



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Estudio de la costra edáfica en relación con las propiedades de la precipitación, el tipo de suelo y su influencia en las propiedades de infiltración

Study of the soil crust in relation to precipitation characteristics, soil type and its influence on infiltration parameters

Autor

Juan Alastrué Azón

Director

Marta Angulo Martínez

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

2017

Estudio de la costra edáfica en relación con las propiedades de la precipitación, el tipo de suelo y su influencia en las propiedades de infiltración

Trabajo realizado por Juan José Alastrué Azón para la obtención del grado de Ingeniería Agroalimentaria y del medio rural bajo la dirección de la Dra. Marta Angulo Martínez, Científica del departamento de Suelo y Agua de la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC) y tutorado por el Dr. César González Cebollada (Área Mecánica de Fluidos, Ingeniería Técnica Agroalimentaria, UNIZAR).

Huesca, Julio de 2017

Agradecimientos

En primer lugar quiero mostrar mi agradecimiento a mi tutora, Marta Angulo Martínez por haberme permitido realizar este trabajo, recurrir a su capacidad y experiencia científica, por su ayuda, disponibilidad y buen trato a lo largo de este tiempo.

En segundo lugar, a todas aquellas personas sin cuya ayuda no hubiera sido posible realizar este trabajo:

A David Moret Fernández, por su colaboración y ayuda en todo momento.

A Cesar González Cebollada, por ponerme en contacto con el CSIC y por su colaboración a lo largo del trabajo.

A los compañeros del Departamento de Edafología.

Por último, a mi familia, por el apoyo durante todos estos años.

ÍNDICE

ÍNDICE

1. Resumen.....	1
2. Abstract.....	3
3. Introducción.....	5
3.1. Agroecosistemas de secano de la zona centro del valle del Ebro: características y limitaciones.....	6
3.2. Costra Edáfica.....	11
3.2.1. Procesos para la formación de costras edáficas.....	14
3.2.2. Factores y mecanismos que influyen en la formación de costras edáficas.....	15
Factor suelo.....	15
Factores climáticos.....	17
Manejo del suelo.....	22
3.3. Infiltración del agua en el suelo.....	26
3.3.1. Conductividad hidráulica.....	29
3.3.2. Sorptividad.....	31
4. Justificación y objetivos.....	33
5. Material y métodos.....	36
5.1. Características generales del área de estudio.....	37
5.1.1 Agroclimatología del área de estudio.....	37
5.1.2 Características de los suelos.....	38
5.2. Diseño del experimento.....	40
5.2.1. Manejo previo de los suelos.....	40
5.2.2. Diseño experimental.....	41
5.3. Instrumentación y toma de datos	43
5.3.1. Suelos y costra superficial.....	43
5.3.2. Simulación de lluvia.....	46
5.3.3. Determinación de las propiedades hidrofísicas del suelo tras la formación de la costra	57

5.4. Análisis estadístico de la influencia de la costra y la intensidad sobre la infiltración.....	63
6. Resultados y discusión.....	66
6.1. Estado inicial de los suelos.....	67
6.1.1. Medición de la costra superficial: Resistencia penetración.....	67
6.1.2. Contenido de humedad del suelo.....	69
6.1.3. Estudio de agregados e índice de agregación de los suelos.....	71
6.2. Caracterización de la lluvia simulada.....	73
6.3. Caracterización de los parámetros de infiltración.....	81
6.4. Resultados del análisis estadístico de la relación entre lluvia simulada, costra superficial e infiltración.....	86
7. Conclusiones.....	95
8. Bibliografía.....	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales cultivos por superficie en Aragón (ha). (Fuente: Gobierno de España, 2015).....	10
Tabla 2. Evaluación de diferentes rangos de intensidades de lluvia (Fuente: Porta et al., 1999).....	20
Tabla 3. Valores de conductividad hidráulica saturada para diferentes texturas de suelos.....	30
Tabla 4. Parámetros físico-químicos de los suelos. (Fuente: Bermúdez, 1997).....	39
Tabla 5. Principales características del simulador de lluvia.....	48
Tabla 6. Clasificación del diámetro y la velocidad de la gota.....	53
Tabla 7. Variables que se obtienen del disdrómetro óptico en el procesado inicial de los datos brutos.....	54
Tabla 8. Media y desviación estándar de las 9 medidas de resistencia a la penetración (kg cm^{-2}) tomadas por suelo, antes de comenzar las simulaciones y tras la formación de la costra.....	67
Tabla 9. Media y desviación estándar de las 9 medidas de humedad del suelo (%) para cada suelo, antes de comenzar las simulaciones y tras la formación de la costra.....	69
Tabla 10. Análisis de la lluvia simulada (valores medios por minuto en cada tipo de simulación).....	74
Tabla 11. Valores de humedad a saturación calculados por el método gravimétrico y valores de humedad a saturación calculados a partir de la porosidad total de cada suelo.....	82
Tabla 12. Ecuaciones para estimar la formación de costra medida en función del incremento en la resistencia a la penetración por suelo.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de las zonas áridas y semiáridas en España (Fuente: Porta et al, 1999).....	6
Figura 2. Mapa de índice de aridez de la UNEP para el territorio aragonés. (Fuente: Gobierno de Aragón, 2007; los puntos negros indican la ubicación de las capitales de provincia).....	7
Figura 3. Valores medios ponderados de la precipitación total anual y estacional para el conjunto de Aragón. (Fuente: Gobierno de Aragón, 2007; los puntos negros indican la ubicación de las capitales de provincia).....	8
Figura 4. Costra estructural (A) y costra deposicional (B). (Fuente: De Jong, et al., 2011).....	12
Figura 5. Muestra como conforme aumentan los episodios de lluvia, disminuye el tamaño de poros y aumenta el espesor de la costra deposicional.....	12
Figura 6. Costra biológica dominada por cianobacterias (Fuente: Neal Herbert, 2016).....	13
Figura 7. Impacto de una gota en el suelo (splash) y su desplazamiento de partículas a favor de la pendiente (Fuente: Water Erosion of Agricultural Land, 2016).....	14
Figura 8. Climodiagrama de Zaragoza.....	18
Figura 9. Relación entre la velocidad de las gotas en función de su tamaño para eventos de baja intensidad (izquierda) y de alta intensidad (derecha). (Fuente: Angulo-Martínez et al., 2016).....	19
Figura 10. En la figura se muestra el espesor de una costra de un suelo (Gypsisol), tras un episodio tormentoso en el mes de octubre en el norte del valle del Ebro. El suelo fue labrado con dos pases de cultivador. (Fuente: Elaboración propia).....	22
Figura 11. Métodos de labranza utilizados en el experimento. De izquierda a derecha: arado de vertedera, grada de discos y chisel (Fuente: Elaboración propia).....	23
Figura 12. En riego por aspersión (izquierda) el tamaño de gota es mayor que en pivot (derecha) porque es necesario para cubrir la uniformidad de riego ya que la distancia entre aspersores es mayor.....	24
Figura 13. Trigo nacido en laboreo de conservación (siembra directa) (Fuente: Elaboración propia).....	25
Figura 14. En esta figura se muestra como la presencia de residuos de cosecha absorben la energía de gota de lluvia que cae, reduciendo y evitando el sellado de la superficie del suelo. En cambio, en la zona que no tiene restos se ha formado una pequeña costra edáfica. (Fuente: Elaboración propia).....	26

