madera producida (Bonneau, 1978), y han encontrado que, para especies coníferas, para producción de pulpa se puede causar una leve disminución (alrededor del 7%) de su densidad, factor que no afecta demasiado el contenido de celulosa y que se compensa con el aumento de volumen (aproximadamente 65%), aunque sería de importancia en el caso de que causara una disminución de la resistencia mecánica. La influencia de la fertilización sobre la longitud de las fibras es contradictoria; se menciona además de una disminución del tamaño de las fibras en *Pinus tadea*, mientras que en pino negral aumentan y en otras especies como pino o abeto rojo no se ejerce ningún efecto. La fertilización también puede causar un efecto importante sobre el

crecimiento de los anillos de crecimiento, hecho totalmente incompatible con la producción de ciertas maderas de calidad como la del roble.

3. Respuesta a la fertilización

La respuesta a la fertilización de plantaciones forestales es un hecho documentado en todos los continentes con áreas tropicales aunque algunas especies como *Flindersia brayleyana*, *Castanospermum australe* (Webb et ál., 2000), *Bombacopsis quinata* (Chinchilla et ál., 1997) y *Vochysia guatemalensis* (Di Stefano y Fournier, 1994) no responden a la fertilización, al menos en sus estados iniciales de crecimiento.

En la literatura es común encontrar referencias al hecho de que las especies arbóreas leguminosas que fijan N libre no responden a la adición de este elemento; sin embargo, la mayoría de los árboles de la familia Cesalpincea no nodulan ($\approx 70\%$), mientras que el 70 de las especies de la familia Mimosea y el 90% de las especies de la familia Papilionacea sí nodulan (Rao, 2002).

Desde el punto de vista de sostenibilidad, algunos autores consideran necesario reponer al suelo los nutrientes que se extraen del bosque como producto, sean estos leña, pulpa, madera, etc., aunque en general, las cantidades exportadas tienden a ser de poca magnitud. La posibilidad de agotar el capital de nutrientes presente en suelos ácidos cubiertos de bosque en regiones tropicales es alta, a pesar de la gran capacidad de reciclaje de nutrientes mencionada en los acápites anteriores, lo que tiene consecuencias ecológicas y económicas considerables. Las razones principales por las que no se recomienda el uso intensivo de fertilizantes en plantaciones forestales son de tipo ambiental, costos altos y poca respuesta a su aplicación, además de que no deben aplicarse al menos que se haga un buen control de malezas

El prolongado período de crecimiento de los árboles desde el vivero hasta la etapa de corta tiene efectos fundamentales sobre la acumulación de carbono y nutrientes, así como sobre el reciclaje de los nutrientes en el ecosistema. Los árboles presentan diferentes fases de crecimiento en las cuales la relación biomasa aérea/biomasa radical cambia y con ella la contribución relativa de los varios compartimientos y flujos de nutrientes. En general, se pueden identificar tres fases de crecimiento, a saber: 1) germinación y vivero, 2) establecimiento en el campo (rápido crecimiento) y 3) un período de madurez y de crecimiento lento, en el cual se recomienda fertilizar hasta 3-10 años antes de la edad de corta para adicionar crecimiento de madera; la duración de estas etapas depende de la especie, conociéndose que hay especies de rápido y lento crecimiento. Esta división es importante de recordar, ya que los métodos de fertilización y la probabilidad de respuesta a la aplicación de nutrientes varía de una etapa a la otra; por ejemplo, la

práctica de utilizar fertilizantes foliares es muy común en viveros, mientras que los fertilizantes granulados tienden a usarse más en la etapa de establecimiento y el «reciclaje» de nutrientes en la etapa de maduración, en sincronización con la descomposición de residuos después de los raleos y las podas.

4. Fertilización en la etapa de vivero

La fertilización es una práctica esencial en los viveros para alcanzar el crecimiento óptimo de los árboles en un período de tiempo corto. Esta fertilización debe basarse en los requerimientos nutricionales de las plantas y la disponibilidad de nutrientes del suelo o sustrato, usando como herramienta los análisis químicos foliares y de suelos para determinar la cantidad adecuada de fertilizante que se debe aplicar (Navarrete, 1992).

A pesar de la enorme diversidad de especies de árboles tropicales, la mayoría de las plántulas no-industriales se producen de la misma manera, empleando bolsas plásticas perforadas de 500-1500 cm³ con suelo sin que se incorpore materia orgánica. El suelo a menudo contiene una elevada cantidad de arcilla, estructura pobre y es bajo en nutrientes, lo que causa que el crecimiento de las plántulas sea lento y se tarde mucho en sacar las plántulas al campo (Wightman et ál., 2001).

El objetivo de las mezclas de varios componentes en el sustrato es suministrar una adecuada aireación y humedad (preferiblemente mantener el sustrato a capacidad de campo), de tal forma que no se restrinja el crecimiento de las raíces de los árboles y se asegure obtener plántulas saludables con un tamaño óptimo y un sistema radical fibroso. Generalmente, lo que se recomienda es una mezcla compuesta de suelo, arena y compost (Totey, 1992), con pH entre 4.5-6.5 y micorriza *Pinus radiata*, mientras que para *Eucalyptus globulus* se recomienda una mezcla por partes iguales de arena, arcilla y materia orgánica con un pH entre 5.5-7.0 (Galloway y Borgo, 1983). Recientemente, se emplea como medio de enraizamiento un producto hecho a base de musgos y conocido como «jiffy», el cual requiere de igual manera ser fertilizado y a menudo enriquecido con micorrizas locales y fertilizantes orgánicos para asegurar la micorrización desde el inicio del crecimiento de las plántulas.

Por lo general, en viveros no existe un uso específico de fertilizantes para determinada especie de árbol, sino que se utilizan fórmulas altas en fósforo y nitrógeno. Con estos fertilizantes los productores buscan mejorar el crecimiento del sistema radical y del árbol, lograr un mayor prendimiento y una mejor competencia contra las malezas. La aplicación de fertilizantes foliares se efectúa de 1-2 veces por semana hasta los 3-6 meses. Algunas especies como botarrama (*Vochysia ferruginea*) y cebo (*Vochysia guatemalensis*) son muy sensibles a la

aplicación de fertilizantes al suelo y en el caso de botarrama hasta de fertilizantes foliares y orgánicos. Sin embargo, otras especies como la teca, responden favorablemente a la aplicación conjunta de 0.7 gN/planta (como sulfato de amonio) y 0.4 gP/planta (como triple superfosfato), mejorándose principalmente la velocidad de crecimiento, no tanto así el diámetro del tallo y reduciéndose la mortalidad de las plántulas.

Una de las opciones de fertilización es utilizar los fertilizantes sólidos que pueden ser granulados, pastillas y polvos, entre los cuales se encuentran las fórmulas 10-30-10, 15-15-15 ó 12-24-12 ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$, respectivamente), los cuales se aplican al suelo de las camas o en el sustrato de las bolsas del vivero. Los fertilizantes líquidos son la fuente más común de nutrientes que se aplica en viveros, principalmente por riego de aspersión, aunque en algunos sitios también se utiliza el riego por goteo. Es indispensable tener en cuenta las indicaciones del fabricante acerca de la forma de uso, preparación, dosificación y cuidado en cada situación específica (Navarrete, 1992). Normalmente las cantidades de producto a aplicar son muy pequeñas (del orden de 1-2 g/planta) aplicados de tal manera que no toquen la raíz de la misma y así reducir el porcentaje de quema de las plántulas.

Las enmiendas orgánicas como el compost, lombricompost, *bocashi* o gallinaza se deben adicionar al suelo del vivero bien mezcladas en una proporción de 1 parte de abono por 3 de suelo. Estas enmiendas pueden ser usadas como un complemento de la fertilización química debido a que son una fuente de materia orgánica, la cual posee cantidades considerables de nitrógeno, potasio y pequeñas fracciones de otros elementos. Todos los abonos orgánicos varían en el contenido de nutrimentos y materia seca debido a la variabilidad de los diferentes tipos de materiales usados en la elaboración del mismo.

5. Fertilización al trasplante

El impacto que sufren las plantas sacadas del vivero al ser transplantadas al campo es severo, a pesar de que las mismas se someten a un proceso de aclimatación previo. Por esta razón, puede esperarse una pequeña pérdida de crecimiento en las primeras semanas después del trasplante, la cual puede verse disminuida con la aplicación de enmiendas a los suelos, tales como encalado y fertilizantes, cuando estos son necesarios. Este fenómeno es mucho más acentuado en regiones con un período seco prolongado, zonas en las que se recomienda emplear medios de germinación o enraizamiento de cierto volumen, de manera que pueda almacenar agua suficiente por períodos más largos y evitar así marchitamientos innecesarios de las plántulas.

La etapa inicial de establecimiento de plantaciones de especies de crecimiento rápido en sitios degradados puede mejorarse sustancialmente con la aplicación de fertilizantes, tratamiento que ayuda a desarrollar resistencia a plagas y enfermedades. Posteriormente, en plantaciones en las que el ciclo de rotación es largo, la aplicación de fertilizantes ayuda a lograr dimensiones de los árboles adecuadas y a reducir el turno de corte.

La fertilización al momento de iniciar la plantación es la más importante en términos de aumentos de la tasa de crecimiento de los árboles, más para algunas especies, como eucalipto, que para otras, como las coníferas. El efecto inicial mencionado se da con la aplicación de dosis pequeñas de fertilizante (por ejemplo, 50 kg N/ha), las cuales pueden aumentar hasta de 5 veces la producción de madera de pino (Prichett, 1986). En el caso del N, el elemento se aplica para estimular el crecimiento de la plantación, mientras que en el caso del P o el B, cuando estos son deficientes, su aplicación se hace para asegurar el éxito inicial de la plantación. Al igual que para otras muchas especies vegetales, la adición de N-P tiene un efecto sinérgico, por lo que su aplicación conjunta es muy superior a la aplicación de los dos elementos en forma individual (Cannon, 1983a y b).

Medina (1974), menciona que dos años después de aplicar al trasplante 100, 200 y 300 kg/ha de P como escoria de Thomas a plantaciones jóvenes de *Cupressus lusitanica* y *Pinus oocarpa* en Andic Humitropepts de Colombia el crecimiento de ambas especies mejoró significativamente; en adición, cuando el fertilizante se adicionó 6 meses después del trasplante, la respuesta fue significativa, aunque de menor magnitud que cuando el fertilizante se colocó al momento del trasplante.

Weeb et ál., (2001), en un experimento de campo establecido para comparar la respuesta a niveles entre 0 y 300 g P/árbol aplicados al trasplante a un suelo con menos de 4 mg P/kg extraíble, con las especies *Cedrela odorata*, *Agathis robusta*, *Flindersia brayleyana* y *Castanispernum australe*, encontraron que *F. brayleyana* y *C. australe* mantuvieron un buen crecimiento, aún cuando no se aplicó P, y mostraron poca o ninguna respuesta en crecimiento o concentración foliar de P cuando se adicionó el elemento. Por el contrario, las especies *C. odorata* y *A. robusta* respondieron significativamente a la adición de P, tanto en crecimiento como en concentración foliar de P. Estos resultados indican que existen diferencias significativas en la habilidad que tienen diferentes especies forestales tropicales para absorber P, por lo que no se pueden hacer recomendaciones generalizadas simples de este elemento.

En suelos ácidos, se ha encontrado que encontró que al aplicar dosis de 80 a 120 g NPK/árbol teca al trasplante causaron un aumento significativo del aumento de la altura, el diámetro, el área basal y el volumen de la plantación de teca hasta

2-5 años después de esta aplicación (Kishore, 1987, Montero, 1995). Sin embargo, la respuesta de la teca a una sola aplicación de varias fórmulas de fertilizante al trasplante en suelos neutros de Guanacaste, Costa Rica, no causó diferencias significativas en las variables de crecimiento medidas tres años después de la aplicación del producto (Rodríguez y Fonseca, 1981).

La siembra de *Eucalyptus grandis* en suelos distróficos de las sabanas orientales de Venezuela debe hacerse con aplicación de fertilizantes, pues de otra manera los incrementos en altura y diámetro se reducen significativamente (Morales y Ortega, 1980); en este caso la dosis de 100 g fertilizante con N/árbol causaron el mejor efecto fisiológico y económico, mientras que la adición de fosforita no mejoró el comportamiento de la especie.

La fertilización foliar, utilizada como un complemento a la fertilización convencional al suelo, también puede ser muy beneficiosa durante esta etapa de crecimiento. En este caso, se utilizan productos como la úrea, el fosfato diamónico y el nitrato de potasio previamente disueltos en agua (en dosis de 1,5 a 2,5 kg por cilindro de 200 litros de agua o de 100 a 2300 gramos por mochila de 15 litros de agua). También se emplean otros productos que vienen ya diluidos, pueden ser aplicados al follaje para corregir algunas deficiencias o recuperar árboles dañados por alguna plaga o enfermedad, pero no para cubrir toda la necesidad de nutrientes de los árboles.

6. Fertilización en la etapa de plantación

Efecto de la aplicación: Aproximadamente entre el 10 y el 20% del fertilizante aplicado durante la etapa de maduración es aprovechado por los árboles. En general, se estima que los árboles recuperan un cuarto del fertilizante aplicado en los primeros años de crecimiento, otra cuarta parte es inmovilizada en la biomasa microbial o ligada a la materia orgánica del suelo y el resto es difícil de medir o se pierde en el ecosistema a través de lavado o volatilización (Fisher y Binkley, 2000). A menudo el efecto de la fertilización con P puede durar hasta una década (Dyson, 1995), mientras que la repuesta al N encuentra su máximo a los 5 años, lo cual se debe a la forma en que estos elementos se almacenan en el ecosistema y a la frecuencia con que los mismos se aplican en el tiempo. La adición de N en esta etapa permitió obtener incrementos del 20% en volumen en plantaciones de *Pinus elliottii* en Australia (Evans, 1992).

En la tabla 1, puede observarse el efecto de la aplicación de fertilizantes a 10 especies forestales de importancia económica, notándose el incremento en altura del árbol en un período de 3 años en todas las especies debido a la aplicación del fertilizante, así como la diferencia en respuesta que existe según la especie.

Especie	Altura del árbol (cm)			
	Al inicio (1968)		Al final (1971)	
	Sin fert.	Con fert. ¹	Sin fert.	Con fert. ¹
<i>Pinus caribaea</i>	0.5	0.8	1.5	4.2
<i>Pinus kesiya</i>	0.3	0.4	1.1	4.0
<i>Eucalyptus deglupta</i>	0.8	1.5	3.7	7.6
<i>Eucalyptus tetricornia</i>	0.9	2.0	2.8	4.8
<i>Terminalia brassii</i>	0.5	1.1	2.5	4.7
<i>Terminalia complarata</i>	0.4	Muerto	0.8	1.3
<i>Terctona grandis</i>	0.2	Muerto	2.6	3.0
<i>Acacia auriculiforme</i>	1.8	4.0	2.7	9.7
<i>Pterocarpus indicus</i>	0.8	0.7	1.3	1.6
<i>Intsia bijuga</i>	0.6	0.4	0.5	1.0

TABLA 1. Respuesta inicial a la fertilización de varias especies forestales (tomado de Evans, 1982).

¹ 500 kg/ha de fertilizante 17-5-22

De acuerdo con Castaño y Quiroga (1990), en los suelos del valle del Cauca, Colombia, la mayoría de las especies forestales utilizadas en programas de reforestación y en plantaciones, responden favorablemente a la adición de P y B y en algunos casos a la de N para lograr un buen crecimiento y una buena sobrevivencia; los autores concluyen que el NPK incide más sobre el crecimiento en altura que el boro, mientras que el B incide más en la sobrevivencia de los árboles, así como que los eucaliptos respondieron mejor que las coníferas a la fertilización.

Forma de aplicación: La aplicación de fertilizantes en grandes extensiones puede hacerse con tractor, helicópteros y avionetas, dependiendo de la situación económica de la empresa y del relieve del terreno; en el caso de las aplicaciones aéreas hoy en día se emplean sistemas de posicionamiento geográfico, lo que le permite a la nave regresar al último punto fertilizado con gran precisión, sin cometer errores por sobrefertilización (Fisher y Binkley, 2000). Cuando la fertilización se hace manualmente, la respuesta al abonamiento también depende de la forma en que se coloque el fertilizante con relación al árbol, de manera que la mezcla del producto con una buena cantidad de suelo es más eficiente que colocar todo el fertilizante debajo de la planta y la peor respuesta se obtiene cuando se coloca con chuzo a 20 cm del árbol (Cannon, 1984).

Momento de la aplicación: Para ciertos elementos y bajo ciertas condiciones específicas de sitio, es ventajoso aplicar fertilizante en plantaciones establecidas, indiferentemente de la edad de la plantación. Por lo general, la respuesta a este tipo de tratamiento es rápida (ocurre a los pocos meses) y es mayor en el caso de sitios pobres, los cuales pueden mejorarse con la aplicación de enmiendas; como ejemplo puede mencionarse la respuesta de la teca a la fosforita en suelos moderadamente drenados de Venezuela (Torres et ál., 1993). Debe recordarse

que cuando un sitio es malo por otras razones que no sean de fertilidad, el tratamiento al suelo no se puede compensar por otro tipo de deficiencias tales como exceso de viento, suelo poco profundo, exceso o falta de humedad, etc.

Si bien es cierto que con el raleo se extraen algunos nutrientes del ecosistema como madera (Totey, 1992), esta merma de nutrientes, al igual que la causada por la tala del bosque, al momento del turno de corta, no es elevada, pues la mayoría de la biomasa total del árbol (raíces, follaje y ramas) queda en el sitio y la concentración de nutrientes en la madera es baja. En el caso de algunas especies como teca y melina, la capacidad de rebrote de las mismas también contribuye a que rápidamente se vuelva a cubrir el suelo de vegetación, reiniciándose así el reciclaje de nutrientes y disminuyéndose la tasa de pérdida de nutrientes por lavado. Cuando el sitio es bueno, la reposición de nutrientes debe hacerse para asegurarse mantener la calidad del mismo en el tiempo; cuando los sitios son malos, la no reposición de los nutrientes causa una disminución de la calidad del sitio en el tiempo, por lo que no debe recomendarse para especies con altos requerimientos nutricionales y debe abandonarse después del segundo o tercer turno por razones ecológicas y económicas (Mackensen, 1999).

Duración del efecto de la fertilización: La longitud del período de respuesta a la fertilización depende del sitio, de la preparación del terreno, de los tratamientos previos realizados a la plantación y del patrón de crecimiento de la especie. Para el N el período de respuesta máxima se da al principio o antes de que la plantación cierre y puede durar varios años más; para el P la respuesta puede durar todo el período que se utilice el terreno y en menor frecuencia el K, si los elementos son deficientes en el ecosistema. Bonneau (1978) menciona que la respuesta a largo plazo de la aplicación de P y K al suelo en plantaciones forestales, se debe, entre otros a: 1) la movilidad relativamente reducida y retención del P y K en el suelo; 2) a que las raíces que están alejadas del punto de su aplicación como fertilizante, los encuentran con «más dificultad» y 3) al poco requerimiento de estos elementos por algunas especies forestales. Lo opuesto ocurre para el caso del N, elemento de mucha más movilidad que el P y el K, por lo que la respuesta a su aplicación es a corto o mediano plazo y nula, casi nula o contraproducente, en el caso de especies arbóreas leguminosas fijadoras del elemento.

Vásquez (1990) encontró que la adición de niveles crecientes de NPK a *E. saligna* en suelos relativamente fértiles de Turrialba, Costa Rica, duró 12 meses cuando se estimó como aumento en diámetro y altura de los árboles (variables lineales); sin embargo, al utilizar una variable geométrica (volumen), encontró que, dependiendo del nivel de NPK aplicado, al final se encontraban ganancias del 14-31%, lo que justificaba la adición del fertilizante. Resultados similares

fueron encontrados en Sacatepéquez, Guatemala, donde la mejor dosis fue 50 g 15-15-15 /árbol, con un efecto residual de 4 años (Ugalde, 1997).

Cuando el ecosistema es severamente deficiente en algún elemento en particular, la respuesta a su aplicación es inmediata y de larga duración. Cuando la deficiencia de algún elemento es moderada, es normal que la respuesta no pueda ser correctamente estimada sino hasta el segundo año después de aplicado el fertilizante, debido a varios factores, entre ellos: 1) la dilución del elemento aplicado en el follaje existente o en el inducido por la aplicación del elemento, 2) una posible inmovilización química o microbiológica de los elementos en el suelo o 3) en casos muy particulares a la acumulación de los nutrientes en algún tejido no muestreado de los árboles (por ejemplo, madera), por lo que no se detectan incrementos foliares relevantes, ni tampoco de las variables de crecimiento sino hasta después de cierto tiempo (Tanner et ál., 1990). La evidencia empírica muestra que los sitios que presentan deficiencias nutricionales al inicio de la plantación seguirán presentando la deficiencia hasta el turno final, independientemente de la edad de la misma (Fisher y Binkley, 2000).

7. Manejo de la acidez del suelo y necesidades de encalado

En general, cuando el pH (en agua) del suelo se encuentra entre valores de 5.5-6.5, se logra una buena nitrificación y un buen suministro de Ca y Mg, con pocos problemas de deficiencias de elementos menores como Fe, Mn, Cu y Zn y una disponibilidad de P adecuada. Cuando los valores de pH son inferiores a 5.5, las condiciones de acidez recrudecen, al presentarse con frecuencia toxicidades de Al, Fe y Mn, así como deficiencias de micronutrientes y en particular de Mo y P, elementos que precipitan en conjunto con los óxidos e hidróxidos de Fe y Al (Sarmiento, 1984). Es bajo estas condiciones que se requiere del encalado y otras prácticas de manejo de suelo que permitan corregir los problemas mencionados, para las especies que así lo requieran.