Figura 15. Curva de infiltración acumulada de agua en el suelo (Fuente: Porta et al., 1999).....	27
Figura 16. Curva de velocidad de infiltración de agua en el suelo (Fuente: Porta et al., 1999).....	28
Figura 17. Evolución temporal de la infiltración en presencia (ausencia) de costra edáfica (Fuente: Porta et al., 1999).....	29
Figura 18. Dispositivo utilizado por Darcy (Porta et al., 1999).....	31
Figura 19. Vista de la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC).....	37
Figura 20. Se muestran las condiciones meteorológicas registradas a lo largo del periodo experimental, según datos de la oficina del regante.....	38
Figura 21. Vista general de los semilleros al inicio de la investigación (Fuente: Elaboración propia).....	40
Figura 22. El diseño experimental se muestra en este esquema (Fuente: Elaboración propia).....	42
Figura 23. Realizando una medida de resistencia a la penetración en campo (Fuente: Elaboración propia).....	43
Figura 24. Realizando una medida de humedad en campo con la sonda capacitiva (Fuente: Elaboración propia).....	44
Figura 25. Detalle de la tamizadora electromagnética (Fuente: Elaboración propia).....	45
Figura 26. En esta figura se muestra como se produce la pulverización en el interior de la boquilla y el ángulo de rociado producido a continuación (fuente: Lechler. Recuperado de http://www.lechler.de/pdf/axial_vollkegelduesen_e.pdf).....	47
Figura 27. Imagen de la boquilla utilizada en el experimento (Fuente: Lechler. Recuperado de http://www.lechler.de/pdf/axial_vollkegelduesen_e.pdf).....	48
Figura 28. Vista de la boquilla en funcionamiento, instalada en la parte superior de la estructura del simulador (Fuente: Elaboración propia).....	49
Figura 29. Vista de la estructura del simulador con el plástico protector del viento (Fuente: Elaboración propia).....	49
Figura 30. Vista del carrito manual que contiene el sistema de bombeo y el depósito del simulador (Fuente: Elaboración propia).....	50
Figura 31. Vista del cilindro de acero (Fuente: Elaboración propia).....	51

Figura 32. THIES instalado en la estructura del simulador de lluvia (Fuente: Elaboración propia).....	52
Figura 33. Caja hermética que contiene el ordenador de campo (Matrix 504) para la recogida de datos (Fuente: Elaboración propia).....	52
Figura 34. Vista de los encharcamientos en el suelo debido al flujo de agua canalizado a través del plástico (izquierda), y vista del suelo minutos después de la simulación de lluvia (derecha), donde se observa una desagregación del suelo mayor en la zona exterior al cilindro de medición (Fuente: Elaboración propia).....	57
Figura 35. Infiltrómetros de disco utilizados en el experimento (Fuente: Elaboración propia).....	58
Figura 36. Izquierda: Preparación del suelo con capa fina de arena antes de la infiltración. Derecha: Resultado del suelo después de la infiltración (Fuente: Elaboración propia).....	60
Figura 37. Porcentaje en peso (%) de agregados en función del diámetro de estos (mm).....	72
Figura 38. Diámetro medio ponderado (mm) por suelo.....	73
Figura 39. Muestra los valores de intensidad por simulación y réplica.....	75
Figura 40. Muestra los valores de energía cinética por simulación y réplica.....	75
Figura 41. Muestra los valores de número de gotas de lluvia registradas por el LPM por simulación y réplica.....	76
Figura 42. Muestra los valores del diámetro medio de la gota (mm) por simulación y réplica.....	76
Figura 43. Muestra los valores del diámetro medio de la gota (mm) por simulación, réplica y percentiles.....	78
Figura 44. Muestra los valores de la velocidad media de la gota ($m s^{-1}$) por simulación y réplica.....	79
Figura 45. Muestra los valores de la velocidad media de la gota ($m s^{-1}$) por simulación, réplica y percentiles.....	80
Figura 46. Relación entre la altura visual de agua y el voltaje registrado por los dos transductores de presión (TP1 y TP2) utilizados en los experimentos de campo.....	81

Figura 47. Ejemplo de cálculo de la conductividad hidráulica (k) y la sorptividad (S) a partir de la infiltración acumulada en campo.....	84
Figura 48. Gráfico que explica la evolución de la conductividad hidráulica (K) en las tres simulaciones de lluvia.....	85
Figura 49. Gráfico que explica la evolución de la Sorptividad (S) en las tres simulaciones de lluvia.....	86
Figura 50. Gráfico que explica la relación entre el desarrollo de la costra en función de la variación en el incremento a la resistencia a la penetración, por simulación y réplica, en relación con el valor de d_{50} por simulación y réplica.....	88
Figura 51. Se muestra la costra formada en el Gypsisol para el evento de lluvia más intenso (Fuente: Elaboración propia).....	89
Figura 52. Gráfico que explica la relación entre el desarrollo de la costra en función de la conductividad hidráulica, por simulación y réplica, en relación con el valor de intensidad por simulación y réplica.....	90
Figura 53. Gráfico que explica la relación entre el desarrollo de la costra en función de la conductividad hidráulica, por simulación y réplica, en relación con el d_{50}	90
Figura 54. Gráfico que explica la relación entre el desarrollo de la costra en función de la sorptividad, por simulación y réplica, en relación con el valor de intensidad por simulación y réplica.....	92
Figura 55. Ejemplo de curva de retención de agua en el suelo.....	93

1. RESUMEN

1. RESUMEN

La formación de costras es un proceso común y generalizado en suelos áridos y semiáridos que afecta fuertemente a la escorrentía y a la rentabilidad de la agricultura. Para entender los procesos de formación de las costras, se realizaron experimentos de simulación de lluvia y su relación con los parámetros de infiltración-sorptividad (S) y conductividad hidráulica (K), sobre cuatro suelos agrícolas comunes de la zona central del Valle del Ebro con propiedades ya estudiadas; Cambisol, Gypsisol, Solonchak y Solonetz. El experimento en campo se realizó sobre 8 semilleros (dos para cada suelo) de 14 m. x 1 m., situados en el recinto de la estación experimental de Aula Dei. Previo a las simulaciones de lluvia todos los suelos fueron cultivados mecánicamente utilizando un arado rotativo, de forma que todos los suelos presentaban iguales tamaños de agregados. Se realizaron cuatro simulaciones de lluvia diferentes sobre los suelos, repetidas tres veces cada una de ellas. Los parámetros de simulación de lluvia fueron monitoreados a tiempo real mediante un monitor de precipitación láser (LPM) de la marca THIES Clima, lo que permitió una completa caracterización de la lluvia simulada por minuto (distribución del tamaño de las gotas y sus velocidades, número total de partículas, lluvia acumulada, intensidad y energía cinética). Una vez que el suelo se secó después de las simulaciones, se midió la resistencia a la penetración y se estimaron los parámetros de infiltración S y K, a partir de las curvas de infiltración acumuladas obtenidas por dos infiltrómetros de disco. Hubo poca variación en los parámetros de lluvia entre las simulaciones. La intensidad media y el diámetro mediano (D50) variaron en las simulaciones 1 (~ 0,5 bar), 2 (~ 0,8 bar) y 3 (~ 1,2 bar) de 26,5 mm h⁻¹ y 0,43 mm (s1); 40,5 mm h⁻¹ y 0,54 mm (s2); y 41,1 mm h⁻¹ y 0,56 mm (s3), respectivamente. La formación de la costra por suelo se explicó por el incremento en el D50, por el proceso de splash. La cantidad total de precipitación y el porcentaje de limo y arcilla también influyen en la formación de la costra. Por tipo de suelo, el Gypsisol mostró mayor incremento en la resistencia a la penetración por simulación. Los cuatro suelos mostraron diferentes patrones de conductividad hidráulica (K), que se explicaron por el efecto combinado de D50 y la intensidad, junto con las propiedades fisicoquímicas del suelo. En cambio, todos los suelos mostraron valores de sorptividad similares mediante simulaciones que se explicaron por valores de intensidad. Este estudio destaca la importancia de estudiar todos los parámetros de precipitación para determinar su efecto en diferentes procesos del suelo y la obtención así de resultados aplicables para la conservación del suelo.

2. ABSTRACT

2. ABSTRACT

The formation of soil crusts is a general process in arid and semi-arid environments, affecting strongly runoff and agriculture productivity. To understand soil crust formation processes, simulated rain experiments were performed in order to generate different soil crust depending on soil type and rainfall simulation characteristics. Then, the relationship between soil crust with infiltration parameters-sorptivity (S) and hydraulic conductivity (K) was investigated. These experiments were developed on four common agricultural soils of the central Ebro valley: Cambisol, Gypsisol, Solonchak, and Solonetz. The field experiment was performed on 8 plots (two for each soil) of 14 × 1 m, located in the campus of Aula Dei Experimental Station. Prior to rainfall simulations all soils were tilled mechanically using a rotary plow, so all the soils had equal aggregates sizes. Four different rainfall simulations, replicated three times each of them, were performed over the four soils. Rainfall simulation parameters were monitored in real time with a Thies Laser Precipitation Monitor (LPM), which allowed a complete characterization of the simulated rainfall per minute (drop sizes and velocities distributions, total number of particles, accumulated rainfall, intensity and kinetic energy). Once the soil dried after the simulations, penetration resistance was measured and infiltration parameters, S and K, were estimated from cumulative infiltration curves obtained with 2 disc infiltrometers. There was little variation in rainfall parameters among simulations. Mean intensity and mean d50 varied in simulations 1 (~0.5 bar), 2 (~0.8 bar) and 3 (~1.2 bar) from 26.5 mm h⁻¹ and 0.43 mm (s1); to 40.5 mm h⁻¹ and 0.54 mm (s2); and 41.1 mm h⁻¹ and 0.56 mm for (s3), respectively. Crust formation by soil was explained by D50 and subsequently by the total precipitation amount and the percentage of silt and clay, being Gypsisol the soil that showed the greatest increase in penetration resistance by simulation. The four soils showed different patterns of hydraulic conductivity (K) which were explained by the combined effect of D50 and intensity, together with soil physical and chemical properties. All soils showed similar sorptivity values by simulation which were explained by rainfall intensity. This study highlights the importance of monitoring all precipitation parameters to determine their effect on different soil processes and obtain applicable results to soil conservation.