Algunos autores (Gonçalves, Demattê y Couto, 1990; Zech y Drechsel, 1991), han encontrado que el pH medido en los primeros 20 cm de suelo en CaCl_2 (que estima la acidez total del suelo), correlaciona bien con valores de índice de sitio para eucalipto y teca, no así el valor estimado en agua. Además de la acidificación del suelo inducida por actividades antropogénicas mal realizadas (por ejemplo, abuso de uso de fertilizantes con efecto residual ácido), la acidificación natural de los suelos ocurre por efecto de una meteorización intensa del ecosistema en zonas muy lluviosas y calientes como grandes extensiones del bosque tropical húmedo en suelos que clasifican normalmente como Ultisoles y Oxisoles. Al proceso natural de acidificación del suelo puede sumarse el que causan las especies arbóreas leguminosas como las de los géneros *Erythrina*

(Imback et ál., 1989) o *Alnus* (Sharma, 1993) y en este proceso ocurre una pérdida de Ca y Mg del sistema por efecto de ión acompañante, para lograr el equilibrio de carga en el sistema debido al exceso de N-NO_3 fijado y liberado por las leguminosas.

Los factores que influyen en el cálculo de la necesidad de encalado son: 1) la tolerancia de la planta a la acidez, 2) el contenido de acidez del suelo, 3) la calidad del producto encalante a utilizar y 4) los aspectos de manejo del producto involucrados en la aplicación del mismo (al voleo, en banda, incorporado, etc.).

Para resolver el problema de la acidez, los productores queman el terreno, depositando cenizas con efecto básico, o siembran especies de árboles que se adapten a esta condición (Tilki y Fisher, 1998; Montagnini, 2000); por ejemplo, se menciona que las coníferas de clima templado son especies calcífugas (especies que en presencia de una cantidad excesiva de cal sufren de desórdenes fisiológicos poco conocidos y que reducen fuertemente su producción) que prefieren ambientes con suelos ácidos (Bonneau 1978). En regiones tropicales, el contenido foliar de Al en árboles normalmente se encuentra entre 20-100 ppm/peso seco, aunque se menciona que algunos árboles pertenecientes a las familias *Vochysiaceae*, *Rubiaceae*, *Symplocaceae* y *Melastomaceae* son especies acumuladoras de Al, mientras que otras familias como *Leguminosae* no tienen ninguna (Sarmiento, 1984). Se consideran como mecanismos fisiológicos que explican esta tolerancia a la acidez del suelo que los árboles pueden excretar exudados en la rizosfera que precipitan los óxidos e hidróxidos de Al y Fe, la vacuolización de estos elementos a nivel foliar (Baligar y Duncan, 1990) y el hecho de que en situaciones particulares, el sistema radicular de los árboles se concentra en el mantillo, disminuyendo al mínimo el absorber nutrimentos del suelo mineral y escapando así el efecto fitotóxico del Al (Sarmiento, 1984).

Algunas especies que naturalmente crecen en suelos derivados de materiales calcáreos o en suelos aluviales fértiles, en particular en regiones de clima tropical húmedo-seco, no crecen bien en suelos ácidos de regiones tropicales húmedas a perhúmedas, como es el caso de la teca, la melina, el laurel y el pochote. Este es el caso de especies como *Gmelina arborea* y *Cordia alliodora* las cuales responden al encalado y la fertilización en suelos distróficos de la amazonía boliviana (Delgadillo, Aldunate y Alvarado, 1991).

Para corregir el problema de la acidez del suelo, se han desarrollado fórmulas que relacionan la acidez intercambiable y la tolerancia de la especie a sembrar con la necesidad de cal a aplicar.

8. Rentabilidad de la fertilización

Como resultado de las primeras experiencias con uso de fertilizantes en países de clima templado, donde los turnos de corta para bosques de pinos silvestres oscilaban entre 100 y 120 años y para los robles entre 200 y 250 años, se llegó a la conclusión de que el costo de fertilizar bosques era demasiado elevado, si se consideraba una tasa de interés de ese costo por un período de tiempo tan prolongado. Más aún, se recomendaba: reducir al mínimo las inversiones iniciales y utilizarlas lo más tarde posible, con el fin de disminuir la duración de la capitalización y, por consiguiente, la inflación del capital invertido, ignorando el hecho de que los incrementos máximos se logran al inicio de la plantación y que los nutrimentos adicionados en las etapas finales de crecimiento solo pasan a engrosar los contenidos de la corteza de los árboles (Bonneau, 1978). En adición, la respuesta de plantaciones industriales a la fertilización en regiones de clima templado es baja, debido a que la pérdida de nutrientes en estas condiciones climáticas es poca y el suministro de los mismos vía lluvia y meteorización compensa la pérdida (Mackensen, 1999). Diferente es la situación en plantaciones forestales en regiones tropicales, en las cuales se mencionan turnos de corta de 7-8 años para *Eucalyptus*, 15-20 años para *Alnus* (Mena, Castillo y Cob, 2000) y de 20-25 para *Tectona* (Vallejos, 1996 y Montero, 1999), contándose además con nuevas tecnologías que permiten el aprovechamiento comercial del producto de los raleos.

Evans (1992) menciona que la información disponible permite observar casos en que la respuesta a la fertilización es espectacular al inicio y disminuye con el tiempo, puede ser constante durante todo el período de crecimiento de los árboles y también puede ser que ocurra al aplicar el fertilizante, pero, posteriormente, los árboles de la parcela testigo igualan o superan a los fertilizados. Bajo qué condiciones cada tipo de respuesta es económico, en adición de su costo, la tasa de interés y la longitud del turno de corta, es importante conocer la magnitud de la respuesta en términos de incremento de volumen y de disminución del período de corta.

Desde el punto de vista ambiental, se considera necesario reponer al ecosistema al menos los nutrimento, que salgan como producto extraído, sin embargo, es igualmente importante tener en consideración la reposición de la pérdida total de nutrientes en un turno de corta, de manera que deben reponerse todos los elementos que se pierdan por extracción, volatilización (quemadas), lavado y erosión. Graff (1982) menciona que la extracción de 200 ton/ha (71%) de pulpa para papel de *Pinus caribaea* en Surinam puede remover 576 kg de N (6% del total), 36 kg de P (22%), 506 kg de K (30%), 1218 kg de Ca (37%) y 99 kg de Mg (24%), con un costo total de reposición como fertilizante de US\$1 600/ ha; si se

asume que la tala total del bosque tiene un efecto destructivo del ecosistema, la pérdida total de nutrientes por erosión llega a ser mayor y el costo de reposición de los mismos podría calcularse en US\$14 000/ ha. Como la extracción de nutrientes depende de la especie que se siembre, lo importante es conocer si se desea exportar grandes volúmenes de madera de baja calidad (precio bajo) o pequeñas cantidades de producto de alta calidad (precio alto).

Fisher y Binkley (2000) presentan una buena discusión en relación a la forma de calcular el beneficio económico y de realizar la fertilización de plantaciones forestales. En ella, presentan la «metodología de árboles de toma de decisiones», la cual permite identificar escogencias, probabilidades y productos, demostrándose que existen al menos dos tipos de error posibles a cometer por un administrador cuando de fertilizar se trata. El error «tipo I» se presenta cuando se fertiliza una plantación que no responde con al menos un incremento en rendimiento de los costos. Igualmente real, es el caso del error «tipo II», cuando no se fertiliza una plantación con potencial de respuesta. Realizando un ejercicio con valores reales para una condición determinada, se concluye que es mucho mejor para un administrador caer en el error «tipo I» ya que las ganancias que se dejan de percibir al no fertilizar el sitio con alta probabilidad de respuesta son mucho mayores que las pérdidas en que se podría incurrir al fertilizar sitios en los cuales la probabilidad de respuesta es baja.

9. Alternativas al uso de fertilizante

Como el costo de aplicar fertilizantes es elevado, deben investigarse otras posibilidades a su utilización cuando esta no es rentable. Evans (1992) menciona como factibles: 1) el cambio de especie por otra con menores demandas nutricionales; 2) el empleo de prácticas de preparación del terreno que minimicen las pérdidas de nutrientes disponibles en el suelo (p.ej., evitar el barrido del terreno y con ello la remoción del horizonte A); mejorar el reciclaje de nutrientes tal como se expuso en el Capítulo; 3) la utilización de residuos y/o herbicidas para disminuir la competencia de malezas alrededor de los árboles recién plantados; 4) utilizar especies fijadoras de N; y 5) empleo de excremento de animales.

Literatura mencionada

- AKINNIFESI, F.K., TIAN, G. Y KANG, B.T. 2002. Tree performance, soil plant-litter characteristics and faunal activity in some tropical plantations. In: Reddy, M.V. (ed.). Management of tropical plantation-forests and their soil-litter systems. Science Publishers, Inc. New Hampshire, USA. Chapter 10, pp 253-288.

- ALEXANDER, E.B. 1973. A comparison of forest and savanna soils in Northeastern Nicaragua. *Turrialba* 23(2):181-191.
- ALFARO, E., ALVARADO, A. Y CHÁVERRI, A. 2001. Cambios edáficos asociados a tres etapas sucesionales de bosque tropical seco en Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 25(1): 7-20.
- ALLEN, H.L. 1987. Forest fertilizers: nutrient amendment, stand productivity, and environmental impact. *Journal of Forestry* 85(2): 37-47.
- ARCE, V.H. 2003. Erosión hídrica de suelos en plantaciones forestales de teca (*Tectona grandis* L. f.), pochote (*Bombacopsis quinata*) (Jacq.) Dugand, ronron (*Astronium graveolens*) Jacq. y un bosque natural en el Pacífico Norte, Costa Rica. Universidad de Costa Rica, Sist. Est. Posgr., San José, Costa Rica. Trabajo Domiciliario, 29 p.
- BALIGAR, V.C. Y DUNCAN, R.R. (eds.). 1990. Crops as enhancers of nutrient use. Academic Press. USA. 574.
- BALLARD, R. 1980. Phosphorus nutrition and fertilization of forest trees. In: ASA-ACCS-SSSA, The role of phosphorus in agriculture. Madison, Wisconsin, USA. pp. 763-804.
- BERNHARD, F. Y LOUMETO, J.J. 2002. The litter system in African forest-tree plantations. In: Reddy, M.V. (ed.). Management of tropical plantation-forests and their soil-litter systems. Science Publishers, Inc. New Hampshire, USA. Chapter 2, pp. 11-39.
- BERTSCH, F. 2003. Absorción de nutrimentos por los cultivos. San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, 307 p.
- BIRKELBACH, J., BRECKLE, S.W. Y ORTIZ, R. 1996. Element contents of soil and leaves and their correlation in five tree species in an area of the Reserva Biológica Alberto Brenes, Costa Rica. *Revista Pensamiento Actual*, 2:53-59.
- BOARDMANN, R., CROMER, R.N., LAMBERT, M.J. Y WEBB, M.J. 1997. Forest plantations. In: D.J. Reuter y J.B. Robinson (eds.). Plant analysis, an interpretation manual. CSIRO Publishing. Australia, pp. 505-561.
- BONNEAU, M. 1988. Le diagnostic foliaire. *Revue Forestière Française*, 15:19-28.
- BRUIJNZELL, L.A. 1991. Nutrient input-output budgets of tropical forest ecosystems: a review. *Journal of Tropical Ecology* 7(1): 1-24.
- BRUNCK, F. 1987. Tropical forest species. In: P. Martin-Prével, J. Gagnard y P. Gautier (eds.), Plant analysis as a guide to the nutrient requirements of temperate and tropical crops. N.Y., USA. Lavoisier Publishing Inc., pp. 479-486.
- CANNON, P.G. 1983a. Ciclo de nutrientes en plantaciones. En: Cartones de Colombia S.A. Fertilización forestal en el Valle y el Cauca. Cali, Colombia, pp: 85-98.
- , 1983b. La optimización de la fertilización de eucalipto en algunos suelos Andepts. En: Fertilización Forestal en El Valle y El Cauca. Smurfit Cartón de Colombia, Octavo informe anual, pp. 133-150.
- , 1984. La fertilización del eucalipto en algunos suelos andepts. *Suelos Ecuatoriales* 14(1): 19-27.
- CASTAÑO, F. Y QUIROGA, F. 1990. Resultados experimentales de los ensayos de fertilización en cultivos forestales de la cuenca alta del río Cauca, Zona Andina Colombiana. En: R. Salazar (ed.), Manejo y aprovechamiento de plantaciones

- forestales con especies de uso múltiple. Actas Reunión IUFRO. Guatemala Abril 1989. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica, pp. 247-267.
- CHINCHILLA, O., CAMACHO, Y., MORA, F. Y FONSECA, W. 1997. Evaluación de fertilización para pochote (*Bombacopsis quinata*) en la zona de Nicoya, Guanacaste. Universidad Nacional, Instituto de Investigación y Servicios Forestales. Heredia, Costa Rica, sp.
- COSTA, E.S., LUIZAO, F.J., LUIZAO, R.C. Y MCMILLAN, A. 2002. Litter layer dynamics and soil microbial biomass in reforested areas alter degradation by bauxite mining in eastern Amazon. In: Reddy, M.V. (ed.). Management of tropical plantation-forests and their soil-litter systems. Science Publishers, Inc. New Hampshire, USA. Chapter 6, pp. 129-147.
- DAVIDSON, R., GAGNON, D., MAUFFETTE, Y. HERNÁNDEZ, H. 1998. Early survival, growth and foliar nutrients in native Ecuatorian trees planted on degraded volcanic soil. Forest Ecology and Management, 105: 1-19.
- DELGADILLO, R., ALDUNATE, J. Y ALVARADO, A. 1991. Situación de la agroforestería en el subtrópico húmedo de la región del Chapare, Bolivia. En: T.J Smyth, W.R. Raun y F. Bertsch (eds.). Manejo de suelos tropicales en Latinoamérica. NCSU / CIMMYT / UCR / USAID. San José, Costa Rica, pp. 257-263.
- DI STÉFANO, J.F. Y FOURNIER, L.A. 1994. Caída de hojarasca y tasas de descomposición de las hojas de *Vochysia guatemalensis* en una plantación de 10 años, Tabarcia de Mora, Costa Rica. Agronomía Costarricense 29(1): 9-16.
- DRECHSEL, P. Y ZECH, W. 1991. Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: a tabular review. Plant and Soil 131: 29-46.
- EVANS, J. 1992. Plantation forestry in the tropics. 2.^a ed. Oxford Science Publications. New York, USA, 403 p.
- EWEL, J.J., BERISH, C., BROWN, B., PRICE, N. Y RAICH, J. 1981. Slash and burn impacts on a Costa Rican wet forest site. Ecology 62(3): 816-829.
- FASSBENDER, H.W. 1987. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Serie de Materiales de Enseñanza N.º 29. Turrialba, Costa Rica, 491 p.
- FISHER, R.F. Y BINKLEY, D. 2000. Ecology and management of forest soils. 3.^a ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA, 489 p.
- GALLOWAY, G. Y BORGIO, G. 1983. Manual de viveros forestales de la sierra peruana. Proyecto FAO/Holanda/INFOR. Lima, Perú, 123 p.
- GONÇALVES, J.L., DEMATTÊ, J.L. Y COUTO, DO H.T. 1990. Relações entre a produtividade de sítios florestais de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus saligna* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no estado de São Paulo. IPEF, Piracicaba (43/44): 24-39.
- GRAFF, DE N.R. 1982. Sustained timber production in the tropical rainforest of Surinam. In: Wienk, J.F. y DE Wit. H.A. Management of low fertility acid soils of the American humid tropics. Proceedings of a Workshop held at Paramaribo, Suriname, 23-26 November 1981. IICA. San José, Costa Rica, pp. 175-189.

- GRUBB, P.J. 1995. Mineral nutrition and soil fertility in tropical rain forest. In. A.E. Lugo y C. Lowe (eds.) Tropical forest: management and ecology. Springer-Verlag, Ecological Studies v. 112. New York, USA, pp. 308-330.
- HAAG, H.P. (coord.). 1983. Nutrição mineral de *Eucalyptus*, *Pinus*, *Araucaria* e *Gmelina* no Brasil. Fundação Cargill. Campinas, SP, Brasil, 201 p.
- HARTEMINK, A.E. 2003. Soil fertility decline in the tropics with case studies on plantations. CABI Publishing, England, 360 p.
- HEAL, O.W., ANDERSON, J.M. Y SWIFT, M.J. 1997. Plan litter quality and decomposition: an historical overview. In. Cadisch, G. y Giller, K.E. (eds.). Driven by nature, plan litter quality and decomposition. CAB International. Oxon, U.K., pp. 3-29.
- HEANEY, A. Y PROCTOR, J. 1989. Chemical elements in litter in forests on Volcán Barba, Costa Rica. In. J. Proctor (ed.) Mineral nutrients in tropical forest and savanna ecosystems. The British Ecological Society, Special Publ. N.º 9. Blackwell Scientific Publications. Oxford, England, pp. 255-271.
- HERNÁNDEZ, R. Y LOMBARDO, C. 1987. Deficiencias de macronutrientes en *Pinus caribaea* var. hondurensis Morelet. Barr. y Golf. Facultad de Ciencias Forestales. ULA. Mérida, 109 p.
- IMBACH, A.C., FASSBENDER, H.W., BEER, J., BOREL, R. Y BONNEMANN, A. 1989. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. IV. Balances hídricos e ingreso con lluvias y lixiviación de elementos nutritivos. Turrialba 39(3): 400-414. (También en Agroforestry Systems 8:267-287).
- JORDÁN, C.F. Y HERRERA, R. 1981. Tropical rain forest: are nutrients really critical? The American Naturalist. 117(2): 167-180.
- KARMACHARYA, S.B. Y SINGH, K.P. 1992. Production and nutrient dynamics of reproductive components of teak trees in the dry tropics. Tree Physiology 11(4):357-368.
- KAUL, O.N., SHARMA, D.C., TANDON, V.N. Y SRIVASTAVA, P.P.L. 1979. Organic matter and plant nutrients in a teak (*Tectona grandis*) plantation. Indian Forester 105(8):573-582.
- KISHORE, N. 1987. Preliminary studies on the effect of phosphatic fertilizers on teak plantation. The Indian Forester 113(6): 391-394.
- LADRACH, W.E. 1980. Respuesta al crecimiento de algunos árboles con la aplicación de fósforo, nitrógeno y boro al momento de la plantación en el Cauca y en El Valle. Informe de Investigación N.º 59. Cartón de Colombia, S.A., Cali, 17 p.
- LANG, S.B. 2000. Effects of logging roads on erosion in a wet tropical forest in the Rio Riyito watershed, Península de Osa, Costa Rica. Colorado State University. MSc Thesis, Fort Collins, USA, 103.
- LÓPEZ, J.C., RIAÑO, N.M., LÓPEZ, Y. 2001. Características fotosintéticas de cinco especies forestales. Cenicafe 52(3):161-169.
- MACKENSEN, J. 1999. Nutrient management for industrial tree plantations (HTI) in Indonesia, a tropical guidance towards integrated nutrient management. GTZ Tropical Forest Research. Eschborn, Alemania, 96 p.

- MEDINA, H. 1974. La fertilización fosfórica de bosques. *Suelos Ecuatoriales* 6(1): 289-299.
- MENA, G., CASTILLO, A. Y COB, J.M. 2000. Informe final proyecto disminución de la contaminación de las aguas del río Virilla. Compañía Nacional de Fuerza y Luz. Convenio Bilateral de Desarrollo Sostenible Costa Rica/Holanda. San José, Costa Rica. s.p.
- MONTAGNINI, F. 2000. Ciclaje de nutrientes en plantaciones con especies puras y mixtas en región de bosque húmedo tropical. En: Consejo Nacional de Rectores, Oficina de Planificación de la Educación Superior. Taller de Nutrición Forestal. San José, Costa Rica, pp. 17-24.
- MONTAGNINI, F. 2002. Tropical plantations with native trees: their function in ecosystem restoration. In: Reddy, M.V. (ed.). *Management of tropical plantation-forests and their soil-litter systems*. Science Publishers, Inc. New Hampshire, USA. Chapter 4, pp. 73-94.
- MONTAGNINI, F. Y JORDÁN, C.F. 2002. Reciclaje de nutrientes. En: M.R. Guariguata y G. Kattan (eds.). *Ecología y Conservación de Bosques Lluviosos Neotropicales*. LUR, Cartago, Costa Rica, pp. 167-191.
- MONTAGNINI, F. Y SANCHÓ, F. 1994. Nutrient budgets of young plantation as with native trees: strategies for sustained management. In: W. Bentley y M. Gowen (eds.). *Forest resources and wood-based biomass energy as rural development assets*. Winrock International and Oxford and IBH Publishing Co., New Dehli. pp.213-233.
- MONTERO, M. 1995. Dinámica de crecimiento de teca (*Tectona grandis*) bajo fertilización en El Limón de Chupampa, Herrera, Panamá. In: *Memorias del Seminario Técnico sobre Fertilización Forestal realizado en Santiago, Veraguas, Panamá*. CATIE/INRENARE, pp. 17-29.
- MONTERO, M. 1999. Factores de sitio que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L.F. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica. Tesis Mag. Ciencias. Universidad Austral de Chile, Valdivia/ CATIE, Turrialba, Costa Rica. 111 p.
- MORALES, J. Y ORTEGA, H. 1980. Fertilización en eucalipto en las sabanas orientales de Venezuela. *Venezuela Forestal* 4: 23-30.
- NAVARRETE, T. E. 1992. Manejo de semillas, viveros y plantación inicial. Semicol Ltda. Colombia, 151 p.
- NOVAIS, R.F., BARROS, N.F. Y NEVES, J.C.L. 1990. Nutrição mineral do eucalipto. In: N.F. Barros y R.F. de Novais (eds.). *Relação solo-eucalipto*. Fhoza de Viçosa. Viçosa, Brasil, pp. 25-98.
- NWOBOSHI, L.C. 1975. Macronutrient deficiency symptoms in teak (*Tectona grandis* L. f.). Bull. No 6, Department of Forest Research Management, University of Ibadan. 12 p.
- NWOBOSHI, L.C. 1984. Growth and nutrient requirements in a teak plantation age series in Nigeria. II. Nutrient accumulation and minimum annual requirements. *Forest Science* 30(1): 35-40.
- NYE, P.H. Y GREENLAND, D.J. 1960. The soils under shifting cultivation. Commonwealth Agricultural Bureux. Tech. Comm. N.º 51. Inglaterra, 156 p.