3. INTRODUCCIÓN

3. INTRODUCCIÓN

3.1. Agroecosistemas de secano de la zona centro del Valle del Ebro: características y limitaciones

Las regiones áridas y semiáridas constituyen más de un tercio de la superficie mundial. Estos territorios albergan alrededor de 700 millones de habitantes, que dependen en su mayoría de la agricultura para su sustento, ejerciendo una gran presión sobre terrenos con capacidades limitadas por el clima. Estas áreas presentan un gran interés desde el punto de vista de su evolución geomorfológica e implicaciones climáticas, en las que una adecuada conservación y aprovechamiento de los recursos del suelo y agua será posible gracias al conocimiento de las características de estos territorios.

En la península Ibérica estas regiones suponen aproximadamente el 40% de la superficie (Font, 1983), situándose en el sureste almeriense y la parte central del valle del Ebro las zonas con mayor aridez (Porta et al, 1999).



Figura 1. Distribución de las zonas áridas y semiáridas en España (Fuente: Porta et al, 1999).

Prácticamente el 70% de la superficie de Aragón presenta una tipología de clima semiárido, alcanzando los valores más extremos para el índice de aridez en el sector central del Valle del Ebro (Gobierno de Aragón, 2007).

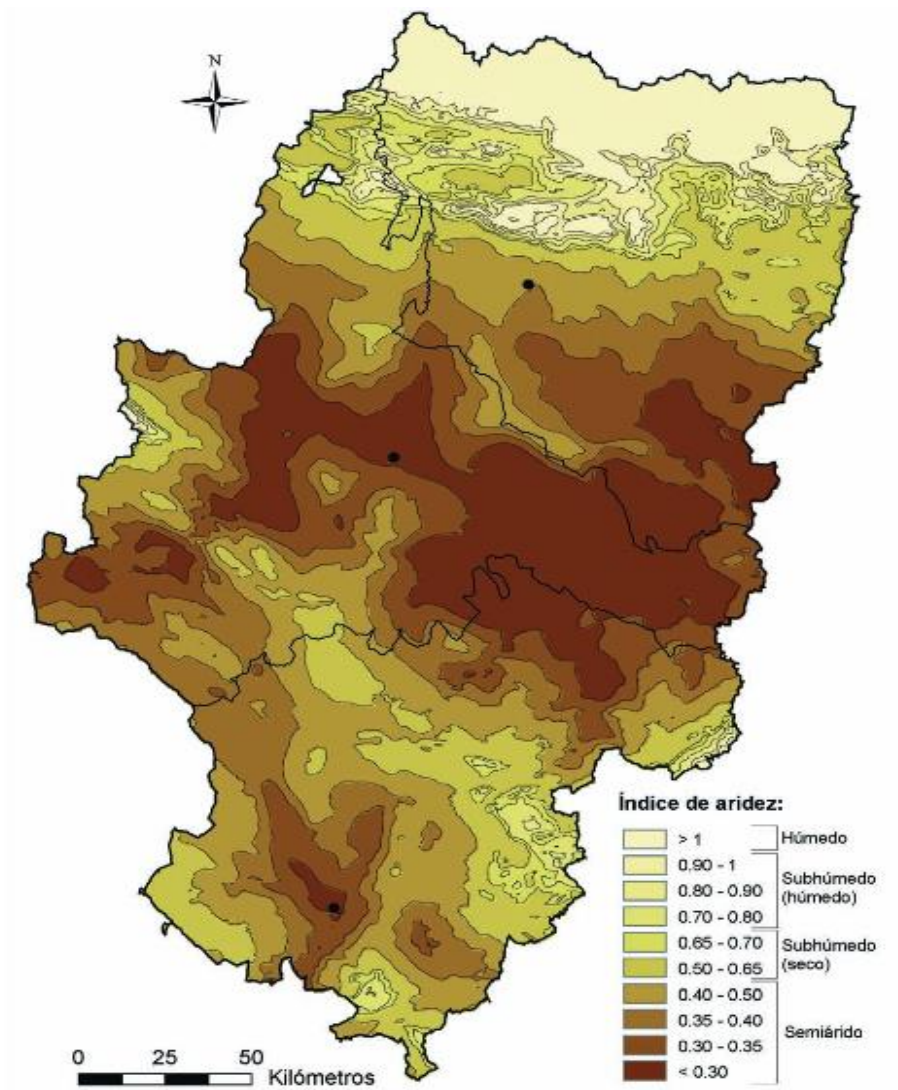


Figura 2. Mapa de índice de aridez de la UNEP para el territorio aragonés. (Fuente: Gobierno de Aragón, 2007; los puntos negros indican la ubicación de las capitales de provincia).

La escasa precipitación (<350 mm) y la irregularidad de la misma, unido a los elevados valores de evapotranspiración potencial (superior a 1250 mm) condicionan los usos agrícolas (Prats, 1999). Las precipitaciones en la depresión del Ebro tienen un claro régimen equinoccial, con dos periodos de lluvias, primavera (mayo-junio) y otoño (agosto-septiembre), siendo en otoño más intensas, alternando largos periodos secos con aguaceros. (Angulo-Martínez, 2012).

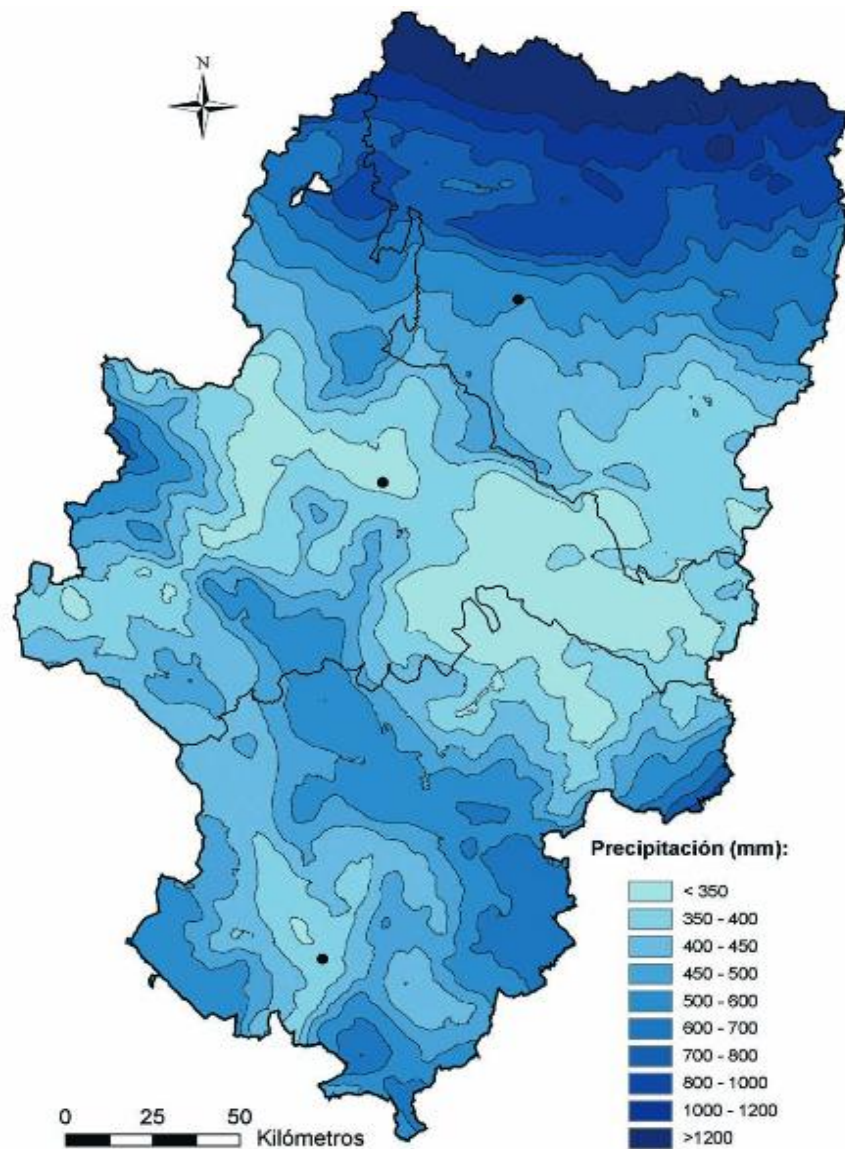


Figura 3. Valores medios ponderados de la precipitación total anual y estacional para el conjunto de Aragón. (Fuente: Gobierno de Aragón, 2007; los puntos negros indican la ubicación de las capitales de provincia).

Estos factores condicionan una vegetación escasa en periodos en los que está implementado el cultivo y alteran las propiedades físicas del suelo en los periodos que se encuentra sin vegetación.

Actualmente, la superficie de suelo en la comunidad de Aragón con riesgo de erosión hídrica asciende al 55 % de las tierras de secano, localizadas en áreas con una pluviometría media anual inferior a 500 mm (ICONA, 1978) y su pérdida puede suponer la degradación de una parte considerable del territorio (Machín y Navas, 1998). Dicho proceso implica la pérdida de un recurso limitado, frágil y preciado, como es el suelo y se ve incrementado cuando existe una alteración de las propiedades físicas que afectan especialmente a la infiltración del agua en el suelo (Porta et al., 1999). El entendimiento de los procesos capaces de reducir la infiltración del agua en el suelo promoviendo

la escorrentía superficial, tales como la formación de costras edáficas en relación con la climatología y el tipo de suelo, sus características y las consecuencias sobre el buen funcionamiento de los suelos, ayudará a la adopción de medidas de conservación del suelo, así como la concienciación de un uso más racional del mismo. Por ejemplo, las labores del suelo alteran la estructura de las capas superiores del mismo, aumentando la porosidad y la conductividad hidráulica del suelo (Moret y Arrúe, 2007). En cambio, el impacto de la lluvia sobre la superficie de un suelo recién labrado promueve una reducción de la conductividad hidráulica, debido a la formación de costras. Por todo ello, resulta imprescindible estudiar el proceso de formación de la costra superficial del suelo, así como los factores que afectan a su formación.

En este sentido, los diferentes agrosistemas y cultivos han de tener en cuenta los efectos de la formación de costra sobre la disponibilidad de agua para los mismos, la germinación, etc., así como otros aspectos relacionados con el manejo del suelo que eviten la formación de estos fenómenos.

En Aragón, la superficie agrícola dedicada a tierras de cultivo ronda aproximadamente los 2 millones de hectáreas (1.787.776 Ha, Gobierno de España, 2015). El cultivo más extendido en esta comunidad es la cebada, con una superficie de aproximadamente el 30% de la superficie total agrícola de Aragón. Esto es debido a que dada la rusticidad de este cultivo puede llegar a cultivarse con una pluviometría media anual de hasta 250 mm, así como de la amplia gama de variedades que poseen morfología y fisiología muy diferentes.

La escasa precipitación y la distribución irregular de ésta a lo largo del año y en cada evento de lluvia, a lo largo del periodo vegetativo del cultivo, constituyen los principales factores limitantes, cuyas consecuencias son bajos rendimientos y variabilidad en las producciones (Alberto y Machín, 1978). El rendimiento medio en grano de este cultivo en las zonas de secano semiárido de Aragón oscila entre 1500 y 2000 kg/ha.

Tabla 1. Principales cultivos por superficie en Aragón (ha). (Fuente: Gobierno de España, 2015).

Cultivo o cubierta	Secano	Regadío	Total
Cebada	417.533	86.155	503.688
Barbecho	435.096	-	435.096
Trigo blando	135.916	31.931	167.847
Trigo duro	94.874	15.110	109.984
Alfalfa	17.880	73.546	91.425
Almendro	69.408	8.996	78.404
Maiz	642	63.940	64.582
Olivar	47.990	10.911	58.901
Viñedo	25.378	11.372	36.750

En los secanos áridos del centro del valle del Ebro, el sistema de cultivo tradicional bajo estas condiciones climáticas es la rotación cebada-barbecho, o cultivo de “año-vez”, que incluye un periodo de barbecho de 16 a 18 meses de duración que transcurre desde la cosecha (junio-julio) hasta la siembra (noviembre-diciembre) del año siguiente. En las zonas menos áridas de éstos agroecosistemas se práctica el monocultivo de cereal.