- POELS, R.L.H. 1994. Nutrient balance studies to determine the sustainability of management systems of natural and plantation forests in Costa Rica. CATIE/AUW/MAG. The Atlantic Zone Programme, Phase 2, Report N.º 82, 36 p.
- PRITCHETT, W.L. 1986. Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa. México, 634 p.
- RAO, D.L.N. 2002. Nitrogen-fixing leguminous trees in forestry and agroforestry systems. In: Reddy, M.V. (ed.). Management of tropical plantation-forests and their soil-litter systems. Science Publishers, Inc. New Hampshire, USA. Chapter 13, pp. 327-350.
- REDDY, M.V. 2002. Introduction: perspectives of soil litter environment in tropical plantation-forests in relation to litter, biota and nutrient dynamics. In: Reddy, M.V. (ed.). Management of tropical plantation-forests and their soil-litter systems. Science Publishers, Inc. New Hampshire, USA, Chapter 1, pp 1-8.
- RICHTER, D.D., RALSTON, C.W. Y HARMS, W.R. 1982. Prescribed fire: effects on water quality and forest nutrient cycling. Science 215:661-663.
- RODRÍGUEZ, D. Y FONSECA, W. 1991. La fertilización con N-P-K para *Tectona grandis* Linn. F., en Nandayure, Costa Rica. Ciencias Ambientales 8: 38-43.
- SALAS, G. DE LAS. 1987. Suelos y ecosistemas forestales con énfasis en América Tropical. Servicio Editorial IICA. San José, Costa Rica, 447 p.
- SAMRA, J.S. Y RIAZADA, A. 2002. Litter production and nutrient dynamics in tropical forest plantations of India. In: Reddy, M.V. (ed.). Management of tropical plantation-forests and their soil-litter systems. Science Publishers, Inc. New Hampshire, USA. Chapter 3, pp 41-71.
- SARMIENTO, G. 1984. The ecology of neotropical savannas. Harvard University Press. USA, 241 p.
- SHARMA, E. 1993. Nutrient dynamics in Himalayan alder plantations. Annals of Botany 72: 329-336.
- SHARMA, S.C. Y PANDE. P.K. 1989. Patterns of litter nutrient concentration in some plantation ecosystems. Forest Ecology and Management 29(3):151-163.
- SPAGENBERGER, A. Y FÖLSTER, H. 2002. Eucalyptus plantations in Brasil: their soil-nutrient dynamics and management. In: Reddy, M.V. (ed.). Management of tropical plantation-forests and their soil-litter systems. Science Publishers, Inc. New Hampshire, USA. Chapter 12, pp. 306-325.
- STONE, E.L. 1990. Boron deficiency and excess in forest trees: a review. Forest Ecology and Management 37: 49-75.
- STUHRMANN, M., BERGMANN, C. Y ZECH, W. 1994. Mineral nutrition, soil factors and growth rates of *Gmelina arborea* plantations in the humid lowlands of northern Costa Rica. Forest Ecology and Management. 70:135-145.
- SZOTT, L.T., FERNÁNDEZ, E.C.M. Y SÁNCHEZ, P.A. 1991. Soil-plant interactions in agroforestry systems. For. Ecol. Mgmt 45: 127-152. Szott, L.T., Palm, C.A. y Buresh, R.J. 1991. Ecosystem fertility and fallow function in the humid and subhumid tropics. Agroforestry Systems 47: 163-196.
- SZOTT, L.T., PALM, C.A. Y BURESH, R.J. 1999. Ecosystem fertility and fallow function in the humid and subhumid tropics. Agroforestry Systems 47: 163-196.

- TANNER, E.V.J., KAPO, V., FRESKOS, S., HEALEY, J.R. Y THEOBALD, A.M. 1990. Nitrogen and phosphorus fertilization of Jamaican montane forest trees. *Journal of Tropical Ecology*, 6: 231-238.
- TILKI, F.Y. FISHER, R.F. 1998. Tropical leguminous species for acid soils: studies on plant form growth in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 108:175-192.
- TORRES, S., MÁRQUEZ, O., HERNÁNDEZ, R. Y FRANCO, W. 1993. Respuesta inicial de crecimiento a la fosforita en teca en los Llanos Occidentales de Venezuela. *Turrialba* 43(2): 113-118.
- TOTEY, N. 1992. Fertilizer management in forest plantations. In: H.L.S. Tandon (ed.). *Non-traditional sectors for fertilizer use. Fertilizer Development and Consultation Organization*. New Dehli, India, pp. 107-128.
- UGALDE, L.A. 1997. (ed.). Resultados de 10 años de investigación silvicultural del proyecto Madeleña en Guatemala. CATIE/DIGEBOS. Serie Técnica, Informe Técnico N.º 287. Turrialba, Costa Rica, 300 p.
- VALLEJOS, B.O. 1996. Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L.F., *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb., en Costa Rica. Tesis Mag. Ciencias. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 147 p.
- VÁSQUEZ, W. 1990. Efecto del fertilizante y el espaciamiento en el crecimiento inicial de *Eucalyptus grandis* en Turrialba, Costa Rica. In: R. Salazar (ed.) *Manejo y aprovechamiento de plantaciones forestales con especies de uso múltiple*. Actas Reunión IUFRO. Guatemala Abril 1989. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica, pp. 209-219.
- VIDAL, I., FERADA, R., RIQUELME, E. 1984. Evolución estacional de nutrimentos en *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Turrialba* 34(3):261-266.
- WATERLOO, M.J. 1994. Water and nutrient dynamics of *Pinus caribaea* plantation forests on former grassland soils in southwest Viti Lavu, Fiji. Tesis Vrije Universiteit Amsterdam. FEBODRUK B.V., Enschede, The Netherlands, 420 p.
- WEBB, M.J., REDDELL, P. Y GRUNDON, N.J. 2001. A visual guide to nutritional disorders of tropical timber species: *Swietenia macrophylla* y *Cedrela odorata*. Camberra, Australia, ACIAR Monograph N.º 61, 178 p.
- WEBB, M.J., REDDELL, P., HAMBLETON, A. Y ROBSON, K. 2000. Growth response of four tropical plantation timber species to increasing phosphorus supply and assessment of phosphorus requirements using foliar analysis. *New Forest*, 20:193-211.
- WIGHTMAN, K.E., SHEAR, T., GOLDFARB, B. Y HAGGAR, J. 2001. Nursery and field establishment techniques to improve seedling growth of three Costa Rican hardwoods. *New Forest* 22:75-96.
- YAMADA, M., TOMA, T., HIRATSUKA, M. Y MORIKAWA, Y. 2004. Biomasa and potential nutrient removal by harvesting in short-rotation plantations. pp. 213-218. In: E.K.S. Nambiar, J. Ranger, A. Tiaras y T. Toma (eds.). *Site management and productivity in tropical plantation forests: Proceedings of Workshop in Congo July 2001 and China February 2003*. CIFOR.

- ZECH, W. Y DRECHSEL, P. 1991. Relationships between growth, mineral nutrition and site factors of teak (*Tectona grandis*) plantations in the rainforest zone of Liberia. *Forest Ecology and Management* 41: 221-235.
- ZELAYA, V.N. Y GUILLÉN, I. 2002. Efectos de las quemas prescritas en las propiedades físico-químicas del suelo, a diferentes intensidades calóricas en bosque de coníferas. *Tatascan* 14(1): 73-81.
- ZÖTTL, H.W. Y TSCHINKEL, H. 1971. Nutrición y fertilización forestal, una guía práctica. Centro de Publicaciones de la Univ. Nacional de Colombia. Medellín, Colombia, 114 p.

BLOQUE II.4. CALIDAD DEL SUELO Y CONTROL DE LA DEGRADACIÓN

Caso II.4.1. Estudio de la calidad de suelos agrícolas bajo distintos sistemas de manejo.

Aproximación a la cuantificación de la calidad del suelo: Selección de indicadores de calidad en secanos cerealistas de la Navarra Media

1. Introducción

En este caso práctico se explica resumidamente el proceso de tratamiento estadístico que permite obtener, a partir de un cierto número de datos de algunas propiedades del suelo, aquellas que son más adecuadas para ser utilizadas como indicadores y deben integrar el conjunto mínimo de datos (CMD) requerido para monitorizar la calidad del suelo (CS).

Una vez seleccionados los indicadores, la evaluación de la calidad se puede realizar midiendo en el tiempo estos indicadores o integrando estos en índices de calidad tal, y como se explica en el capítulo de indicadores de calidad del suelo

En ese mismo capítulo se explica cuáles son los requisitos que deben cumplir los indicadores de calidad, y la necesidad de elegir estos a partir de un CMD equilibrado formado por un número abordable de propiedades del suelo.

Así mismo, se menciona varias veces el carácter específico del lugar y del tipo de estudio, de la calidad del suelo, por ello es importante y necesario caracterizar la zona de estudio y fijar y determinar el tipo de muestreo que se va a realizar para cada uno de los parámetros y los métodos que se van a emplear, todo ello con el fin de facilitar la interpretación de los indicadores. De manera general, previa a la determinación de los parámetros del suelo hay que:

1. Recopilar información de la parcela o finca

Manejo y usos, técnicas empleadas, cultivos, rotaciones, tratamientos de abonado, producciones.

Información general de la zona de estudio, tipo de suelo, climatología (precipitaciones y temperaturas medias).

2. Recopilar información del suelo

Si no existe información previa habrá que realizar catas para clasificar el tipo o tipos de suelo que existen, y habrá que determinar aquellas propiedades intrínsecas y/o poco dinámicas que, aunque no vayan a formar parte del CMD, pueden ayudar en el proceso de selección, interpretación e integración de los indicadores.

Cuando se va a evaluar el efecto de un cambio en el manejo del suelo en la CS, se debe conocer y debe estar perfectamente caracterizado este punto de partida.

3. Determinar época y profundidad de muestreo, manejo de las muestras, y métodos de análisis.

La mayor parte de los parámetros, además de cambios entre campañas también sufren cambios dentro de una misma campaña. Por ejemplo, la densidad aparente del suelo no es la misma cuando el suelo está recién labrado que cuando se ha asentado. Es importante fijar las épocas de muestreo, habrá parámetros para los que hay que esperar un tiempo desde las perturbaciones introducidas y otros que será necesario medir antes y después de una perturbación. La época de muestreo se determina y se mantiene año tras año, de manera que los resultados sean comparables.

La profundidad de muestreo también se deberá fijar. En ocasiones se determinará en función del cultivo, o en función de la profundidad de labrado. En general todos los parámetros tienden a mostrar cierta estratificación con la profundidad. Si se elige una profundidad excesiva puede que estemos perdiendo información, o si se elige una profundidad somera, los datos pueden estar sesgados. Es posible que en todos los casos no tenga interés estudiar profundidades diferentes. Es una decisión específica del tipo de estudio que se va a realizar.

Los métodos de análisis, a menudo se eligen en función de los medios de los que se dispone (material, equipos, recursos humanos, etc.). Los resultados pueden variar en función del método. La determinación de un parámetro va unida a un método, por lo que siempre se debe especificar el método empleado, y es importante que siempre se emplee el mismo para que los resultados sean comparables.

Las condiciones de humedad en las que se recogen las muestras y el manejo posterior que se realiza de las mismas son importantes y se deben registrar.

La intensidad del muestreo depende de la homogeneidad del terreno y de la escala de trabajo. Dependerá de si estamos trabajando a nivel de parcela experimental, a nivel de explotación o a una escala mayor.

2. Material y métodos

En este caso práctico se explica el proceso de selección de indicadores para el estudio de la calidad de un suelo bajo diferentes sistemas de laboreo, una vez realizados los pasos detallados en la introducción.

El estudio se realiza en un ensayo que forma parte de la red experimental del Instituto Técnico de Gestión Agrícola (ITGA) y se puede considerar representativo de la zona semiárida de cultivo de cereal de invierno en Navarra. La información agroclimática de la zona y las características del ensayo se pueden consultar en el caso 1.7 (Agricultura de Conservación en Navarra).

En la figura 1 se resume la información acerca del diseño experimental, los muestreos realizados, los parámetros medidos en campo y en el laboratorio, y los métodos empleados.

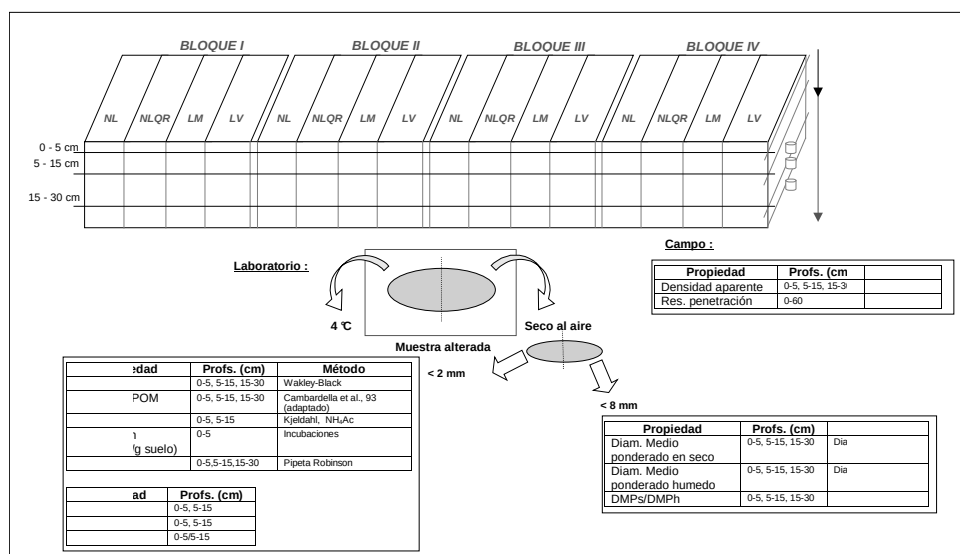


FIGURA 1. Diseño de la parcela experimental, muestreos y determinación de las propiedades utilizadas para la evaluación de la calidad del suelo en función de los diferentes sistemas de cultivo.

NL: no laboreo; NLQR: no laboreo con quema de rastrojo; LM: laboreo mínimo; LV: laboreo con vertedera (tradicional).

C org: C orgánico; C-POM: C en la materia orgánica particular (POM); Estratif.: Ratio de los valores en la prof. 0-5 y 5-15 cm; DMP: Diámetro medio ponderado (s:seco; h: humedo).

3. Estadística

Existen diversas maneras de afrontar el tratamiento estadístico de los datos disponibles con el fin de encontrar las propiedades más adecuadas para su uso como indicadores de calidad del suelo (ver capítulo teórico dedicado a la calidad del suelo). En este caso, se realizó un análisis factorial por componentes principales (CP), que permite seleccionar los indicadores que explican mejor la varianza de la muestra.

El análisis factorial CP se realizó a partir de la matriz de correlación (datos normalizados) para obtener los indicadores de CS más adecuados entre los parámetros estudiados. El proceso de análisis de CP se describe detalladamente más adelante. La validación de los factores obtenidos se realizó mediante el estudio de la varianza (ANOVA) entre los diferentes tratamientos. Se realizó la prueba de Duncan para la determinación de grupos homogéneos, y el estudio de la correlación a través del coeficiente de Pearson y los coeficientes de determinación de las regresiones lineales entre parámetros. Todo el tratamiento estadístico se hizo utilizando el *software* SPSS 12.0 (SPSS Inc., 2002).

4. Resultados y discusión

4.1. Análisis de componentes principales

El procedimiento habitual es utilizar la mayor cantidad posible de datos conocidos sobre el suelo cuya calidad se desea evaluar, y «sintetizar» toda esta información, utilizando normalmente el análisis factorial. Esto permite agrupar las variables estudiadas en unos pocos factores que, aunque contruidos estadísticamente, pueden ser interpretados con respecto a las funciones específicas del suelo para las que su calidad se quiere evaluar (Shuckla et ál., 2006).

Este proceso de tratamiento estadístico permite obtener, a partir de un cierto número de datos de algunas propiedades del suelo, aquellas que son más adecuadas para ser utilizadas como indicadores y deben integrar el CMD requerido para monitorizar la CS, y/o integradas en diferentes índices de CS.

El primer paso para el análisis factorial es el estudio de las correlaciones entre las variables incluidas en el análisis. Algunos autores (Shuckla et ál., 2006; Yemefack et ál., 2006) incluyen en la matriz todas las variables de las que disponen de datos, mientras que otros (Wander y Bollero, 1999; Govaerts et ál., 2006) realizan una selección previa y solo incluyen aquellas en las que han observado diferencias significativas en los diferentes tratamientos o casos de estudio que consideran. De esta manera, aplican «a priori» otro criterio de selección a sus variables: además de explicar la mayor cantidad de varianza posible (análisis factorial), deben presentar diferencias entre los tratamientos. En este caso, se han considerado las propiedades físicas, químicas y biológicas mencionadas en la sección anterior, para la profundidad de 0-150 mm, sin previa verificación de sus diferencias. La verificación de la sensibilidad de las variables a las diferencias entre tratamientos la realizaremos «a posteriori», directamente sobre los factores generados por el análisis, siguiendo el modelo de Yemefack et ál. (2006).

La *matriz de correlaciones* de los valores estandarizados²² se recoge en la tabla 1. Esta tabla permite observar la existencia de correlaciones significativas entre algunas de las variables estudiadas. El determinante de la matriz de correlaciones ($8,253 \times 10^{-13}$) indica la existencia de grupos muy correlacionados, por lo que el análisis factorial es indicado para el tratamiento de estos datos²³.

	RP	Da	DMP h/ DMP _s	C/N total	C/N POM	CO	N	C- POM	N- POM	Ac	K	AG	AF	Li	Resp ^s
RP	1.00														
	0.64														
Da	*	1.00													
DMP _h / DMP _s	0.82	0.55	1.00												
C/N _{total}	0.30	0.22	0.05	1.00											
C/N _{POM}	0.01	0.19	-0.16	-0.25	1.00										
CO	0.47	-0.10	0.42	0.13	-0.28	1.00									
N	-	0.25	-0.31	-0.09	-0.87	0.14	0.09	1.00							
C-POM	-	0.01	0.19	0.02	-0.26	0.85	-0.42	0.02	1.00						
N-POM	0.32	-0.07	0.57	0.12	-0.84	0.49	-0.04	-0.61	1.00						
Ac	0.30	-0.02	0.45	-0.51	0.10	0.39	0.28	0.17	0.24	1.00					
K	0.09	-0.30	0.15	0.06	-0.36	0.52	0.04	-0.39	0.38	0.15	1.00				
AG	0.41	0.07	0.67	-0.41	-0.36	0.31	0.34	-0.17	0.63	0.66	0.28	1.00			
AF	0.24	0.21	0.44	-0.54	-0.28	0.16	0.40	-0.17	0.45	0.63	-0.07	0.80	1.00		
Li	0.28	0.20	0.47	-0.59	0.04	0.22	0.34	0.11	0.27	0.89	-0.02	0.66	0.80	1.00	
Resp.	0.12	-0.07	0.24	-0.04	0.02	0.59	0.21	-0.01	0.10	0.06	0.55	0.10	-0.13	-0.04	1.00

TABLA 1. Correlación entre las propiedades del suelo medidas (0-15 cm) en todos los tratamientos evaluados (n = 16)

RP: Resistencia a la penetración (MPa); Da: Densidad aparente (Mg m^{-3}); DMP: Diámetro medio ponderado (mm; h: en húmedo; s: en seco); CO: Carbono orgánico (g kg^{-1}); N: nitrógeno total (Kjeldahl, g kg^{-1}); C-POM: Proporción de C en la POM ($\text{g}_{\text{C-POM}} / 100 \text{ g}_{\text{CO}}$); N-POM: N en la POM ($\text{g}_{\text{N-POM}} / 100 \text{ g}_{\text{CO}}$); Ac: Arcilla ($\text{g}_{100\text{g}^{-1}}$); K: potasio (ppm); AG: Arena gruesa ($\text{g}_{100\text{g}^{-1}}$); AF: Arena fina ($\text{g}_{100\text{g}^{-1}}$); Li: Limo ($\text{g}_{100\text{g}^{-1}}$); ^sResp.: Respiración acumulada (28 días) en 0-50 mm ($\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1}$)

* Los coeficientes de correlación en negrita son significativos ($P < 0.05$).

²² Los datos deben normalizarse en este tipo de estudios porque provienen de variables diferentes, medidas en distintas escalas. Por el mismo motivo, el análisis de la matriz de covarianza no es adecuado en estos casos.