El tipo de laboreo más utilizado es el laboreo convencional (Arrúe et al. 2014), que consiste en la aplicación de un pase con arado de vertedera, como labor primaria, seguido de varios pases de cultivador, como labores secundarias. Dicho sistema de laboreo elimina la cubierta vegetal que protege al suelo del impacto de las gotas de lluvia, lo cual facilita la erosión del suelo, reduce la actividad biológica y en consecuencia, degrada la estructura edáfica del suelo, especialmente en suelos en pendiente. Cuando las gotas de lluvia impactan sobre la superficie del suelo desnudo, éstas desencadenan dos mecanismos responsables de los cambios en las propiedades del suelo: a) la desagregación de las partículas del suelo (Hudson, 1995) y b) la compactación y la formación de una costra superficial (Morin et al., 1981).

Las costras suponen graves consecuencias en la agricultura: a) disminución de la conductividad hidráulica y de la velocidad de infiltración, que se traduce en menos agua disponible para los cultivos b) encharcamientos en zonas llanas y mayor susceptibilidad a la erosión por escorrentía en pendientes (FAO, 1993) y c) la dureza que proporciona a la superficie imposibilita que las plántulas puedan germinar.

3.2. Costra edáfica

Se entiende por costra edáfica del suelo, a la capa superficial de un suelo seco, con un espesor de varios milímetros, con una elevada densidad aparente y propiedades físico-químicas diferentes del material edáfico subyacente. Presenta una consistencia dura que aumenta exponencialmente al secarse el suelo en función del contenido de humedad (Porta et al., 2003; Quiñones-Vera et al., 2009). La elevada densidad aparente es consecuencia de la destrucción de los agregados por el impacto de las gotas de lluvia, dispersa las partículas del suelo que lo constituían, induciendo una disminución de la porosidad.

Tipos de costras

En ecosistemas desprovistos de vegetación se pueden formar sobre la superficie del suelo dos tipos de costras: en primer lugar las costras físicas y, si la costra alcanza un estadio sucesional que permita la colonización de especies de líquenes, microhongos, briófitas, etc...se forman costras biológicas.

- Entre las costras físicas, existen principalmente dos tipos de costra en función de su proceso de formación (Chen, 1980):
 - *Costras estructurales*: son aquellas cuya estructura es generada por el desplazamiento y redistribución vertical “in situ” de las partículas tras la destrucción de los agregados del suelo por el impacto de las gotas de lluvia. Están asociadas a procesos de splash, encontrándose generalmente en zonas de interrill.
 - *Costras de deposición*: son las que se forman por el movimiento lateral de las fracciones texturales más finas y la deposición posterior de los agregados en otro lugar colindante. Están asociadas a procesos de splash y escorrentía. Generalmente se forman en las zonas de rill o deposicionales.

Mientras que las costras estructurales son de escaso espesor (1-3 mm) y de porosidad variable, las costras de deposición adquieren un mayor grosor, llegando a alcanzar más de 50 mm, distribuyéndose en su estructura en forma de microláminas de muy escasa porosidad formadas por las fracciones depositadas (Fig. 4).

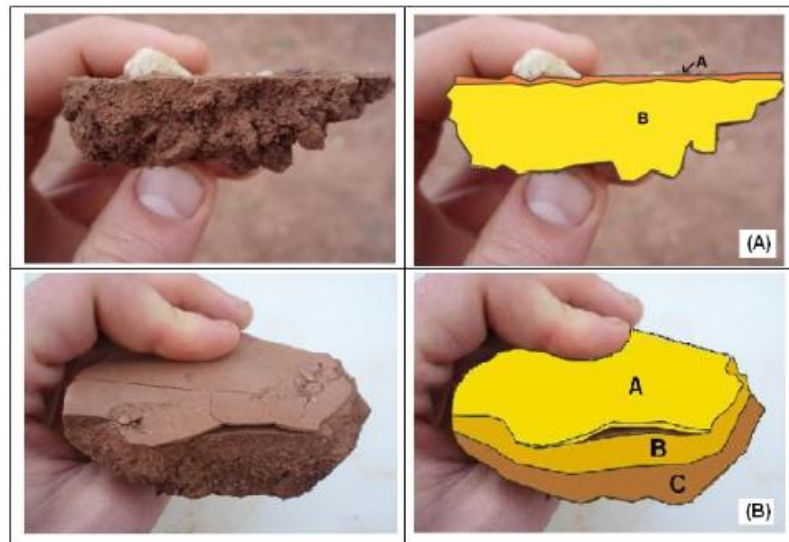


Figura 4. Costra estructural (A) y costra deposicional (B) (Fuente: De Jong, et al., 2011).

Ambos tipos de costras pueden producirse de forma conjunta (Poch et al. 1997). Inicialmente, el impacto de las gotas desagrega la superficie del suelo, creando una porosidad no conectada, que al secarse produce la formación de una costra estructural. Como consecuencia, la capacidad de infiltración del suelo se reduce y aumenta la escorrentía superficial, incrementando el espesor de la costra estructural (hasta 50 mm) por el acumulo de las fracciones depositadas.