²³ Una matriz identidad, en la que ninguna fila y/o columna está correlacionada con las demás, presentaría un determinante de 1, mientras que una matriz donde una fila o columna sea combinación lineal de otra, presentará determinante 0.

En 29 de los 105 pares de variables, la correlación fue significativa ($P < 0,05$). Las correlaciones positivas más altas se correspondieron a resistencia a la penetración (RP) con la densidad aparente (D_a) y la estabilidad de la estructura (DMP_i/DMP_s), a las fracciones texturales entre sí, y al contenido proporcional de C en la POM con su ratio C/N. En el primer caso, la relación entre la D_a y la RP es evidente, y la correlación parece indicar que allí donde el suelo está más consolidado, la resistencia a los agregados a degradarse es mayor.

El *análisis de componentes principales* permite crear componentes o «factores» que agrupan los valores de algunas o todas las variables estudiadas y explican más o menos cantidad de la varianza total del conjunto. Esto se hace a partir de la matriz anterior, y cada uno de los componentes extraídos lleva asociado un *autovalor* (*eigenvalue*), que indica la cantidad de varianza que explica ese componente²⁴.

En este caso, los primeros cuatro factores del análisis (*eigenvalue* > 1) explican más del 83% de la variabilidad en los parámetros del suelo estudiados (tabla 2), y fueron los cuatro factores retenidos para proseguir el análisis.

Componente	Autovalor	% de la varianza	%acumulado
1	4.91	32.75	32.75
2	3.26	21.73	54.48
3	2.55	17.00	71.47
4	1.81	12.09	83.56
5	0.78	5.17	88.74
6	0.57	3.78	92.52
7	0.42	2.78	95.30
8	0.36	2.37	97.67
9	0.16	1.08	98.75
10	0.08	0.53	99.28
11	0.05	0.33	99.61
12	0.03	0.22	99.82
13	0.03	0.17	99.99
14	0.00	0.01	100.00
15	0.00	0.00	100.00

TABLA 2. Autovalores (*eigenvalues*) y varianza proporcional y acumulada explicada por el análisis de componentes principales a partir de la matriz de correlación (0-150 mm)

El estudio de las *comunalidades* de las variables después de la extracción de los factores permite observar cuál es el porcentaje de la varianza de cada variable explicado por los factores.

²⁴ Un *eigenvalue* de 2,5 quiere decir que el componente explica el equivalente a 2,5 variables originales. Los factores con *eigenvalue* < 1 explican menos varianza que una variable sola.

La *matriz de componentes rotados* (existen varios métodos de rotación, en este caso se ha utilizado el método *varimax*) permite observar las cargas factoriales de los factores (componentes) seleccionados, es decir, la correlación de cada componente con cada una de las variables estudiadas. El estudio de esta matriz es esencial cuando se aplica el análisis factorial al estudio de la calidad del suelo, ya que a partir de ella se interpreta la relación entre las variables del suelo y los factores seleccionados en el análisis factorial. La tabla 3 recoge la proporción de varianza de las variables de este estudio que queda explicada por los cuatro factores seleccionados, así como sus comunales para los factores del análisis.

	<i>Factor 1</i>	<i>Factor 2</i>	<i>Factor 3</i>	<i>Factor 4</i>	<i>Comunalidad</i>
RP	0.14	0.05	0.90	0.22	0.88
Da	0.01	-0.20	0.81	-0.24	0.75
DMP _h /DMP _s	0.40	0.16	0.80	0.25	0.89
C/N total	-0.81	0.28	0.45	0.03	0.94
C/N POM	0.01	-0.98	0.03	-0.05	0.96
CO	0.16	0.31	0.24	0.78	0.78
N	0.65	-0.16	-0.52	0.18	0.74
C-POM	0.10	-0.88	0.12	-0.14	0.82
N-POM	0.27	0.84	0.25	0.21	0.89
Ac	0.82	-0.06	0.20	0.20	0.76
K	0.00	0.34	-0.10	0.77	0.71
AG	0.78	0.38	0.26	0.15	0.85
AF	0.86	0.31	0.17	-0.18	0.90
Li	0.89	-0.02	0.24	-0.02	0.86
Resp.	0.00	-0.13	0.01	0.89	0.80

TABLA 3. Matriz de componentes rotados (*varimax*) y comunales para las variables del suelo estudiadas (0-15 cm) para cada uno de los factores retenidos

	<i>Factor 1</i>	<i>Factor 2</i>	<i>Factor 3</i>	<i>Factor 4</i>
RP	-0.02	-0.05	0.31	0.07
Da	-0.02	-0.08	0.31	-0.11
DMP _h /DMP _s	0.05	-0.01	0.26	0.06
C/N total	-0.23	0.09	0.19	0.00
C/N POM	0.02	-0.35	0.05	0.09
CO	-0.01	0.01	0.05	0.32
N	0.18	-0.07	-0.21	0.09
C-POM	0.04	-0.31	0.08	0.03
N-POM	0.04	0.27	0.04	-0.02
Ac	0.19	-0.07	0.03	0.06
K	-0.03	0.04	-0.07	0.33
AG	0.17	0.10	0.04	-0.01
AF	0.21	0.11	0.02	-0.16
Li	0.21	-0.03	0.05	-0.05
Resp.	-0.04	-0.15	-0.01	0.44

TABLA 4. Matriz de coeficientes para el cálculo de puntuaciones de los factores

Los cuatro factores seleccionados explican más del 96% de la varianza de la relación C/N en la POM, el 94% en la ratio C/N total, ente el 80% y el 90% de RP, estabilidad estructural, % de C en la POM, N en la POM, las fracciones granulométricas y la respiración en los 5 primeros centímetros de suelo. No se observan variables con comunalidades < 70%, por lo que se mantienen todas las variables iniciales en el análisis²⁵.

La magnitud de las cargas factoriales de la tabla 3 se pueden utilizar para interpretar la relación entre las propiedades del suelo estudiadas y los factores, «asignando» cada una de las propiedades al factor en el cual su carga factorial es mayor. De este modo, en este caso, el factor 1 (que explica el 32% de la varianza) presenta una carga factorial positiva de todas las fracciones más finas de textura y una carga negativa de la relación C/N. Este factor podría denominarse «Incorporación Física», porque explica variaciones en el contenido orgánico en función del contenido en partículas minerales finas.

El factor 2 explica un 22% de la variabilidad con una alta carga factorial positiva de los parámetros relacionados con la POM (porcentaje del C total en la POM, N en la POM y relación C/N en esta fracción). Este factor podría denominarse «Materia Orgánica Activa», ya que es la fracción no ligada de la materia orgánica lo que realmente representan esas variables.

El factor 3 podría denominarse «Estado Físico», ya que explica el 17% de la varianza del sistema con las mayores cargas factoriales provenientes de la resistencia a la penetración, la densidad aparente y la estabilidad de la estructura.

Finalmente, el factor 4 podría llamarse «Disponibilidad para la mineralización», puesto que explica en mayor grado la varianza de las variables respiración, C orgánico total y K en el suelo. Es interesante notar, en este sentido, que ya en la matriz de correlaciones inicial (tabla 1) se observa una correlación significativa entre el contenido en CO y en K²⁶.

²⁵ Las variables con comunalidades bajas están poco o nada correlacionadas con el resto y esto debe tenerse en cuenta. Cuando hay varias variables de este tipo, generalmente aparecen factores mono-variables, es decir, que se corresponden únicamente a cada variable con baja comunalidad.

²⁶ Seguramente la relación entre estos dos factores es más compleja que «el potasio disponible proveniente de la materia orgánica», ya que la liberación de K de los filosilicatos de la fracción arcilla juega un papel esencial en la nutrición vegetal de estos suelos. Es más probable que la materia orgánica esté implicada en el mecanismo de liberación del K de la fracción arcilla, especialmente si consideramos que la fertilización potásica habitual en estos suelos es nula. Esto ilustra claramente cómo el análisis de componentes principales es una herramienta útil, siempre y cuando su diseño y su interpretación se lleven a cabo teniendo en cuenta el medio concreto donde se realiza el estudio.

En general puede observarse (tabla 1) que los factores han agrupado variables correlacionadas entre sí. De esta manera, el análisis factorial ha logrado agrupar 15 propiedades del suelo en cuatro factores, cada uno de los cuales está relacionado con alguna función del suelo (retención de MO, almacén de materia orgánica lábil, resistencia a la degradación, etc.).

4.2. Selección de indicadores

La selección de indicadores de la calidad del suelo (CS) a partir del análisis factorial puede realizarse de varias formas. Como ya se ha comentado en el capítulo dedicado a la CS, la explicación de un porcentaje alto de la variabilidad del sistema no es el único requerimiento que puede y debe hacerse a una propiedad o un grupo de propiedades para pasar a formar parte del CMD necesario para la evaluación de la CS.

Un requerimiento importante si evaluamos suelos para la agricultura, es el de presentar diferencias significativas entre manejos contrastados del suelo. El análisis factorial permite calcular (a partir de los valores de las variables incluidas en cada factor) el valor de cada uno de los factores para cada uno de los casos estudiados, a través de la denominada matriz de coeficientes. La tabla 4 recoge esta matriz para el caso de estudio.

Según esto, por ejemplo, el valor del factor 3 (Estado Físico) para un caso particular, se calcularía a partir de la ecuación:

$$F3 = 0.31*RP + 0.31*Da + 0.26*(DMP_h/DMP_s) + 0.19*C/N_{total} + \dots$$

De esta manera, pueden recalcularse los valores de los factores para todos los casos que se han introducido en el estudio. Esto permite en este caso, observar si se aprecian diferencias significativas o no entre los tratamientos del ensayo (NL, LM, LV, NLQR) en cada uno de los cuatro factores seleccionados. El análisis de la varianza está representado en la tabla 5.

	<i>Factor 1</i>	<i>Factor 2</i>	<i>Factor 3</i>	<i>Factor 4</i>
NL	0.272	-1.195 * a	0.339 b	0.793
LM	0.432	0.299 b	-0.720 a	0.025
LV	-0.774	0.143 b	-0.881 a	-0.394
NLQR	0.069	0.753 b	1.262 c	-0.423

TABLA 5. Efecto de los sistemas de manejo sobre los factores del análisis de componentes principales

En esta tabla puede observarse cómo los factores 1 y 4 no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, mientras que los factores 2 y 3 sí lo hacen. Las variables con mayor carga factorial en estos factores serán, por lo tanto, los mejores indicadores de la calidad del suelo estudiado. Si se observan las

variables con más carga factorial en los factores 2 y 3 (tabla 3), estas son las variables relacionadas con la POM (considerada reiteradamente un indicador precoz de los cambios en la calidad del suelo originados por el manejo agrícola) y los parámetros que indican el estado físico del suelo (RP, Da, estabilidad estructural).

El análisis discriminante de las propiedades que conforman un factor permite observar cuáles explican una cantidad mayor de varianza. En el caso de los factores 2 y 3 (tabla 4), puede verse que las propiedades señaladas en la tabla 3 para describirlos explican un porcentaje similar de varianza (aproximadamente un tercio), por lo que lo adecuado sería elegir los seis parámetros (C en la POM, N-POM, C/N en la POM, RP, Da y DMP_N/DMP_S) como necesarios para el CMD.

El estudio de la redundancia de estas propiedades (Tabla 1) parece indicar que la alta correlación entre alguno de ellos permitiría reducir el número de variables.

De esta manera, el análisis factorial permite identificar estas propiedades como indicadores adecuados de la CS para este tipo de suelos, bajo estas condiciones de manejo, y para las funciones del suelo asociadas a la producción agrícola (ver capítulo «calidad del suelo»).

4.3. Verificación de los indicadores seleccionados

El último paso para la adopción de los indicadores surgidos del análisis anterior debe ser la verificación de su capacidad para funcionar como tales, es decir, de detectar cambios en la CS. En nuestro caso, esto puede hacerse mediante análisis de la varianza de estas propiedades en los tratamientos estudiados (NL, NLQR, LM, LV).

Finalmente, una vez los indicadores seleccionados, su utilización para el estudio de la CS puede hacerse de diversas maneras:

La manera más simple es su monitorización en el tiempo y en el espacio. La interpretación de estos parámetros debe hacerse considerando qué cualidad del suelo representan, y a qué función del suelo se corresponden (Shukla et ál., 2006; Yemefack et ál., 2006).

Numerosos autores han buscado y elaborado, a partir del análisis factorial, índices de calidad del suelo. Los índices de calidad son el resultado de fórmulas matemáticas que integran todos o varios de los parámetros seleccionados como indicadores.

Los factores provenientes del análisis factorial pueden usarse en ocasiones como índices de calidad. La figura 2 representa la relación entre los factores 2 y 3 en todos los casos incluidos en el análisis anterior (n=16), y en ella puede observarse cómo los tratamientos quedan separados en función de ellos. El suelo

bajo no laboreo (NL) presenta valores positivos tanto para el factor 2 (POM) como para el 3 (estado físico). El suelo bajo NL con quema de rastrojo (NLQR) presenta igualmente valores positivos para el factor «estado físico», pero no así para el factor «POM». Los dos tratamientos con laboreo (LM, LT) presentan valores intermedios en lo que se refiere a materia orgánica lábil, y siempre negativos en el factor «estado físico».

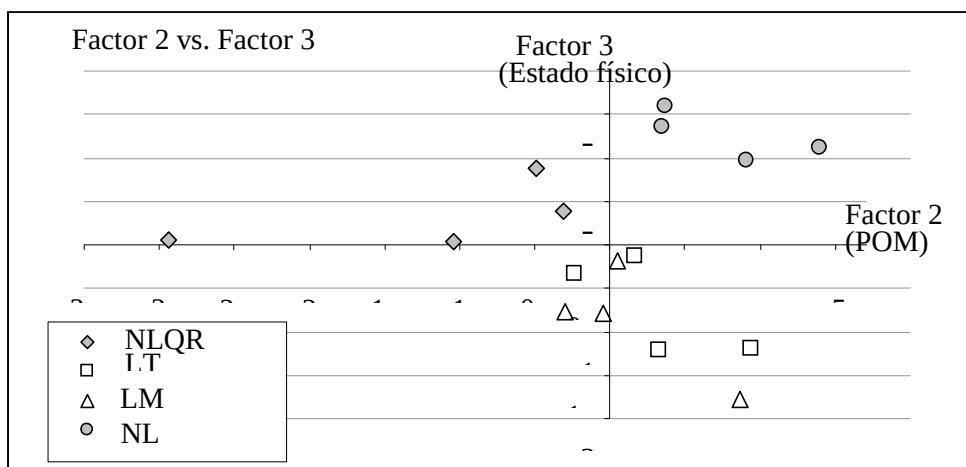


FIGURA 2. Valores de los factores 2 y 3 en función de los tratamientos de manejo.

Andrews et ál. (2002, 2004) proponen un sistema «mixto» en el que cada variable seleccionada es primero evaluada individualmente, y después «ponderada» según el porcentaje relativo de varianza²⁷ explicado por el factor en el que quedó incluida en análisis de CP. La suma ponderada de los valores obtenidos por cada variable evaluada individualmente (de 0 a 1), constituye su índice de calidad del suelo. Este es un proceso que implica la generación de curvas y la identificación de los algoritmos que mejor definan la relación entre el indicador y la función del suelo que se quiere evaluar (Andrews, 2004).

A partir de las llamadas ecuaciones de edafotransferencia, que combinan propiedades relacionadas entre sí para «deducir» unas propiedades de otras, y/o integrar varias propiedades relacionadas.

Un índice de calidad del suelo correctamente elaborado debe ser sensible a cambios en el manejo, y permitir modelizar el estado del suelo (calidad dinámica) en el tiempo y como elemento del ecosistema.

²⁷ El porcentaje de varianza explicado por el factor en que se incluyó la variable en relación al % de varianza explicado por todos los factores seleccionados en el análisis de componentes principales (p.ej., todos los que tienen *eigenvalue* >1).

5. Conclusiones

El análisis factorial ha permitido seleccionar seis propiedades (C en la POM, N-POM, C/N en la POM, RP, Da y DMP_h/DMP_s) de las 15 iniciales como indicadores de la calidad del suelo. Algunas de estas propiedades presentan un alto grado de correlación entre sí, por lo que este conjunto de variables podría ser fácilmente reducido sin perder representatividad.

Dentro de estas variables se encuentran dos (estabilidad estructural y materia orgánica lábil) que han sido tradicionalmente reconocidas y utilizadas como propiedades de «diagnóstico» en los estudios de degradación del suelo como resultado de las prácticas agrarias.

Aunque en principio los indicadores seleccionados se agrupan dentro de las llamadas propiedades «físicas» y «químicas» del suelo, existen numerosos estudios que demuestran su relación directa (especialmente de las dos anteriores) con las propiedades biológicas del suelo. De hecho, la materia orgánica lábil es considerada un indicador de carácter biológico por muchos investigadores.

Una evaluación completa de su valor como indicadores requerirá la verificación de su sensibilidad a cambios en el manejo en el tiempo y de su correlación con variables no edáficas (rendimiento, degradación del agrosistema), así como la elaboración y descripción de métodos simples y económicos para su determinación.

6. Bibliografía

- ANDREWS, S.S., KARLEN, D.A., CAMBARDELLA, C. A. 2004. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal* 68: 1945-1962.
- ANDREWS, S.S., MITCHELL, J.P., MANCINELLI, R., KARLEN, D.L., HARTZ, T.K., HORWATH, W.R., PETTYGROVE, G.S., SCOW, K.M., MUNK, D.S. 2002. On-farm assessment of soil quality in California's central valley. *Agronomy Journal* 94 (1): 12-23.
- GOVAERTS, B., SAYRE, K.D., DECKERS, J. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research* 87 (2): 163-174.
- SHUKLA, M.K., LAL, R., EBINGER, M. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research* 87 (2): 194-204.
- WANDER, M.M., BOLLERO, G. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Science Society of America Journal* 63: 961-971.
- YEMEFACK, M., JETTEN, V.G., ROSSITER, D.G. 2006. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems. *Soil and Tillage Research* 86(1): 84-98.

Caso II.4.2. Cartografía y evaluación del riesgo de erosión tras un incendio forestal en la comarca de El Solsonés (Lleida, España)

RESUMEN

En la comarca prepirenaica de El Solsonés (Lleida, España) ocurrió un incendio forestal en julio de 1998 que afectó a unas 25 000 ha, más de la mitad cubiertas por bosque de acicufolios (*Pinus nigra* básicamente y también *Pinus halepensis*), con pies de caducifolios (*Quercus ilex*, *Q. Faginea* y *Q. Cerrioides*). Dado que la eliminación de la cubierta vegetal por el fuego dejaba el terreno susceptible a los agentes erosivos, se realizó este trabajo con el objetivo de elaborar una cartografía del riesgo de erosión y degradación del suelo por erosión hídrica y así poder delimitar las unidades de actuación más urgente. La metodología de trabajo fue: determinar el grado de afección del incendio mediante observaciones de campo, cartografiar la pendiente, orientación y forma del relieve en base al modelo digital del terreno de malla 25*25 m, para delimitar las unidades de muestreo y determinar los factores principales en el desarrollo de los procesos erosivos, en base al muestreo estratificado de las formas de erosión actual. Las clases de riesgo de pérdida de suelo se establecieron en base al grado de afección del incendio, pendiente y forma del relieve en planta; como resultado se clasificaron en 4 clases de riesgo de erosión (bajo, moderado, alto y muy alto) que en porcentaje respecto a la superficie total fue del 17, 18, 50 y 15% respectivamente. Además, se estableció el riesgo de degradación al integrar la información anterior con la profundidad actual del suelo creando nuevamente 4 clases de riesgo de degradación por erosión (bajo, moderado, alto y muy alto) cuya proporción relativa en cuanto a la superficie total fue del 4, 24, 51 y 21%, respectivamente.

1. Introducción y objetivos

El incendio ocurrido en la zona prepirenaica de El Solsonés (Lleida, España) arrasó unas 25 000 ha, más de la mitad con uso forestal. La vegetación dominante en esta zona eran bosques principalmente de *Pinus nigra* y también *Pinus halepensis*, en muchos casos combinados en menor proporción con especies caducifolias (*Quercus ilex*, *Q. coccifera*, *Q. faginea*). La ocurrencia de un incendio de estas magnitudes puede afectar en diferentes aspectos tanto sociales como ambientales.

Desde el punto de vista del suelo, el incendio implica un cambio en sus propiedades físicas como consecuencia del aumento de temperatura en la superficie del suelo; una alteración de las propiedades químicas a causa de una mayor liberación de elementos químicos por efecto de la oxidación de nutrientes existentes en la biomasa, pero que pueden ser lavados fácilmente; y un riesgo de erosión hídrica por alteración de las condiciones hidrológicas a causa de la pérdida de la cubierta vegetal.

Además, al modificarse el ecosistema se limita la función del suelo como soporte de la actividad biológica de muchos microorganismos y de compartimiento principal del ciclo de nutrientes, esto implica una degradación del suelo, recurso no renovable a escala antrópica.

Es por esto que este trabajo pretende establecer las zonas que presenten una mayor susceptibilidad a sufrir procesos de erosión hídrica y degradación de suelos, y ser la base a partir de la cual definir áreas que requieren de una rápida intervención y planificación de las actuaciones. Los objetivos específicos del trabajo son:

Caracterizar el grado de afectación del incendio en la cubierta vegetal.

Estudiar los procesos de erosión hídrica que se han desarrollado en la zona incendiada que permita sentar las bases para la predicción de la erosión potencial.