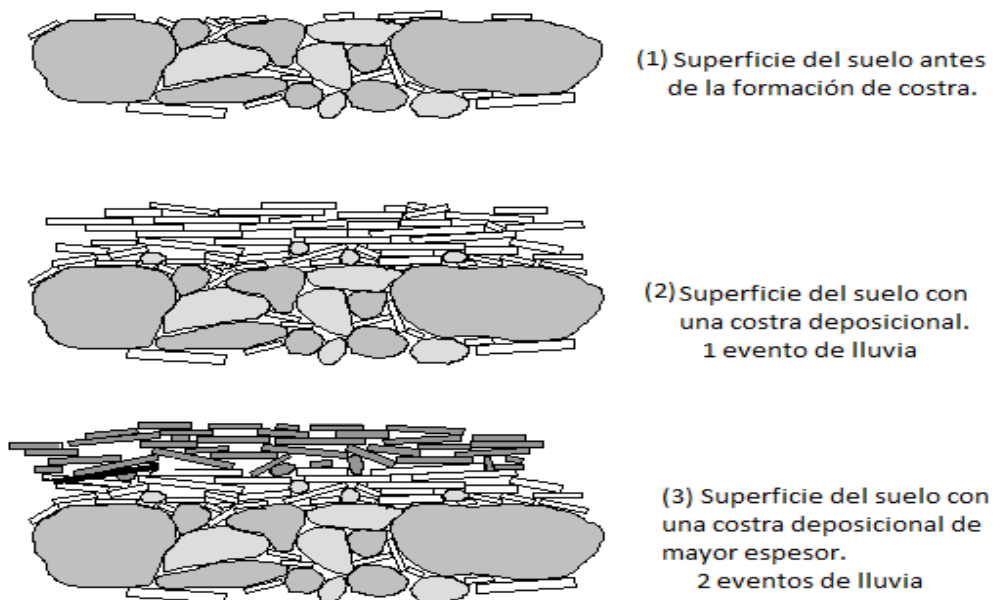


Figura 5. Muestra como conforme aumentan los episodios de lluvia, disminuye el tamaño de poros y aumenta el espesor de la costra deposicional.

- Las costras biológicas del suelo, son un conjunto de hongos, algas, cianobacterias, musgos, líquenes y otros organismos (Chamizo, 2010), en proporciones variables que viven en los primeros milímetros de la superficie del suelo, formando una agrupación firme entre las partículas del suelo y organismos (Weber et al., 2007). Estas costras son muy comunes en muchos ecosistemas dentro de un amplio rango bioclimático, llegando a ocupar hasta el 70% de los ecosistemas áridos y semiáridos. El desarrollo de estas costras tiene lugar cuando las condiciones son lo suficientemente estables, la presencia de vegetación impide su formación. Una vez instaladas sobre el suelo, pueden impedir la nascencia de muchas plántulas, pero, en cambio, tienen un papel fundamental en la estabilización del suelo (Chamizo, 2010). Conforme aumenta la biodiversidad de organismos en la costra se incrementa la rugosidad de ésta y se genera un aporte de C y N a los suelos formándose agregados más estables. Diversos trabajos han demostrado una disminución de la erosión por salpicadura a medida que aumenta la cobertura de la costra biológica (Eldridge y greene, 1994). Eldridge y Kinnell (1997) encontraron tasas de erosión hasta 5 veces menores en suelos con costras biológicas frente a suelos con costra física.



Figura 6: costra biológica dominada por cianobacterias (Fuente: Neal Herbert, 2016).

3.2.1. Procesos para la formación de costras edáficas

Los principales mecanismos de formación de costras se producen como consecuencia de la degradación de los agregados del suelo durante la precipitación (o por el riego por aspersión) y en el consecuente proceso de secado. Destacan los siguientes mecanismos:

- **Salpicadura (Splash):** Se produce al chocar las gotas de lluvia contra la superficie de suelo desnudo. El proceso produce la rotura y dispersión de partículas del suelo por el impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del mismo. Visualmente se reconoce por la presencia de pequeños cráteres de impacto acompañados de posteriores salpicaduras que inician el desprendimiento de parte de las partículas. El desplazamiento de estas partículas de salpicadura ocurre en todas las direcciones en una superficie llana y en situaciones con pendiente, lo hace a favor de ésta (Fig. 7).

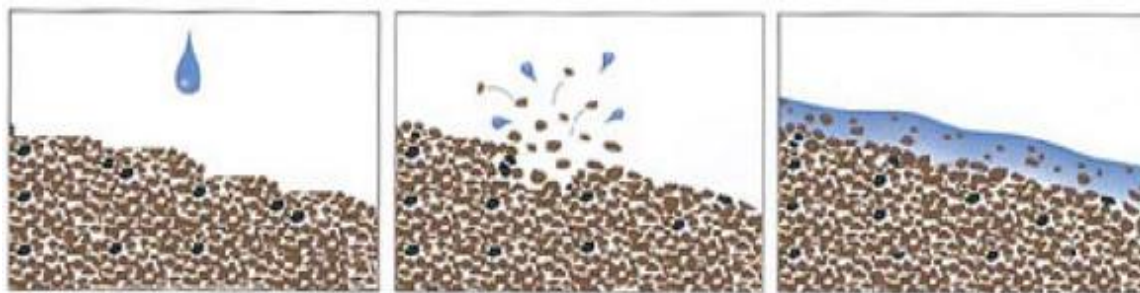


Figura 7. Impacto de una gota en el suelo (splash) y su desplazamiento de partículas a favor de la pendiente
(Fuente: Water Erosion of Agricultural Land, 2016).

- **Slaking:** Es un proceso de ruptura de los agregados del suelo, que se produce cuando los agregados no son lo suficientemente fuertes para soportar las tensiones internas causadas por la rápida absorción de agua.

La rápida humectación del suelo, durante una lluvia, produce un aumento de la presión interna debida a que los poros llenos de aire se van ocupando también por agua, lo cual produce el aumento de presión con la consiguiente rotura de agregados.

El proceso de slaking requiere una humectación rápida de todo el agregado, produciéndose una desagregación mayor a intensidades de lluvia elevadas y para los agregados más pequeños. Además, la desagregación observada no depende únicamente de la energía cinética de la lluvia, como la desagregación por splash, si no que la intensidad de la precipitación (cantidad de agua caída por unidad de tiempo) es la variable más explicativa, (Darboux et al., 2016).

Generalmente ambos procesos se producen durante los eventos de lluvia. Cada uno de ellos tendrá una importancia relativa mayor dependiendo de las condiciones iniciales del suelo. En suelos secos, el efecto del splash es el principal en la formación de las costras, mientras que en suelos cuyas condiciones de humedad son superiores, los procesos de slaking son más eficientes en la rotura de agregados, (Agassi et al., 1985).