Elaborar una cartografía de riesgo de erosión y degradación de suelos por erosión hídrica.

2. Metodología

Enfoque metodológico

En la figura 1 se muestra el esquema metodológico seguido. Se inicia con la recopilación de la información, el inventario general se realiza con la bibliografía existente y se diseña un plan de muestreo para la información complementaria. En base al modelo digital del terreno y la información recopilada se procesan los datos para obtener unidades homogéneas tanto al grado de erosión actual como al de afección de la cubierta vegetal. El análisis de la información recopilada en campo lleva a la determinación de un modelo de erosión potencial y de degradación del suelo que permiten zonificar riesgos.

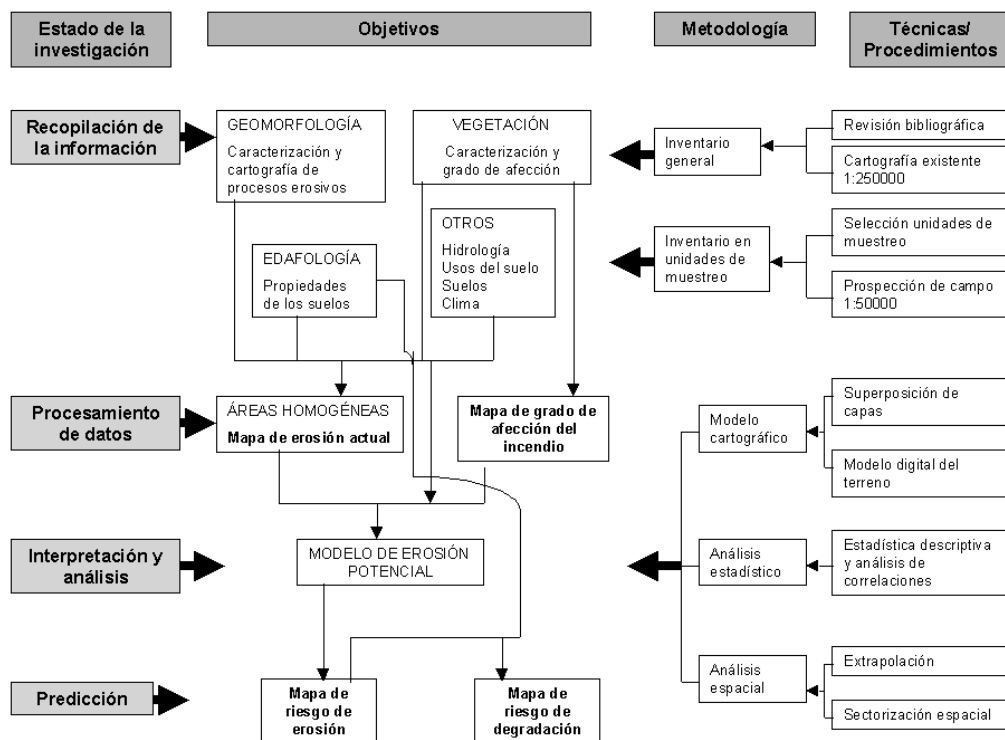


FIGURA 1. Esquema metodológico (adaptado de López y Zinck, 1991)

Inventario general

Se utilizó la cartografía existente a escala 1: 250 000, en concreto los mapas geológicos, hidrogeológicos y de vegetación. Los mapas topográficos se disponían a escala 1: 50 000 y 1: 5000. Los datos climáticos se tomaron de una estación pluviométrica situada en el pantano de Sant Ponç con datos disponibles durante más de 50 años.

Grado de afección del incendio

Después de visitas de campo se definieron 5 clases de afección del incendio a la cubierta vegetal A, B, C, D y F que se definen en la tabla 1. La delimitación del grado de afección se realizó en campo mediante observación del estado de la cubierta, cubriendo todo el territorio afectado.

Código	Descripción
A	Masa forestal no afectada
B	Masa forestal con el sotobosque quemado: estratos arbustivo y herbáceo quemados en más del 80% y el arbóreo menos del 60%
C	Masa forestal sofocada: estratos arbustivo y herbáceo totalmente quemados y el arbóreo con pocas posibilidades de supervivencia, pero con hojas muertas en las ramas
D	Masa forestal totalmente quemada: pocas hojas muertas en los árboles y/o en el suelo
F	Masa forestal irregularmente quemada

TABLA 1. Descripción de los grados de afección del incendio

Base cartográfica digital

Como base cartográfica de trabajo y de presentación de resultados se dispuso del mapa topográfico digital con una malla de 25 m de lado que permitía el trabajo a escala 1: 25 000. Esta base se utilizó para calcular el mapa de pendientes, el de orientaciones y el de forma en planta, que nos permitió delimitar las unidades de muestreo y la elaboración de la cartografía final.

Unidades de muestreo

Se determinaron unidades de muestreo para determinar las características de vegetación, edáficas y las evidencias erosivas tras el incendio. La selección de estas unidades se basó en el grado de afección de la cubierta y en otros parámetros topográficos (pendiente, orientación, amplitud del relieve y forma en planta).

Se tomaron 100 puntos de muestreo, en los que se registraba:

- Localización del punto de muestreo: coordenadas x, y, z.
- Materiales geológicos (cortes, paredes de barrancos,...).
- Condiciones de la superficie del suelo: pedregosidad, depósitos recientes, cenizas, ...
- Geomorfología: regional, local, orientación, ...
- Vegetación: arbórea, arbustiva y herbácea, proporción y grado de afección.
- Procesos erosivos: salpicadura, laminar difusa y concentrada, cárcavas y barrancos.
- Medidas de conservación de suelos: presencia y efectividad.
- Características de los suelos: profundidad, raíces finas, estructura, textura,...
- Intensidad del fuego: grado y % afectado.

Manejo y tratamiento de los datos

Se realizó un análisis estadístico para determinar los componentes principales y su grado de incidencia en los procesos erosivos. Este análisis sirvió para el desarrollo del modelo de erosión potencial.

3. Características de la zona

Localización

El Solsonés es una comarca del pre-pirineo catalán, situada en la provincia de Lérida y limítrofe con la provincia de Barcelona (figura 2). La capital comarcal es Solsona, que es el municipio con mayor población.



FIGURA 2. Localización de la comarca de El Solsonés en Cataluña

Climáticas

El diagrama ombrotérmico de la zona se muestra en la figura 3, que refleja un marcado carácter mediterráneo con una sequía estival perceptible y máximos de precipitación en primavera y otoño.

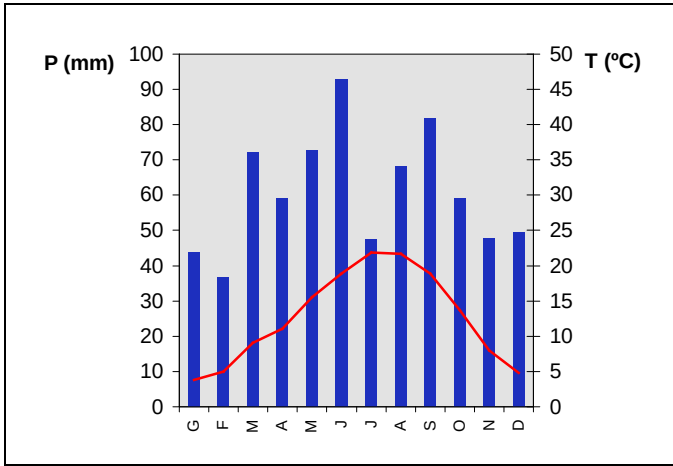


FIGURA 3. Diagrama ombrotérmico de la estación meteorológica del pantano de Sant Ponç
P: Precipitación mensual, mm (barras)
T: Temperatura media mensual, °C (línea)

Después del incendio de julio de 1998, las precipitaciones fueron inferiores a la media (tabla 2) lo que causó que las evidencias erosivas durante el muestreo fueran bajas.

Período	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Total
Precipitaciones (Jul 98-Feb 99)	4.4	0	23.4	29.4	6.2	19.0	52.8	0	135
Frecuencia de no excedencia	10.5	0	12.3	33.3	12.3	28.1	80.7	0	0

TABLA 2. Precipitaciones después del incendio, observatorio de Clariana. Fuente: IMN
Precipitaciones en mm
Frecuencia de no excedencia en tanto por ciento

Geomorfológicas

Desde el punto de vista de la estructura geológica, el área quemada se encuentra en el antepaís plegado del Pirineo, es decir, sobre formaciones sedimentarias paleógenas, y por tanto, anteriores a la actividad de los esfuerzos tectónicos que construyeron la cordillera desde el cretáceo hasta el mioceno. Los estratos de rocas detríticas adquieren fuertes buzamientos en las proximidades de los ejes anticlinales de Cardona y de la Molsosa, en dirección WSW-ENE en bandas relativamente estrechas, mientras que los sinclinales son muy laxos. El sector del área quemada al norte del flanco de la anticlinal de Cardona presenta buzamientos muy débiles o nulos.

En consecuencia, se distinguen dos unidades estructurales de relieve:

Al sur, un relieve estructural de plegamiento con las formas tendiendo a adoptar la dirección estructural de los ejes de los pliegues, con laderas asimilables

a frentes y dorsos de cuesta, alternando según el sentido de buzamiento y mayor desarrollo de la red de drenaje subsecuente.

Al norte, un relieve estructural tabular sin orientación preferente de las formas. Las formaciones más competentes pueden originar escalones.

Edáficas

En general, los suelos del área estudiada son calcáreos, de textura moderadamente fina, con pocos o frecuentes elementos gruesos, y contenidos de materia orgánica en el horizonte mineral superficial que casi nunca sobrepasan el 4%. Desde el punto de vista de la profundidad del suelo, criterio que se utilizará para analizar el riesgo de degradación del suelo se pueden definir 4 clases:

- Profundidades inferiores a 30 cm, incluso inferiores a 15 cm, que se sitúan en plataformas estructurales y partes altas de dorsos de cuesta.
- Predominio de profundidades menores de 30 cm en laderas orientadas al sur.
- Predominio de profundidades entre 30 y 50 cm en laderas en otras exposiciones.
- Profundidades superiores a 75 cm en fondos de valle y laderas abancaladas de forma cóncava en planta.

Usos del suelo

La zona de El Solsonés afectada por el incendio presentaba superficies dedicadas a la explotación forestal (12 500 ha) y a la agrícola (6 000 ha). Estas actividades se complementaban con la explotación ganadera.

La explotación forestal comprendía el aprovechamiento de bosques de acicufolios (básicamente *Pinus nigra*) que, a causa del régimen de propiedad, básicamente privado, se gestionaban en función de los intereses de cada propietario y normalmente mediante la técnica del uroneo a diámetro fijo destinado a palo. La explotación agrícola se basa en un sistema de cultivos extensivos de secano (cultivo de cereales, principalmente, y de forrajeras). La explotación ganadera presenta las dos alternativas, por una parte intensiva y por otra aprovechamientos más extensivos de prados y del sotobosque y estrato herbáceo de masas forestales.

4. Resultados y discusión

Grado de afección del incendio

El mapa de afección del incendio en la cubierta vegetal se muestra en la figura 4. En la tabla 3 se muestra la superficie total afectada por el incendio en la comarca del Solsonés y desglosada para cada clase de afección; también se

representa el porcentaje que estas superficies representan respecto al total de la superficie afectada.

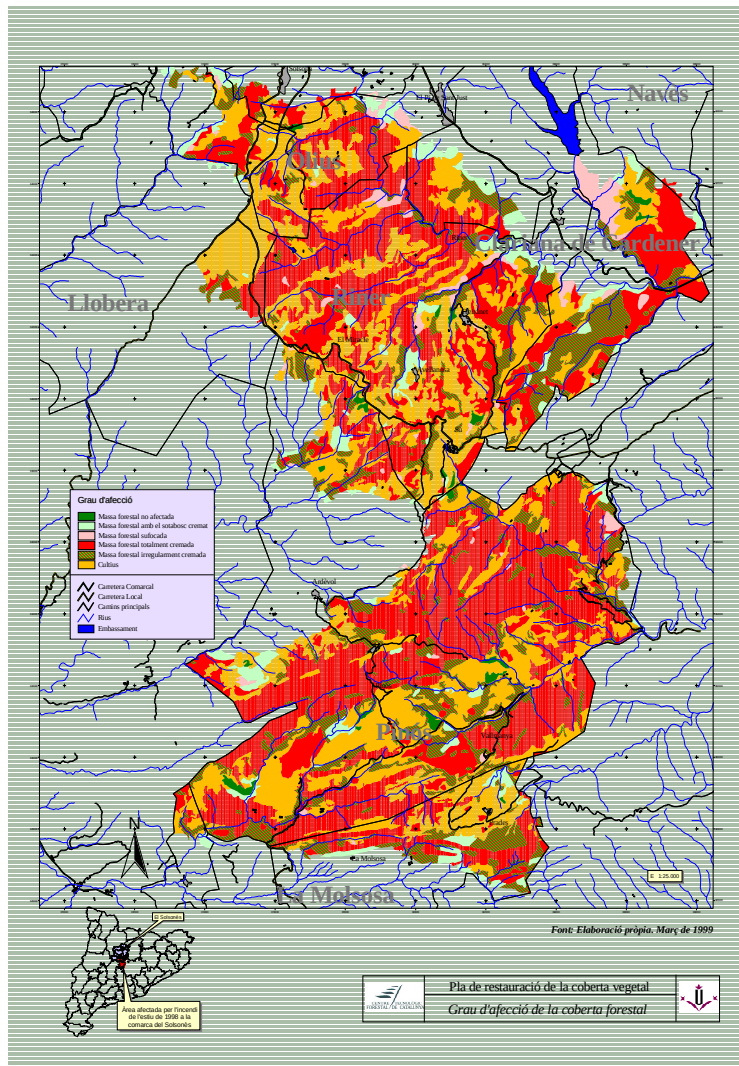


FIGURA 4. Mapa de grado de afectación del incendio

<i>Grado de afección de la cubierta forestal</i>	<i>Superficie ocupada (ha)</i>	<i>Porcentaje sobre la superficie total afectada (%)</i>
No afectada (A)	135	1
Fuego de sotobosque (B)	866	7
Afección irregular (F)	2587	21
Sofocada (C)	392	3
Totalmente quemada (D)	8467	68
TOTAL	12446	100

TABLA 3. Superficie forestal de cada clase de grado de afección y porcentaje que representa respecto al área forestal afectada por el incendio en la comarca del Solsonés

Se puede observar que la mayor parte del territorio forestal fue afectada intensamente durante el incendio y que la segunda clase de importancia son las zonas irregularmente quemadas, en las que existe alguna posibilidad de regeneración de la cubierta.

Erosión actual

El grado de erosión actual se ha estimado en función de los rasgos erosivos observados en campo, se obtuvo una relación no lineal entre la erosión por salpicadura, laminar difusa y laminar concentrada, dando mayor énfasis a esta última por ser la que provoca mayores daños.

En la tabla 4 se observan las superficies afectadas en cada clase y el porcentaje respecto a la superficie total.

<i>CLASE</i>	<i>SUPERFICIE (ha)</i>	<i>% RESPECTO TOTAL</i>
Muy ligera	1677	14
Ligera	10606	86
Moderada	0	0

TABLA 4. Superficies correspondientes a las clases del mapa de erosión hídrica total

Como se había comentado al describir la precipitación después del incendio, la cantidad fue muy inferior a los valores medios y, además, la precipitación en el mes de enero fue en forma de nieve y, por lo tanto, menos erosiva; esto ha provocado que los rasgos erosivos sean débiles en la mayoría de la superficie.

Erosión potencial

Para deducir el grado de erosión potencial de manera cualitativa, se creó un modelo de erosión que combinaba los siguientes parámetros:

- Grado de afección de la cubierta
- Forma en planta
- Pendiente

Los dos primeros se dedujeron del análisis de componentes principales y el último se introdujo como factor del relieve influyente en los procesos erosivos. Al primero de los términos se decidió darle mayor peso ya que era el que

representaba mayor porcentaje de explicación de la erosión, se basó en el siguiente modelo:

Erosión potencial = clase de afección * (clase de pendiente + clase de forma en planta).

La superficie perteneciente a cada clase de riesgo de erosión así como el porcentaje respecto a la superficie total se muestran en la tabla 5.

CLASE	SUPERFICIE (ha)	% RESPECTO TOTAL
1. bajo	2391	18
2. moderado	2315	18
3. alto	6482	50
4. muy alto	1740	13

TABLA 5. Superficies correspondientes a las clases del mapa de riesgo de erosión

Se puede observar que las superficies con riesgo de erosión alta o muy alta es muy superior a los datos de erosión actual, esto demuestra la necesidad de protección del suelo ya que aunque por ahora no se han desarrollado demasiado los procesos erosivos, la probabilidad de que ocurran es elevada.

Degradación de suelos

Para calcular el riesgo de degradación se ha utilizado como criterio además del riesgo de erosión, la profundidad actual del suelo; resultando un mayor riesgo de degradación cuando el suelo es poco profundo.

Los resultados se muestran en la figura 5 y las superficies y porcentajes de cada clase en la tabla 6.

CLASE	SUPERFICIE (ha)	% RESPECTO TOTAL
1. bajo	497	4
2. moderado	2910	24
3. alto	6204	51
4. muy alto	2637	21

TABLA 6. Superficies correspondientes a las clases del mapa de riesgo de degradación

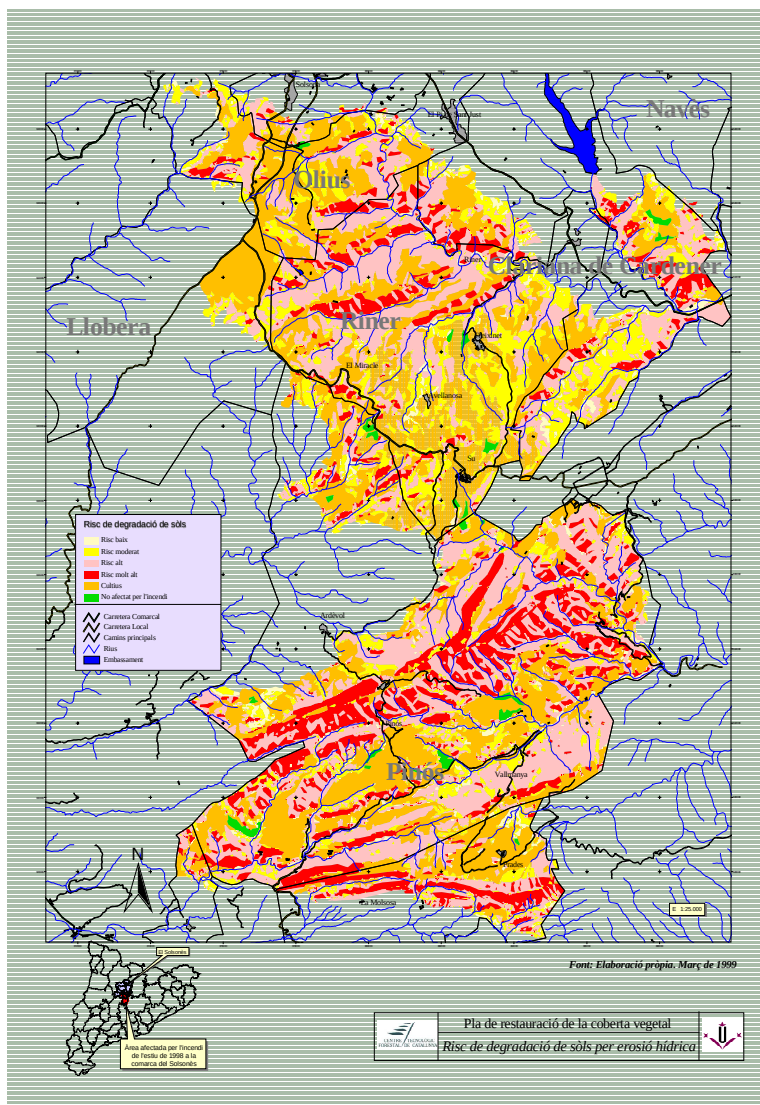


FIGURA 5. Mapa de riesgo de degradación

Al calcular el riesgo de degradación, la situación empeora, aumentando las superficies con riesgos altos y muy altos, ya que la mayoría de los suelos con elevado riesgo de erosión tienen poca profundidad de suelos.

5. Conclusiones

El mapa de grado de afección del fuego en la cubierta forestal permite plantear de forma más sencilla el estudio de aspectos más concretos como la regeneración natural, las reforestaciones, la introducción de nuevas especies, etc. En definitiva para permitir el estudio de alternativas en la planificación del territorio.

El análisis de los procesos erosivos actuales no ha aportado toda la información necesaria para definir el modelo de riesgo con precisión ya que los eventos erosivos después del incendio fueron muy débiles. Sin embargo, los resultados obtenidos sirven como una primera aproximación sabiendo que es necesaria más información.

El mapa de riesgo de degradación realizado permite delimitar las unidades prioritarias de actuación. Sin embargo, se ha calculado en función de una propiedad del suelo, su profundidad y existen otras propiedades del suelo que pueden influir en su degradación. Para posteriores estudios más detallados sería necesario disponer de la mayor información edáfica.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a Jordi Roca, Francesc Mora, Eduardo Rodrigo y Marc Cases los consejos y discusiones realizadas, así como la ayuda en los trabajos de campo y redacción; y a David Fargas y J. Antonio Martínez su ayuda en el procesamiento de los datos digitales.

Bibliografía

- LÓPEZ, H.J. Y J.A. ZINCK. 1991. GIS-assisted modelling of soil-induced mass movements hazards: A case study of the upper Coello river basin, Tolima, Colombia. ITC Journal 1991-4.
- PAPÍÓ, C. 1994. Ecologia del foc i regeneració en garrigues i pinedes mediterrànies. Institut de Estudis Catalans. Barcelona
- TERRADAS, J. 1996. Ecologia del foc. Proa, Barcelona.

Caso II.4.3. Restauración de suelos en zonas mineras. Aplicación a la zona carbonífera del Bajo Segre (Lleida, España)

Resumen

En la subcomarca del Bajo Segre (Lleida, España) existen explotaciones mineras subterráneas de carbón que generan grandes cantidades de material de rechazo el cual se acumula en escombreras. La legislación española obliga a la rehabilitación del territorio afectado. La aridez del clima impide extrapolar metodologías de revegetación diseñadas para zonas más húmedas y el mantenimiento del riego resulta demasiado costoso. En este caso se plantea la rehabilitación a bajo coste, utilizando material de rechazo de la propia explotación minera junto con purín porcino, lodos de depuradora y paja. Se desarrollan metodologías con distintas combinaciones de los factores citados según la morfología del área afectada (zonas con o sin pendiente). La evolución de las propiedades edáficas, el recubrimiento de la superficie por parte de la vegetación y la tipología de la misma avalan la viabilidad del procedimiento propuesto.

1. Introducción y objetivos

Las escombreras generadas por la actividad de explotación de carbón, en minería de interior, deben integrarse en el entorno para disminuir su impacto ambiental. Esta actividad de integración se denomina rehabilitación. La rehabilitación es un proceso mediante el cual se vuelve a hacer útil o habitable un entorno (Porta et ál., 2003), con un grado de productividad acorde con unos objetivos previamente fijados. La nueva situación debe ser sostenible y compatible con los requerimientos del uso previsto.

Los objetivos que se plantean en el caso estudiado se centran en dos aspectos, primero el establecer un procedimiento viable y de bajo coste para la rehabilitación de escombreras de carbón en una zona semiárida del noroeste español y segundo el dar salida a los residuos orgánicos, mayoritariamente purín porcino de las explotaciones ganaderas que rodean las minas. Como alternativa se plantea el uso de lodos de depuradora.

2. Materiales y métodos

La localización de la explotación y características climáticas se hallan descritas en la hoja resumen. Cabe remarcar las características climáticas de tránsito entre mediterráneo semiárido a continental. Como información complementaria, en la zona se encuentran básicamente materiales sedimentarios del Terciario, de tipo detrítico, destacando las calizas. Los suelos presentan elevados contenidos de carbonatos, con presencia de yeso y tendencia hacia una fracción textural limosa y arcillosa. En la vegetación natural domina el subgrupo *Rosmarino-Erigió* (Escuer, 1998). Se trata de una vegetación esclerófila mediterránea, con dominancia de arbustivas: *Rosmarinus officinalis*, *Thymus vulgaris*, *Globularia sp.*, *Sedum sediforme* y de arbustivas de mayor porte junto con arbóreas: *Pistacea lentiscos*, *Juniperus oxicedrus*, *Pinus halepensis*.

La metodología de rehabilitación se separa según las morfologías de la zona, por un lado las zonas sin pendiente o planas y por otro las zonas con pendiente. En estas áreas los suelos de las áreas no afectadas son de escasa profundidad (raramente superan los 40 cm), pero no se realizó un decapado previo a la creación de las distintas morfologías. El decapado, si ello fuera posible, sería la opción primera en las nuevas actuaciones.

2.1. Materiales disponibles

La premisa de la rehabilitación o condición impuesta en el caso que se presenta es proponer una alternativa económica a la recuperación de las áreas afectadas por lo que los materiales empleados han de estar disponibles localmente

y no requerir mantenimiento tras la actuación. También la actuación ha de poder ser realizada con la maquinaria y personal de la propia explotación.

La extracción tradicional por métodos de minería interior, hasta finales del siglo pasado, consistía en las labores de perforación, voladura, desescombro, transporte al exterior, cribado y separación por flotación. Esta última no se realiza en la actualidad. La eficiencia es del 12% (carbón obtenido respecto al material extraído). Como resultado del proceso se obtienen los estériles del cribado, de ahora en adelante material grueso y el polvo de carbón que se recogía en grandes balsas de decantación, de ahora en adelante material fino. Las características químicas de estos materiales en la fracción menor de 2 mm se describen en la tabla 1. El material grueso presenta un 89% en peso de elementos gruesos (> 2 mm) con un 93% de los mismos entre 2 a 6 cm. El material, de baja fertilidad, está compuesto mayoritariamente por calizas mezcladas con yeso y lignito. Los datos de salinidad van ligados a la presencia de yeso y sales magnésicas. El material fino presenta el inconveniente de compactarse cuando se seca.

Característica	Material fino	Material grueso	Característica	Material fino	Material grueso
pH (1:2,5)	7,6	7,5	Caliza activa (%)	19	16
CEe (dS/m a 25 °C)	6,3	6,3	Arena USDA (%)	16,6	62,3
CO ₃ Ca eq. (%)	51	52	Arcilla (%)	20,1	10,1
P Olsen (mg kg ⁻¹)	3	2	Limo USDA (%)	63,3	27,6
K AcNH ₄ (mg kg ⁻¹)	42	33	N Kjeldahl (%)	0,21	0,28

TABLA 1. Características de los estériles, material grueso y fino, de la explotación de carbón

Para incrementar la fertilidad química de los materiales, especialmente con el aporte de nutrientes, se plantea la aplicación de purín porcino, fertilizante orgánico excedentario en la zona, de manera que deje de ser un residuo a transformar o transportar y se pueda valorizar en el área próxima donde se produce. La aportación debe de ser única por unidad de superficie, aunque las cantidades, para dar salida al purín, se establece que sean elevadas siempre que no se impacte al medio p.ej., con lixiviación de nitratos tras la mineralización. También que puedan realizarse las actuaciones en épocas en donde este fertilizante no se pueda aplicar en las explotaciones agrícolas. El purín porcino presenta una composición variable dependiendo entre otros factores de la dieta del animal, el tipo de explotación (cerdo de engorde, reproductoras) y manejo. Como característica principal cabe señalar su bajo contenido en materia orgánica (no suele alcanzar el 10% sobre materia fresca) con una baja relación C/N entre 5 y 6. En el caso planteado se dispone de un purín de cerdo de engorde con un valor medio de 15,6% de materia seca y densidad media de 1048 g/l. El contenido medio de nitrógeno total era del 5,3%, del cual un 63% se encontraba en forma amoniacal y el resto en forma de nitrógeno orgánico.

En la zona agrícola que rodea las explotaciones mineras existe una importante agricultura de secano. Se practica el cultivo de cereales, cebada y trigo, con lo que la paja, como fuente adicional de carbono, es fácilmente disponible.

Como alternativa al purín existe la posibilidad de utilizar lodos de una depuradora cercana. Las características de los lodos utilizados en parte del proceso de rehabilitación se presentan en la tabla 2.

Parámetros	Resultados	Metales pesados	Resultados
pH	8,46	Cobre (Cu) (ppm)	206
Conductividad (dS/m)	1,77	Níquel (Ni) (ppm)	39
Materia seca (%)	17,20	Cromo (Cr) (ppm)	199
Materia orgánica (%)	49,80	Plomo (Pb) (ppm)	115
N-Orgánico (%)	3,32	Mercurio (Hg) (ppm)	0,7
N-Amoniacal (%)	1,81	Cadmio (Cd) (ppm)	2,5
N-Total (%)	5,13	Zinc (Zn) (ppm)	675
Fósforo (P_2O_5) (%)	4,86		
Potasio (K_2O) (%)	0,36		
Calcio (CaO) (%)	8,61		
Magnesio (MgO) (%)	1,05		
Hierro (Fe) (%)	1,01		
C/N	4,67		

TABLA 2. Características químicas de los lodos utilizados en la rehabilitación de las escombreras

2.2. Metodología en prototipo experimental

Antes de la implementación en campo se diseña un prototipo experimental, al aire libre, bajo las mismas condiciones climáticas de las escombreras desde agosto a julio del año siguiente.

En este prototipo se quería evaluar la capacidad del sustrato de revegetarse rápidamente mediante la adición de purín. Las dosis de purín pretendían un segundo objetivo que era dar salida a los excedentes de la zona y así se pensaron en términos de dosis máximas, el punto limitante podría ser la salinidad generada. La adición de paja se creyó necesaria como ayuda inicial para compensar la baja relación C/N del purín. La mezcla de materiales había de favorecer el efecto *mulch* del material grueso para facilitar la entrada de agua de lluvia y reducir la evaporación. También había de evitarse el efecto de costra del material fino al secarse, aunque este material podía, a su vez, evitar la lixiviación en profundidad.

En agosto, los materiales se distribuyeron en tiestos de 25 l, de una profundidad de 30 cm, agujereados en la base y recubiertos interiormente por una bolsa de plástico con pequeños agujeros. Se rellenaron hasta una altura de 28 cm. La mitad de ellos con el material grueso y la otra mitad con 18 cm del material fino recubierto con 10 cm del material grueso. Los tiestos se elevaron 28 cm

respecto a la superficie del suelo. Los materiales se combinaron con cinco dosis de purín (0, 140, 280, 420 y 560 m³·ha⁻¹) y la adición (12 Mg·ha⁻¹) o no de paja de cereal, enterrada superficialmente. El diseño empleado en el experimento factorial fue en bloques al azar con tres repeticiones. Semanalmente, desde el 7 de agosto, se aplicó, enterrándola, una dosis de 70 m³·ha⁻¹, hasta cubrir la cantidad correspondiente al tratamiento. El 4 de noviembre se sembró en todos los tiestos una gramínea (*Festuca arundinacea* S.) a una dosis de siembra equivalente a 220 kg·ha⁻¹ al no haber un aporte natural de semillas.

Se evaluó la evolución de la salinidad del sustrato, la biomasa vegetal y el recubrimiento vegetal de la superficie, este último cuantificado mediante fotografías y posterior análisis de imagen.

Se calculó la capacidad de retención de agua disponible (AU) en cada maceta en función del tipo de material según la expresión:

$$AU = V \cdot da \cdot \left(\frac{CC - Cm}{100} \right)$$

V = Volumen (m³) de sustrato (una vez restada la fracción correspondiente a los elementos gruesos, que en el material grueso es del 89%)

da = densidad aparente del sustrato (kg/m³)

CC = Capacidad de campo (%)

Cm = Punto de marchitez (%)

En la maceta con material grueso se puede almacenar:

$$AU = 0,025 \cdot (1 - 0,89) \cdot 1600 \cdot \left(\frac{14 - 6}{100} \right) = 352 \text{ ml de agua}$$

En la maceta con material mezclado, que está compuesta por 18 cm de estéril grueso y 10 cm de estéril fino, la capacidad de almacenamiento es mayor:

$$AU_B = 0,016 \cdot (1 - 0,89) \cdot 1600 \cdot \left(\frac{14 - 6}{100} \right) = 225 \text{ ml de agua}$$

$$AU_A = 0,009 \cdot 1500 \cdot \left(\frac{20 - 10}{100} \right) = 1350 \text{ ml de agua}$$

$$AU_B + AU_A = 1575 \text{ ml de agua}$$

Se observa que, en una maceta con material mezclado, se puede almacenar cuatro veces más agua disponible para las plantas que en una maceta con material grueso únicamente.

2.3. Metodología de rehabilitación en zonas planas

Esta metodología se desarrolla para ubicarse en la propia mina en zonas con morfología plana.

El diseño de las parcelas de demostración (figura 1) estuvo condicionado por la maquinaria y superficie disponible, y se diferencian en el tipo de sustrato utilizado (A o B), en la adición o no de paja, y en la aplicación de diferentes dosis de purín. Los tratamientos en cada parcela se implantaron en una superficie lo suficientemente grande (35 m de largo * 10 m de ancho) como para minimizar el efecto borde, también para que las aplicaciones de purín pudiesen realizarse con la maquinaria convencional, no manualmente, ya que, como parcelas demostración, el público interesado dispusiese de una metodología directamente emulable.

Las parcelas piloto se crearon en septiembre de 1997.

El sustrato A se formó con 40 cm de material grueso sobre una capa de 15 cm de material fino, mientras que el sustrato B fueron 20 cm de material grueso sobre 30 cm de material fino. Los sustratos fueron diseñados para permitir que puedan almacenar toda la precipitación media máxima del mes más lluvioso. La tierra fina fue empleada como capa menos permeable para evitar pérdidas por lixiviación. Cada tipo de sustrato se colocó en una banda de 10 metros de ancho y 143 metros de largo, siendo divididas cada una de las bandas en cuatro parcelas separadas por un metro. En cada banda, la adición o no de paja y las dosis de purín fueron asignadas al azar. Después de implementar las parcelas se extendieron $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de paja en la mitad de las parcelas (en cuatro de las ocho parcelas existentes). El purín fue aplicado semanalmente a dosis de 125 ó $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ hasta alcanzar unos $250 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, denominada dosis 25, ó $600 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, llamada dosis 60, dependiendo de la cantidad de purín asignada a la parcela. Se fraccionaron las dosis porque la maquinaria de aplicación no permitía mayores aplicaciones y resultaba inviable por problemas de compactación y ensuciado de la propia maquinaria, pasar dos o más veces seguidas sobre una misma superficie. Después de la primera y última aplicación de purín se realizaron dos pasadas de chisel a una profundidad de 10 cm en cada parcela para incorporar bien el purín. Este es un aspecto no recomendable, lo ideal hubiera sido enterrarlo antes de 24 h de cada aplicación para controlar de forma más eficaz las pérdidas de nitrógeno por volatilización de amoníaco.

Se sembraron unas subparcelas de 16 m² pero estas siembras no resultaron ser significativas en el proceso de rehabilitación debido al aporte natural de semillas en la zona, por lo que no se describen.

La evaluación del éxito de la rehabilitación se cuantificó en base al recubrimiento y diversidad de la vegetación, la biomasa producida, extracción de nitrógeno y densidad de longitud radicular. Además, se evaluó la evolución de propiedades físicas: conductividad hidráulica saturada y la densidad aparente; la evolución de propiedades químicas: salinidad y disponibilidad de nutrientes así como el potencial de secuestro de carbono.

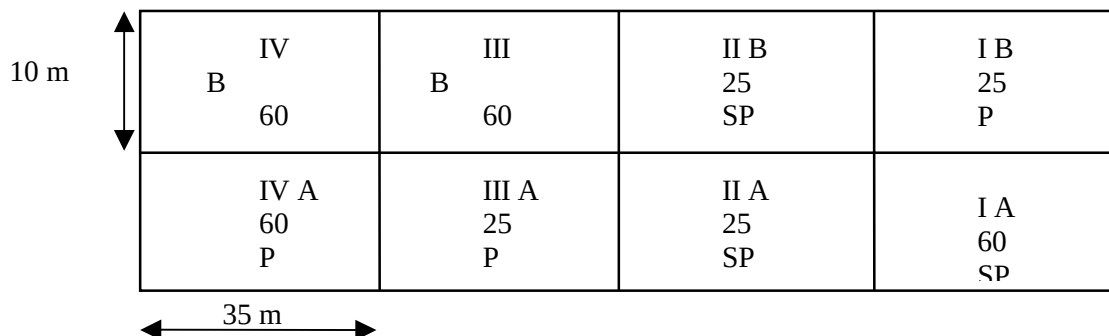


FIGURA 1. Esquema de las parcelas de demostración: A con sustrato grueso (40 cm) sobre fino (15 cm) y B con sustrato grueso (20 cm) sobre fino (30 cm); dosis de purín aplicadas (25 o 60 mm) e incorporación (P) de 15 t·ha⁻¹ de paja o sin incorporación (SP)

La elección de estas variables de evaluación consideró los aspectos legales que exigen el mantenimiento de la rehabilitación durante un mínimo de cinco años, lo que se podía mostrar con los parámetros ligados a la vegetación, de calidad del suelo en relación a sus propiedades físicas y químicas para el mantenimiento de la vegetación y ambientales, ya que el secuestro de carbono es un aspecto clave en las políticas medioambientales.

2.4. Metodología de rehabilitación en zonas con pendiente

En estas zonas las pendientes oscilaban entre un 30 a un 56% por lo que no se pudo implementar un espesor de sustrato superior a 40 cm, aunque sí superior a 20 cm y, por tanto, se preveía que la capacidad de almacenamiento de agua sería el factor más limitante.

Aunque se proyectaron inicialmente parcelas piloto para las distintas zonas, si las pendientes superan el 33%, estas resultan excesivas por lo que no se describen

las actuaciones realizadas en estas áreas. El lector interesado puede hallar la información completa y ya publicada al respecto en Salazar et ál., (2002).

Se propone para la creación de las parcelas una única actuación de vertido de materiales sobre las pendientes. Estos materiales serían una mezcla del material fino y grueso, con paja y un residuo orgánico. Se trabajó con purín porcino y lodos de depuradora.

Los lodos de depuradora cumplían con las exigencias de calidad del estado español (BOE núm. 262 de 01.11.90) para poder ser aplicados al suelo. Considerando la importancia de que los fangos quedasen estabilizados por las propias partículas coloidales del material con el que se mezclasen, se asumió la recomendación de Alcañiz et ál., (1996) de manera que la proporción de fangos no superase, en porcentaje, el contenido de arcillas del material con el que se mezclase.

Se implementaron tres grandes zonas, las denominadas SI, SII y SIII. La zona SI constaba de 4 parcelas de $13 \times 7 \text{ m}^2$, creadas en 1999, orientadas al oeste y con un 30% de pendiente. El sustrato se preparó fuera de la superficie de la parcela y luego se incorporó. Se halla formado por los dos materiales disponibles: fino y grueso. Se crean dos tipos de sustratos con proporciones en volumen 1:1 ó 1:2 (fino:grueso), se les incorpora el equivalente a $9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de paja y $370 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ de purín de cerdo. La disposición se realiza al azar en el talud con dos repeticiones. En la mitad de las parcelas se aplica purín de nuevo de forma superficial a dosis pensando en un posible efecto antiencostrante. La zona SII constaba de 6 parcelas de $13 \times 6 \text{ m}^2$, creadas en el año 2000, orientadas al oeste, con un 30 % de pendiente, situadas anejas a la zona SI. Para crear el sustrato se mezclan tres tipos de materiales en volumen en la proporción 1:1:3 (lodos:material fino:material grueso). La zona SIII consta de 4 parcelas de $17,5 \times 7 \text{ m}^2$, creadas en 1999, orientadas al sur y con un 33 % de pendiente. Los tratamientos son los mismos que en la zona SI. La orientación sur fue muy limitante en el éxito de la rehabilitación debido a la aridez extrema. No se comentan los resultados para esta área.

3. Resultados y discusión

Los resultados se presentan separadamente siguiendo las distintas metodologías.

3.1. Prototipo experimental

Algunos de los resultados ya publicados (Bosch et ál., 2000) de biomasa y salinidad muestran diferencias significativas entre los factores, no existiendo interacción entre ellos. La mezcla de estériles permite un mayor crecimiento en biomasa de la *Festuca* ($4,24 \text{ g/tiesto}$ frente $2,44 \text{ g/tiesto}$ sin la mezcla),

probablemente por la mayor capacidad de retención de agua, así como con la adición de paja (4,13 g/tiesto frente 2,54 g/tiesto sin la adición) que favorecería la reducción de la evaporación especialmente antes de la emergencia de las plantas. El efecto inicial de la aplicación de purines sobre la salinidad del sustrato desaparece al final de ciclo (julio) y las dos dosis más elevadas presentan valores de biomasa superiores (alrededor de 5,2-5,3 g/tiesto) frente al control (0,58 g/tiesto) y frente a las dosis de $140 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (2,04 g/tiesto) y de $280 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (3,5 g/tiesto).

En la valoración del recubrimiento vegetal de la superficie se obtuvieron resultados que avalan la utilización del purín pero menos discriminantes respecto a la dosis a utilizar. La adición de purín facilita el recubrimiento (tabla 3) pero el efecto del material está ligado a la adición o no de paja (tabla 4), existiendo interacción significativa entre estos parámetros.

Dosis ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	Recubrimiento (%)
560	19,12 A
420	19,01 A
280	18,86 A
140	14,16 A
0	7,98 A

TABLA 3. Recubrimiento vegetal (%) para las diferentes dosis de purín. Medias con letras distintas son significativamente diferentes según el test de rango múltiple de Duncan para un nivel de significación de 0,05

Respecto al uso de paja (tabla 4), los mejores resultados obtenidos con la aplicación de paja cuando se mezclan materiales, pueden ser debidos a que permiten una mayor retención de agua y la paja, a su vez, potencia la disponibilidad de agua ya que dificulta la evaporación actuando como *mulch*.

Material	Paja ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Recubrimiento (%)
Material grueso	0	11,54 B
	12	15,16 A
Mezcla de material grueso y fino	0	13,09 B
	12	23,50 A

TABLA 4. Recubrimiento vegetal (%) en presencia o no de paja para cada uno de los materiales. Medias con letras distintas son significativamente diferentes según el test de rango múltiple de Duncan para un nivel de significación de 0,05

Respecto a la aplicación o no de paja, los mejores resultados obtenidos con la aplicación de paja, en la mezcla de materiales, pueden ser debidos a que presenta una mayor capacidad de retención de agua y la paja, a su vez, dificulta la evaporación actuando como *mulch* muy baja.

3.2. Rehabilitación en zonas planas

Dada la diversidad de resultados obtenidos (Salazar et ál., 2007) se presentan solo algunos aspectos de los mismos asociados a la calidad de la rehabilitación del suelo desde el punto de vista de mantenimiento de la vegetación.

El recubrimiento empezó el mes de marzo de 1998, a los cinco meses de establecimiento de las parcelas, aumentando hasta el mes de mayo. Existen oscilaciones marcadas por períodos más o menos acusados de sequía. Durante el primer año el recubrimiento fue significativamente superior en las parcelas con mayor capacidad de retención de agua (B), aplicación de paja y dosis alta de purín. Al cabo de siete años solo se han mantenido las diferencias asociadas al tipo de material (figura 1).

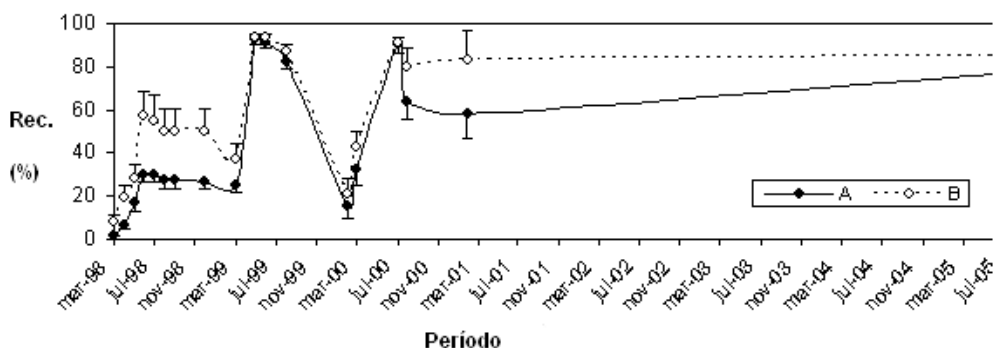


FIGURA 2. Evolución del recubrimiento vegetal para los dos tipos de sustratos

En cuanto a la diversidad de especies, se pasó de 14 especies inventariadas en 1998 a 52 en el año 2004, evolucionando de la predominancia de *Salsola kali* y *Bassia scoparia* al dominio de gramíneas.

3.3. Rehabilitación en zonas con pendiente

Se muestran algunos de los resultados obtenidos en 2005, es decir, a los seis/siete años de establecimiento de las parcelas. Se dividen en resultados de recubrimiento vegetal y en resultados de erosión y escorrentía.

3.3.1. Recubrimiento vegetal

Se presenta la cuantificación del recubrimiento en el día 23 de mayo de 2005 (tabla 5), cuando desde principio de año solo habían llovido 80 mm, es decir, en una de las situaciones más desfavorables para el mantenimiento de la vegetación. El inventario muestra el predominio de *Atriplex sp*, *Bassia scoparia* y gramíneas

de bajo recubrimiento. Las parcelas sin lodos tienen un recubrimiento significativamente más alto que las que recibieron lodos. Esto puede ser debido a la salinidad más elevada en las parcelas con lodo, tal como se ve en el apartado de escorrentía. El sustrato 1:2 más pedregoso, se muestra más favorable para el recubrimiento vegetal, probablemente debido al efecto *mulch* que dificulta la evaporación y que se manifiesta especialmente en periodos secos.

Sin lodo	12,6 b**
Con lodo	2,8 a**
Sustrato 1:1:3	2,8 b*
Sustrato 1:1	7,9 b*
Sustrato 1:2	18,3 a*

TABLA 5. Recubrimiento medio de vegetación (%) en los taludes el 23 de mayo de 2005. Los valores de letras diferentes muestran diferencias significativas con un error del 1% (**) o del 5% (*)

3.3.2. Erosión y escorrentía

En la tabla 6 se muestra la evolución de la concentración de sedimentos, conductividad eléctrica, pH y contenido en nitratos de la escorrentía de las parcelas. La precipitación en el periodo de estudio (11 meses) es muy baja, de 308 mm. La erosión más elevada en términos de contenido de sedimentos se da en julio, del orden de 15 kg/m³, debido probablemente a la ausencia de cobertura vegetal provocada por la sequía previa. Durante el resto del año, las lluvias poco intensas del otoño y la baja cantidad en primavera, hacen que la concentración no supere los 5 kg/m³.

La conductividad eléctrica se mantiene entre 1 y 4 dS/m, aunque valores extremos pueden llegar a 6 dS/m. Estos valores, juntamente con los del pH, son normales para los suelos de la zona, los cuales contienen carbonatos, yeso y sales solubles.

El contenido en nitratos es muy variable entre fechas y dentro de los tratamientos. Destacamos los altos valores en el mes de junio, probablemente debidos a una rápida mineralización de la materia orgánica a temperaturas elevadas y después de un largo periodo de sequía. En el resto del periodo, los valores no superan los 500 ppm de media.

La comparación entre tratamientos para fechas seleccionadas de las características de la escorrentía se encuentra en la tabla 6. Después de 5 años del establecimiento de las parcelas, el efecto de la aplicación de lodos se mantiene, el cual en ciertas fechas causa una mayor salinidad del agua de escorrentía, así como diferencias en pH. En cuanto al tipo de mezcla, sólo se observa más contenido en sedimentos en la escorrentía de octubre para el sustrato 1:2.

		Aplicación o no de lodo		Tipo de mezcla		
	<i>Fecha</i>	<i>L</i>	<i>SL</i>	<i>1:1:3</i>	<i>1:1</i>	<i>1:2</i>
SEDIMENTOS (kg/m ³)	10-feb	12,92	4,83	12,92	3,73	5,93
	6-jun	5,86	2,19	5,85	1,22	3,16
	23-jun	29,61	9,07	29,60	3,28	14,86
	18-ago	5,46	6,10	7,81	1,69	3,79
	26-oct	2,39	6,38	2,39 b**	1,87 b**	10,89 a**
	17-nov	1,64	0,74	1,64	0,64	0,83
CE (mS/cm 25°C)	<i>Fecha</i>	<i>L</i>	<i>SL</i>	<i>1:1:3</i>	<i>1:1</i>	<i>1:2</i>
	10-feb	4,22	2,53	4,22	3,26	1,79
	6-jun	4,75 a*	1,34b*	4,75	1,35	1,34
	23-jun	5,77 a*	0,86b*	5,77	0,86	0,85
	18-ago	2,21	3,27	3,88	0,55	1,41
	26-oct	1,71 a*	0,54b*	1,71	0,61	0,48
	17-nov	1,54	0,74	1,54	0,78	0,69
pH	<i>Fecha</i>	<i>L</i>	<i>SL</i>	<i>1:1:3</i>	<i>1:1</i>	<i>1:2</i>
	10-feb	7,51	7,50	7,51	7,37	7,63
	6-jun	8,34	7,60	8,34	7,63	7,58
	23-jun	7,19 b***	7,43 a***	7,19 b*	7,44 a*	7,42 a*
	18-ago	7,59 a**	7,26b**	7,47	7,32	7,40
	26-oct	7,70	7,52	7,70	7,48	7,56
	17-nov	7,65	7,80	7,65	7,80	7,80
NITRATOS (ppm)	<i>Fecha</i>	<i>L</i>	<i>SL</i>	<i>1:1:3</i>	<i>1:1</i>	<i>1:2</i>
	10-feb	377,84	19,07	377,84	25,26	12,89
	6-jun	970,78 a*	10,00b*	970,78	15,65	4,35
	23-jun	2657,10	13,19	2657,14	20,88	5,49
	18-ago	68,53	1302,50	1091,00	11,70	5,57
	26-oct	301,59	12,72	301,59	22,79	2,65
	17-nov	349,81	11,65	349,81	23,30	0,00

TABLA 6. Características de la escorrentía en las parcelas de taludes según tratamientos: L: con lodo, SL: sin lodo; tipo de mezcla 3:1:1, 1:1 y 2:1 (ver texto). Los valores seguidos de letras diferentes son significativamente diferentes con el grado de significación de 15% (*), 10% (**) y 5% (***)

A pesar de las elevadas concentraciones de nitratos en determinados periodos, el bajo volumen de escorrentía, normalmente por debajo de 0,5 L·m², reduce el impacto ambiental de esta agua de escorrentía.

4. Conclusiones

Se plantea como viable el proceso de restauración de la escombrera en la explotación carbonífera en una zona semi-árida, a partir de los materiales de desecho de la misma, combinados con otro residuo de la zona, como es el purín porcino, que mejora sus propiedades químicas y físicas.

La metodología de rehabilitación se ha de adaptar a la morfología de cada zona.

5. Aspectos a trabajar

Critique la actuación realizada en la metodología de rehabilitación de las zonas planas. Otros aspectos que se podrían haber considerado y/o mejorado y/o cambiado dentro del diseño.

Analice los datos de la tabla 6. ¿Qué datos se deberían presentar para evaluar con precisión el impacto sobre otros sistemas externos? Elabore los supuestos necesarios para cuantificar cuál podría ser el impacto.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya (España) la financiación de las diversas actuaciones de rehabilitación. M. Salazar agradece al Ministerio de Educación español la beca concedida para la realización de la tesis doctoral. Se agradece al profesor de Botánica de l'ETSEA, Joan Pedrol, su apoyo en la clasificación de las plantas. También a Ramón Gassó, Germán Estudillos, Arnau Ferrer, Antonia López, Ivanna Ciprián, Juan J. Jové, M. Teresa Azcón, Mónica Sorribas y Jaume Casas su ayuda en los trabajos de campo y mantenimiento de las experiencias. A la empresa Carbonífera del Ebro S. A., se le agradece su apoyo logístico.

6. Bibliografía

- ALCAÑIZ, J.M., COMELLAS, L., PUJOLÀ, M. 1996. Manual de restauració d'activitats extractives amb fangs de depuradora. Recuperació de terrenys naturals. Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient, Junta de Sanejament, Barcelona.
- BOSCH SERRA, A.D., POCH CLARET, R.M. Y SALAZAR LÓPEZ, M.A. 2000. Evaluación de la utilización de estériles de una explotación minera carbonífera junto con purín porcino para la revegetación de la propia escombrera. Edafología (7-3), 137 - 142.
- ESCUER, J.L. (1998). L' aiguabarreig dels rius Cinca i Segre. Cartografia del paisatge vegetal. Institut d' estudis del Baix Cinca, Fraga (huesca).
- PORTA, J., LÓPEZ-ACEVEDO, M. Y ROQUERO, C. 2003. (3.^a ed.). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa.

- SALAZAR, M., POCH, R.M. Y BOSCH, A.D. 2002. Reclamation of steeply sloping coal spoil banks under Mediterranean semi-arid climate. *Australian Journal of Soil Research* (4), 827 - 845.
- SALAZAR, M., BOSCH, A.D., POCH, R.M., ESTUDILLOS, E. 2007 (en revisión). Rehabilitation of semiarid coal spoil bank soils with mine spoils and farm by-products. *Journal of Environmental Management*.

**BLOQUE II.5. TECNOLOGÍAS
DE LA INFORMACIÓN TERRITORIAL
EN EL MANEJO DE CULTIVOS**

Caso II.5.1. Teledetección en agricultura de precisión

Introducción

Las actuales exigencias a las que está sometida la agricultura hacen necesario un compromiso entre producción y sostenibilidad, lo que requiere llevar a cabo prácticas culturales sostenibles y respetuosas con el medio ambiente que permitan una mayor rentabilidad. Ello exige, entre otros, un uso eficiente de los factores de producción y una gestión adecuada de los mismos. Las tecnologías capaces de proporcionar información espacial, como los sistemas de posicionamiento global (GPS) o la observación remota de la Tierra desde un satélite, suponen una importante fuente de información para cumplir con estas exigencias. Bajo esta perspectiva está el concepto de agricultura de precisión, que necesita de datos georreferenciados sobre el cultivo y el suelo, esto es, localizados en el territorio, para mejorar el diagnóstico del cultivo, la toma de decisiones y optimizar la utilización de insumos.

Agricultura de precisión

La agricultura de precisión es un concepto agronómico basado en la existencia de variabilidad en campo. Lo que pretende este tipo de agricultura es detectar y manejar la variabilidad para sacar provecho, ganancia o rentabilidad, logrando a la vez mayor sostenibilidad del uso de los recursos y menor impacto medio ambiental. Pierce y Nowak (1999) la definen como «la aplicación de tecnologías y principios para el manejo de la variabilidad espacial y temporal asociada con todos los aspectos de producción agrícola con el propósito de mejorar el rendimiento del cultivo y la calidad ambiental». Las definiciones de agricultura de precisión son múltiples y variadas pero la mayoría incluyen los conceptos de variabilidad espacial y temporal, tecnologías de información y mejora y homogenización de la producción.

Este tipo de agricultura necesita datos del cultivo y del suelo con un detalle difícilmente abordable con los métodos tradicionales de adquisición de datos. En la última década se han desarrollado nuevas tecnologías que han revolucionado la forma de adquirir y analizar la información requerida (Capítulo 1.8). La aplicación de dichas tecnologías permite captar información en cantidad y calidad de forma rápida y eficiente, facilitando los estudios de detalle y la cartografía temática requeridas para solucionar o mitigar la falta de información. La agricultura de precisión requiere, por tanto, del uso de dichas tecnologías de la información. Entre estas tecnologías se incluyen los GPS, la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG). Mientras que los GPS y los SIG se

están utilizando en agricultura de precisión desde hace bastante tiempo, el uso de la teledetección está menos extendido.

Teledetección y agricultura de precisión

La correcta implantación de un sistema de agricultura de precisión requiere información sobre la variabilidad del cultivo dentro de la parcela, o unidad de trabajo, o explotación y, además, que dicha información esté actualizada a lo largo del ciclo fenológico del mismo.

La teledetección es capaz de proporcionar esta información. Como apuntan Moran et ál., (1997), la potencialidad de la teledetección reside precisamente en que proporciona información del vigor de la vegetación que de otro modo sería complicado obtener. La resolución temporal de la mayor parte de los satélites comerciales permite disponer de dicha información con suficiente frecuencia. Además, existe la posibilidad de utilizar nuevos sensores a bordo de aviones, e incluso cámaras digitales para desempeñar esa labor, lo cual proporciona un amplio abanico de posibilidades en cuanto a resolución temporal, espacial y espectral.

La mayoría de los trabajos desarrollados hasta el inicio del actual siglo en los que se aplica la teledetección para seguimiento del cultivo en parcela suelen aportar información visual cualitativa sobre el desarrollo del cultivo basada en los satélites tradicionales de alta resolución (Landsat, Spot, IRS, etc., con resoluciones de 20-30 m). En los últimos años, se ha empezado a utilizar sensores aeroportados hiperespectrales, como el CASI, AVIRIS o DAIS, que añaden una muy alta resolución espectral, y a estudiar las posibilidades ofrecidas en este campo por los nuevos satélites comerciales como Ikonos o Quickbird cuya resolución espacial es de 4 y 2,4 metros. La aplicación de estos nuevos sensores a la agricultura de precisión es prometedora en el seguimiento temporal del estado del cultivo, detección de estrés, delimitación de zonas con problemas de drenaje y encharcamiento, afección de plagas, predicción del rendimiento, zonificación, etc. (Seelan et ál., 2003).

Otra información imprescindible en agricultura de precisión es la relativa al suelo. Muchas de las variaciones de rendimiento que se producen dentro de un campo de cultivo están asociadas a propiedades del suelo y del paisaje (textura, estructura, pH, materia orgánica, profundidad, infiltración, pendiente, etc.) y a su variabilidad espacial y temporal. La teledetección, aunque en menor medida que para los cultivos, y con algunas limitaciones derivadas de la influencia que otras variables ejercen en la respuesta espectral del suelo (cultivo, prácticas de laboreo, riego, etc.), también se ha utilizado para cartografiar sus propiedades gracias a la relación de estas con la respuesta espectral del suelo. Por otro lado, algunas condiciones del suelo como salinidad, deficiencias de nutrientes, disponibilidad

de agua, etc., se han podido detectar y cartografiar por su influencia en la respuesta espectral del cultivo (Barnes et ál., 2003).

La incorporación de la información procedente de teledetección en sistemas de agricultura de precisión ha sido posible gracias a la creación de herramientas y aplicaciones ligadas con los SIG.

Caso de estudio

Objetivo y características del área de estudio

El desarrollo del cultivo se ve afectado por numerosos factores entre los que se pueden destacar causas endógenas y patologías que alteran el desarrollo del ciclo fenológico, inadecuadas prácticas culturales, condiciones del sustrato edáfico, nivel de humedad, etc. Cualquier estrés, tanto biótico (plagas, malas hierbas, etc.) como abiótico (salinidad, falta de nutrientes, falta de agua, etc.), afecta a la producción.

Por tanto, resulta de gran interés discriminar zonas intraparcelsares donde el cultivo no se desarrolla con normalidad, sobre todo en regadío, donde las producciones son mayores y en general los cultivos tienen alto valor añadido. Se precisan para ello métodos operativos de detección y seguimiento sistemático de anomalías de desarrollo de cultivos que proporcionen una cartografía de las áreas donde el problema persiste.

En esta línea, se presenta un ejemplo del uso de imágenes de satélite de alta y muy alta resolución espacial para el seguimiento de irregularidades en parcelas de maíz en la finca La Bochosa en Esplús (Huesca, España). Este trabajo se ha realizado en el Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria (CITA) en España (Díaz de Arcaya, 2003).

El área estudiada la constituyen siete pivots cuyo tamaño oscila entre las 74 ha del mayor y las 11 ha del menor. En total son 229 ha manejadas por el propietario con avanzada tecnología (GPS diferencial, maquinaria de siembra directa, sistema de guiado, monitor de rendimiento, riego automatizado, etc.). El clima es semiárido según la clasificación climática de Thornthwaite y mediterráneo continental según la clasificación agroclimática de Papadakis. El suelo presenta texturas diversas en los 20 primeros cm (franca, franco-limosa, franco-arcilloso-limosa, franco-arcilloso y franco arenosa), además de ser medianamente básico (pH próximo a 8) y presentar en algunas zonas problemas de salinidad. El propietario suele hacer dos cosechas al año, consiguiendo no dejar el suelo sin cobertura para evitar el ascenso de sales durante el periodo de inactividad. La alternativa empleada es un cereal de invierno, cebada, que se siembra en noviembre justo después de la cosecha de maíz de ciclo corto, que a su vez siembra sobre el rastrojo de cebada inmediatamente tras cosecharlo en junio.

Seguimiento espacial y temporal de irregularidades en parcela

Para el seguimiento se han empleado 18 imágenes de los satélites Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+ del periodo 1996-2001. Dichas imágenes corresponden a primavera y verano, épocas de máximo desarrollo de los cultivos de la finca. Se tienen tres imágenes de cada año, excepto 1996 con dos, una de primavera y otra de verano, y 1999 con cuatro.

De todas las imágenes, se ha obtenido el índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI). Como la mayoría de los índices de vegetación, el NDVI combina la banda roja y la infrarroja cercana y se basa en el contraste espectral que la vegetación sana presenta entre la banda del rojo, donde presenta baja reflectividad, y la del infrarrojo cercano, donde la reflectividad es alta (Chuvieco, 2006). Cualquier estrés en la vegetación modifica este contraste espectral y hace variar el índice de vegetación.

Es un índice de cálculo sencillo y fácil interpretación que presenta alta correlación con diversos parámetros de interés agronómico, de ahí que sea el más usado en aplicaciones agronómicas de teledetección. Toma valores entre -1 y 1. En general puede decirse que la nieve, agua o nubes suelen presentar valores menores a 0; el suelo valores entre 0 y 0,2 y la vegetación valores entre 0,2 y 0,8.

Para facilitar el análisis, los NDVI obtenidos se han recodificado en cinco clases según el estado de desarrollo del cultivo: *Nulo* $\text{NDVI} \leq 0$, *Escaso* $\text{NDVI} > 0,2$ y $\leq 0,4$, *Poco desarrollado* $\text{NDVI} > 0,4$ y $\leq 0,55$, *Moderado* $\text{NDVI} > 0,55$ y $\leq 0,7$, y *Desarrollado* $\text{NDVI} < 0,7$.

Los NDVI recodificados han permitido percibir diferencias en el desarrollo del cultivo y localizar zonas en las que persistentemente no se desarrolla bien. En la figura 1 se muestra un ejemplo de ello para los años 1998 y 1999. La representación gráfica ha proporcionado una primera visión de la permanencia, en mayor o menor medida, a lo largo de los años de estudio de las maras o zonas con peor desarrollo y su localización.

Además se ha diseñado una herramienta para el seguimiento del cultivo, la aplicación SIG *Cultivisor*. Esta aplicación permite, utilizando datos generados por tratamiento de imágenes de satélite, hacer el seguimiento en parcela del desarrollo del cultivo. Para ello, muestra una colección de mapas de vigor vegetativo generados a partir del NDVI y otras variantes de este índice como NDVI acumulado por campaña y NDVI normalizado (López-Lozano y Casterad, 2003). Esta información permite, así mismo, detectar aquellas zonas de la parcela donde existen y persisten anomalías de desarrollo del cultivo y cuantificar su superficie. Además, consigue tener almacenada gran cantidad de información espacial que puede ser visualizada, consultada y extraída de forma rápida y sencilla por cualquier usuario, aunque no posea conocimientos de teledetección y SIG.

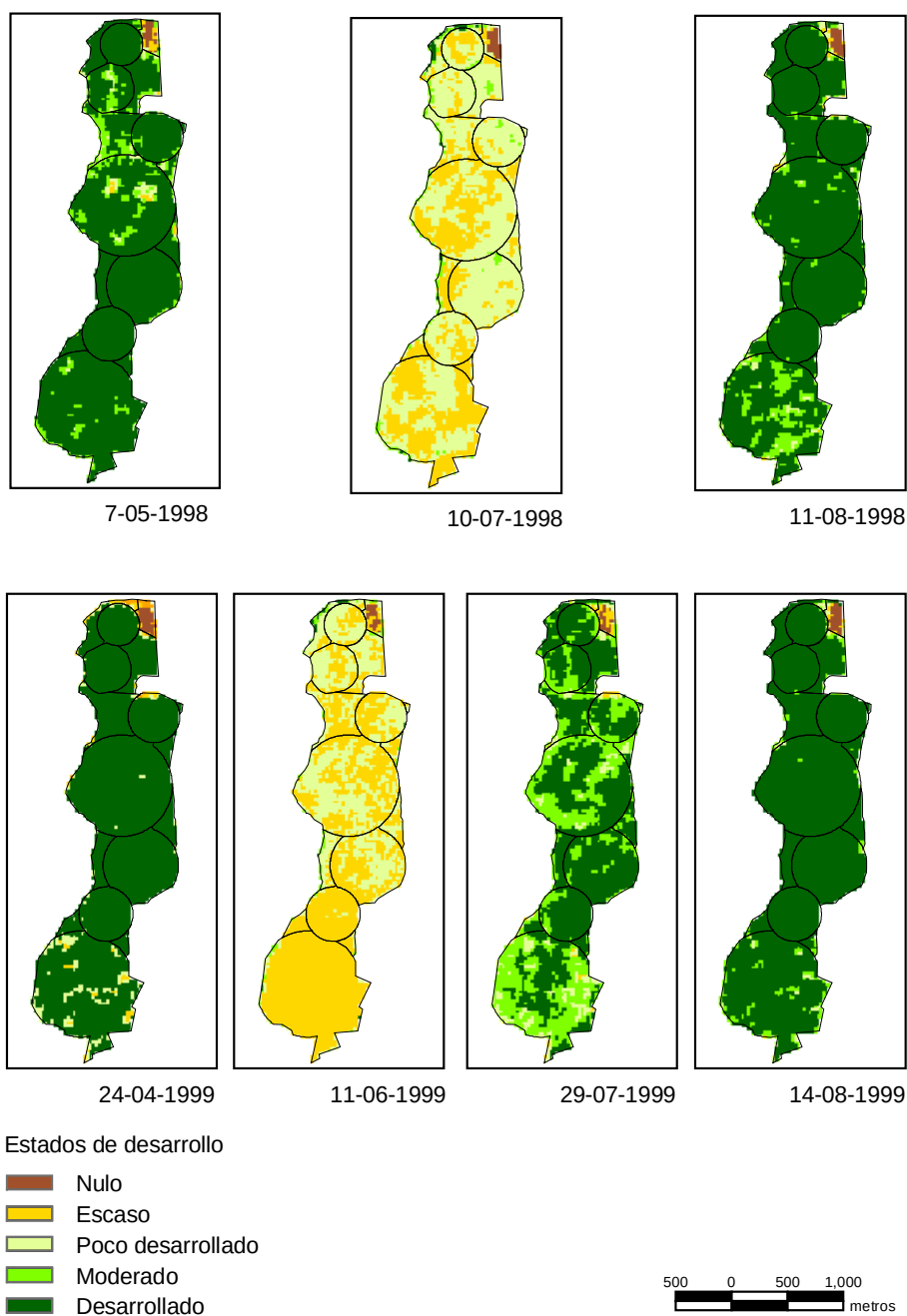


FIGURA 1. Estados de desarrollo obtenidos a partir de NDVI recodificados de Landsat ETM+

Análisis de mayoría y persistencia

Para realizar este análisis es necesario seleccionar dentro del año las imágenes de las fechas en que el cultivo está presente y se manifiestan las irregularidades. Una vez elegidas se escoge con herramientas SIG el estado de desarrollo que, para cada fecha seleccionada y píxel, predomina en los NDVIs recodificados y se plasma en una salida gráfica. Aquellos estados de desarrollo inferiores al estado *Desarrollado* se consideran irregularidades de desarrollo.

Además, para cada píxel se determina el número de veces que se repite el estado de desarrollo predominante (persistencia), generándose igualmente una salida gráfica. En caso de repetirse en algún píxel la persistencia de dos o más estados de desarrollo se elige el estado correspondiente al menor valor de índice. Con las salidas gráficas se pueden localizar las zonas donde persisten los estados de desarrollo bajos. Combinando los estados de desarrollo mayoritarios con la persistencia se tiene la distribución de cada estado mayoritario en cada tipo de persistencia. En la figura 2 se muestra un ejemplo de estos análisis para dos parcelas, la 4 y la 7 de 64 y 74 ha respectivamente. En total se han utilizado 8 imágenes, una de cada año excepto dos para 1998 y 1999.

La importancia de las irregularidades está condicionada por su persistencia. En ambas parcelas se detectan irregularidades que persisten durante tres o cuatro fechas: en la parcela 4 hay zonas o píxeles con estado *moderado* y *poco desarrollado* cuya persistencia es, en general, de tres o cuatro veces de las ocho posibles; en la parcela 7 se observan también zonas o píxeles con estado *moderado* que al igual que en la parcela 4 persisten, mayoritariamente, durante tres o cuatro fechas.

Por supuesto, se puede cuantificar la superficie que supone cada estado mayoritario en la parcela y el porcentaje de los estados de desarrollo mayoritarios en cada persistencia (tabla 1).

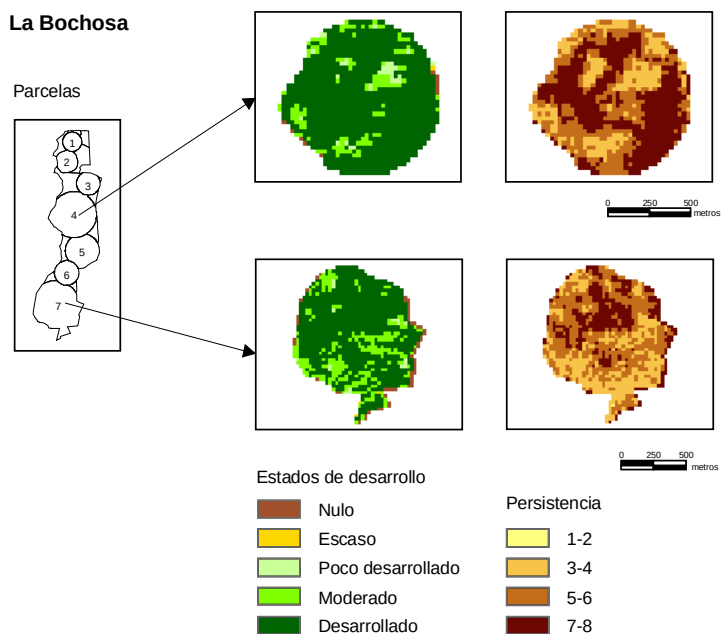


FIGURA 2. Análisis de mayoría y persistencia (n.º de imágenes o de fechas) de irregularidades en las parcelas 4 y 7 de la Finca La Bochosa para el período 1996-2001

		Finca La Bochosa							
	Estados desarrollo mayoritarios	Persistencia nº de imágenes en las que el estado de desarrollo es predominante							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Parcela 4	Nulo	0	0	0	0	0	0	0	6
	Escaso	0	0	2	0	0	0	0	0
	Poco desarrollado	0	0	27	9	1	0	0	0
	Moderado	0	0	45	40	12	2	0	0
	Desarrollado	0	0	27	51	87	98	100	93
Parcela 7	Nulo	0	0	0	0	0	0	0	43
	Escaso	0	0	3	1	0	0	0	0
	Poco desarrollado	0	0	9	3	0	0	0	0
	Moderado	0	0	51	46	18	7	3	0
	Desarrollado	0	100	38	51	82	93	97	57

TABLA 1. Distribución (%) de los estados de desarrollo mayoritarios en cada persistencia (Díaz de Arcaya, 2003)

Delimitación de zonas con problemas de desarrollo

Al igual que en el análisis de mayoría y persistencia, se parte de los NDVI recodificados de las imágenes de las fechas en que el cultivo está presente y se manifiestan irregularidades en el desarrollo. Para una parcela determinada se seleccionan los píxeles con problemas de desarrollo tomando el siguiente criterio (Díaz de Arcaya, 2003):

$$x_i < \bar{x} - \frac{\sigma_j}{2}$$

donde:

x_i : valor del píxel i correspondientes a la suma de los NDVI recodificados elegidos.

$\bar{x}$: media por parcela de la suma de los NDVI recodificados de la parcela.

σ : desviación típica por parcela de los NDVI recodificados.

Se generan salidas gráficas donde se muestran, por un lado, las áreas con problemas de desarrollo (figura 3).

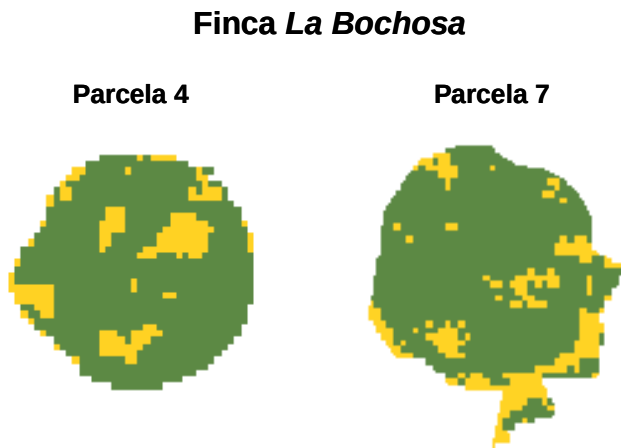


FIGURA 3. Representación en amarillo de las áreas con problemas de desarrollo del cultivo

Efecto del suelo

Como ya se ha indicado en el Capítulo 1.8., el SEM es un aparato que, mediante señales electromagnéticas, da unas lecturas que pueden relacionarse con diferentes propiedades del suelo. Si se detecta que esas medidas guardan relación con el desarrollo irregular del cultivo en la parcela, podrá decirse que el suelo es una de las variables a tener en cuenta a la hora de abordar el problema.

La superposición de las zonas con problemas de desarrollo a un mapa de lecturas de SEM (figura 4) permite ver la relación entre suelo y desarrollo del cultivo. Una de las consideraciones a tener en cuenta cuando se hace este tipo de análisis es la diferente resolución espacial de las capas superpuestas. En el caso de estudio que se presenta, el mapa de lecturas SEM se ha obtenido por interpolación mediante *kriging* a partir de 334 lecturas de SEM tomadas cada 50 m, mientras que la delimitación de zonas con problemas deriva de imágenes Landsat remuestreadas a 25 m.

Como se observa en la figura 4, existe una estrecha relación entre el desarrollo del cultivo y las medidas SEM. Allá donde las lecturas de SEM son altas, hay problemas persistentes de desarrollo del cultivo. Se observan algunas zonas pequeñas, aisladas, correspondientes a muy pocos píxeles distribuidos linealmente en los bordes del pívot donde no se da esta correspondencia. Debe tenerse en cuenta que en estos píxeles de borde la repuesta espectral es una combinación de la respuesta de la ocupación del pívot objeto de estudio y la de la parcela adyacente no siendo representativa del cultivo estudiado.

Aunque se aprecia claramente que el suelo está contribuyendo al mal desarrollo del cultivo, hace falta un estudio más detallado del mismo en estas zonas para conocer las causas que lo provocan y proceder a su enmienda. Un ejemplo de los trabajos que en esta línea se han llevado a cabo en la parcela 4 puede verse en López-Lozano et ál. (2007), donde se han combinado índices de área foliar obtenidos a partir de imágenes del satélite Quickbird con medidas de elevación, determinaciones de conductividad eléctrica, granulometría y contenido de K, Na, Ca, P y Mg del suelo, estableciéndose la relación existente entre el desarrollo del cultivo, rasgos edáficos y rendimiento, e identificándose en la parcela zonas con aparentes problemas de sodicidad, encharcamiento, etc., en las que el maíz presenta bajo desarrollo.

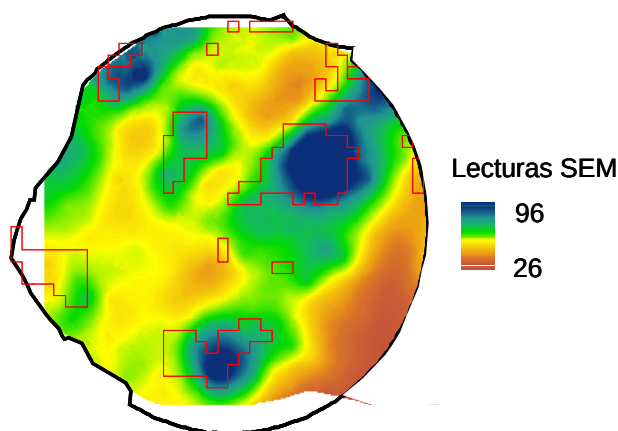


FIGURA 4. Mapa de lecturas SEM de la parcela 4 de la Finca La Bochosa obtenido por *krigeado* a partir de 334 lecturas en campo sobre el que se delimitan con línea roja las áreas con problemas de desarrollo del cultivo

Conclusiones

Con la ayuda de los sistemas de información geográfica y la teledetección se ha discriminado en una parcela comercial de maíz zonas donde el cultivo presenta problemas de desarrollo. Esta información es de gran utilidad para establecer las zonas en las que concentrar un estudio más detallado de suelo con el que poder determinar la relación de determinados rasgos edáficos con el desarrollo del cultivo y su rendimiento, y establecer patrones de manejo específico del cultivo dentro de la parcela.

Bibliografía

- BARNES, E.M., SUDDUTH, K.A., HUMMEL, J.W., LESCH, S.M., CORWIN, D.L.L., YANG, CH., DAUGHTRY, C.S.T., Y W.C. BAUSCH. 2003. Remote ands ground based sensors techniques to maps soils properties. *Photogrammetric Enginnering and Remote Sensing*, 69 (6): 619-630.
- CHUVIECO, E. 2006. Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Ariel, S.A. 2ª Edicion. 592pp.
- DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA. 2003. L 270. Reglamento (CE) nº 1782/2003 del Consejo, de 29 de septiembre de 2003, por el que se establecen disposiciones comunes aplicables a los regímenes de ayuda directa en el marco de la

- política agrícola común y se instauran determinados regímenes de ayuda a los agricultores y por el que se modifican los Reglamentos (CEE) n.º 2019/93, (CE) n.º 1452/2001, (CE) n.º 1453/2001, (CE) n.º 1454/2001, (CE) n.º 1868/94, (CE) n.º 1251/1999, (CE) n.º 1254/1999, (CE) n.º 1673/2000, (CEE) n.º 2358/71 y (CE) n.º 2529/2001.
- DÍAZ DE ARCAYA, N. 2003. Detección y seguimiento de irregularidades en parcela de cultivo con imágenes de satélite de alta resolución. Proyecto fin de carrera de Ingeniero Agrónomo. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Pública de Navarra, Pamplona, 73 pp.
- LÓPEZ-LOZANO, R. Y CASTERAD, M.A. 2003. Una aplicación SIG para seguimiento en una parcela mediante NDVI de irregularidades en el desarrollo del cultivo. pp 9-12. En: Pérez, R y Martínez, P. (Ed.). Teledetección y desarrollo regional. X Congreso Nacional de Teledetección. Cáceres, del 16 al 19 de septiembre de 2003. 461 pp.
- LÓPEZ-LOZANO, R., CASTERAD, M.A. Y HERRERO, J. 2007. Relación entre desarrollo de cultivo, rasgos edáficos y rendimiento en una parcela de maíz mediante teledetección y SIG, pp 43-50. En: Rivas, R., Crisotto, A., Sacido, M. (Ed). Teledetección hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional. Libro de actas del XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. 489 pp.
- MORAN, M.S., INOUE, Y. Y BARNES, E.M. 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment*, 61: 319-346.
- PIERCE, F. Y P. NOWAK. 1999. Aspects of Precision Agriculture. *Advances in Agronomy* 67: 1-85.
- SEELAN, S.K., LAGUETTE, S., CASADY, G.M. Y SEIELSTAD, G.A. 2003. Remotes sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remotes Sensing of Environment*, 88: 157-169.

Índice de autores:

Alvarado, Alfredo. 11, 69,415
Andrés, Raúl. 219
Antunez, Montserrat. 171
Bescansa, Paloma. 55,265
Betrán, Jesús. 171
Boixadera, Jaume. 11,41,123,277
Bosch, Ángela. 123,277,489
Cabalceta, Gilberto. 69,353,375
Casterad, María Auxiliadora. 157, 507
Domingo, Françesc. 477
Enrique, Alberto. 55,187
Huamán, Guido. 295, 317
Imaz, M^a José. 141,265,463
Molina, Eloy. 69
Olarieta, José Ramón. 477
Ortiz, Carlos. 277
Poch, Rosa M^a. 489
Reiné, Ramón. 335
Rodríguez, Rafael. 477
Salazar, Miguel Ángel. 489
Troncoso, Héctor. 237
Usón, Asunción. 41,205,219,477
Vidal, Iván. 101,237
Virto, Íñigo. 141,187,463

ÍNDICE

PRÓLOGO	7
PARTE I: ASPECTOS GENERALES EN TECNOLOGÍA DE SUELOS ...	9
I.1. El origen de los suelos: implicaciones sobre su distribución y manejo (A. Alvarado y J. Boixadera)	11
I.2. Información de suelos y principios del manejo de suelos (A. Usón y J. Boixadera)	41
I.3. Propiedades físicas que afectan a la compactación del suelo (A. Enrique y P. Bescansa).....	55
I.4. Acidez y encalado de suelos (A. Alvarado, E. Molina y G. Cabalceta).....	69
I.5. Programación del fertirriego y su control en la Región Central de Chile (I. Vidal)	101
I.6. Los sistemas agrarios como marco de la tecnología de suelos. Enfoques en la Unión Europea (A. Bosch y J. Boixadera)	123
I.7. Indicadores de calidad del suelo (M.J. Imaz e I. Virto)	141
I.8. Nuevas tecnologías de la información en la obtención de datos del territorio (A. Casterad)	157
PARTE II: ESTUDIO DE CASOS	167
BLOQUE II.1. AGRICULTURA EN ZONAS SEMIÁRIDAS	169
Caso II.1.1. Aplicaciones de la información analítica de suelos. Ejemplos (J. Betrán y M. Antúnez)	171
Caso II.1.2. Efecto de la salinidad del suelo en la producción de maíz en la ribera del Ebro en Navarra (A. Enrique e I. Virto)	187
Caso II.1.3. Riego de almendros con agua de baja calidad (A. Usón)	205

Caso II.1.4. Diseño del drenaje en zonas salino-sódicas de Monegros (<i>R. Andrés y A. Usón</i>)	219
Caso II.1.5. Quema y manejo de rastrojos en cultivos de la precordillera de la VIII Región de Chile (<i>I. Vidal y H. Troncoso</i>)	237
Caso II.1.6. Agricultura de conservación en Navarra (<i>P. Bescansa y (M.J. Imaz)</i>)	265
Caso II.1.7. Efectos de la fertilización nitrogenada con purín porcino en cereal de secano en el valle del Ebro (Cataluña, NE España) (<i>C. Ortiz, A. Bosch y J. Boixadera</i>)	227
BLOQUE II.2. AGRICULTURA EN ZONAS DE MONTAÑA	293
Caso II.2.1. Irrigación en zonas andinas. El sistema hidráulico de Tipón en Cusco (Perú) (<i>G. Huamán</i>)	295
Caso II.2.2. La conservación de suelos en zonas andinas: Caso de la microcuenca de Ccorimarca – Cusco – Perú (<i>G. Huamán</i>) .	317
Caso II.2.3. Manejo del suelo en los prados de un valle del Pirineo aragonés (<i>R. Reiné</i>)	335
BLOQUE II.3. AGRICULTURA EN ZONAS TROPICALES	349
Caso II.3.1. Análisis de suelos y su interpretación en zonas tropicales (<i>G. Cabalceta</i>)	351
Caso II.3.2. Manejo de nutrientes en pastos (<i>G. Cabalceta</i>)	371
Caso II.3.3. Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales (<i>A. Alvarado</i>)	409
BLOQUE II.4. CALIDAD DEL SUELO Y CONTROL DE LA DEGRADACIÓN	455
Caso II.4.1. Estudio de la calidad de suelos agrícolas bajo distintos sistemas de manejo. Aproximación a la cuantificación de la calidad del suelo: Selección de indicadores de calidad en secanos cerealistas de la Navarra Media (<i>I. Virto y M.J. Imaz</i>)	457
Caso II.4.2. Cartografía y evaluación del riesgo de erosión tras un incendio forestal en la comarca de El Solsonés (Lleida, España) (<i>A. Usón, J.R. Olarieta, F. Domingo y R. Rodríguez</i>)	469

Caso II.4.3. Restauración de suelos en zonas mineras. Aplicación a la zona carbonífera del Bajo Segre (Lleida, España) (A. Bosch, R.M. Poch y M. Salazar)	481
BLOQUE II.5. TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN TERRITORIAL EN EL MANEJO DE CULTIVOS	497
Caso II.5.1. Teledetección en agricultura de precisión (A. Casterad)	499
Índice de autores	510

ISBN 978-84-92774-97-5



9 788492 774975

ISBN 978-84-8409-311-4



9 788484 093114

TECNOLÓGICAS



colección
textos docentes



Universitat de Lleida



Prensas Universitarias de Zaragoza