La destrucción de los agregados, por los procesos comentados, produce una liberación de partículas individualizadas. El material fino se lava en los primeros milímetros a través de los escurrimientos y los procesos de infiltración rellenan los poros de la superficie del suelo. Seguidamente, la reordenación de las partículas del suelo da lugar a la formación de un sello superficial.

Los primeros efectos suponen una disminución de la conductividad hidráulica y de la velocidad de infiltración, debido a una reducción de la porosidad, que se traducirá en encharcamientos en zonas llanas y mayor susceptibilidad a la erosión por escorrentía en pendientes (FAO, 1993).

El secado de un sellado dará lugar a la formación de una costra edáfica estructural. Esta capa con estructura laminar puede variar desde unos pocos milímetros a varios centímetros de espesor.

3.2.2. Factores y mecanismos que influyen en la formación de una costra

La formación del sellado y costra edáfica depende entre otros factores de: i) las propiedades del suelo; ii) factores climáticos; iii) del tipo de método de manejo del suelo. De estas variables dependerá la ruptura de agregados y formación del sellado, así como la formación de costra edáfica y su espesor (Porta et al., 2003).

Factor suelo

La cantidad de materia orgánica, la humedad inicial, la textura, el tamaño y la estabilidad estructural de los agregados y el tipo de suelo son factores importantes que afectan a la formación de la costra superficial (Dalla et al., 2013).

Contenido de materia orgánica

En los suelos de regiones áridas y semiáridas con un bajo contenido de materia orgánica y con una baja estabilidad estructural se tienden a formar costras en la superficie por el efecto de la lluvia

mediante los procesos mencionados (Chamizo et al., 2015). La agregación y la estabilidad de la estructura del suelo aumentan con el contenido de materia orgánica (Nadal-Romero et al., 2009). La estabilidad de los agregados presenta un papel esencial en la dinámica hidrológica, ya que la pérdida de cohesión entre los agregados favorece la acción erosiva del splash. Un escaso porcentaje de carbono orgánico en el suelo parece estar relacionado con una costra más gruesa y compacta, correspondiéndose con una menor estabilidad de los agregados, Lado et al. (2004). Asimismo, Beguería et al., (2015) encontró que durante el proceso de salpicadura había una pérdida de carbono orgánico del suelo.

El contenido de humedad

Las condiciones de humedad o sequedad en que se encuentra el suelo antes de producirse un episodio de lluvia influyen en los procesos de encostramiento. Un suelo húmedo es más resistente a la formación de una costra que un suelo seco ya que experimenta menores variaciones en su rugosidad superficial por el impacto de las gotas de lluvia (Nadal-Romero et al. 2009). En las regiones semiáridas, como el interior del valle del Ebro, caracterizadas por la escasez e irregularidad de las precipitaciones, generalmente lloverá sobre suelos secos, con un mayor impacto de la erosión por salpicadura y mayores probabilidades para el desarrollo de costra, que suponga un limitante al desarrollo de la vegetación y los cultivos.

La textura

Los suelos con predominancia de texturas finas, tales como limos, margas y arcillas, son más susceptibles a la formación de costras como consecuencia de la retracción que experimentan las arcillas al deshidratarse. La presencia de arcillas, en especial de tipo esmectita, condiciona la desagregación de partículas por humectación al reducirse las fuerzas de atracción entre partículas coloidales debida a la disolución de cationes tales como Na^+ en el agua de humectación. Este proceso produce una reorganización estructural, con una disminución de la porosidad y un aumento de la cohesión de la matriz arcillosa, así como de todas las partículas que engloba (Regüés y Torri, 2002).

La estructura

La estructura se refiere a la forma de agregarse las partículas individuales del suelo en unidades de mayor tamaño, como son los agregados, así como la organización del espacio de huecos entre los

mismos, necesaria para el flujo de aire y agua y la respiración del suelo (Porta et al., 1999). Una buena porosidad, así como una buena distribución del tamaño de poros define una buena calidad de la estructura (Cabeda, 1984).

Asimismo, el control de la distribución de los tamaños de los agregados juega un papel muy importante en el proceso de formación de costras. Agregados de menor tamaño originan poros muy pequeños favoreciendo la formación de costras, mientras que agregados más grandes son más resistentes a la degradación y originan un tamaño de poro mayor. El tamaño ideal de agregados está entre 0,5 y 2 mm de diámetro (Kohnke, 1968).

Los cationes intercambiables

La naturaleza de los cationes intercambiables también puede influir en la susceptibilidad de la formación de la costra. La estabilidad de los agregados se correlaciona positivamente con el contenido de Ca y la relación Ca/Mg (FAO, 1993). El magnesio también puede favorecer la dispersión de las partículas finas.

La biología del suelo

Las lombrices de tierra promueven la formación de agregados del suelo relativamente estables y también perforan costras superficiales ya formadas. Por lo que la visualización de heces de lombrices en la superficie del suelo es un buen indicador de un suelo sin costra (Casenave y Valentin, 1989).

Factores climáticos

Entre los factores climáticos, cabe distinguir entre los de influencia directa, como el impacto de las precipitaciones sobre el suelo, y los de influencia indirecta, como la temperatura, la temporalidad de las precipitaciones, la evapotranspiración, la humedad relativa, etc..., que son factores ambientales cuyos valores y ritmos dan lugar a ambientes, tanto a medio como corto plazo, capaces de influir en un menor o mayor impacto de los agentes directos y procesos formadores.

La influencia de la precipitación depende de la intensidad del evento y su carácter discreto, es decir, la distribución de los tamaños de gota en cada evento de precipitación y la energía cinética con la que cada gota impacta sobre la superficie del suelo. La energía cinética de un evento de precipitación, es, al igual que la intensidad de la precipitación, una variable que integra la acción

erosiva consecuencia de la fuerza de impacto de cada una de las partículas de precipitación sobre la superficie del suelo. Siendo una variable principalmente relacionada con los procesos de splash. La energía cinética de las gotas de lluvia depende de su tamaño y velocidad y está a su vez relacionada con la intensidad del evento de precipitación. Eventos con mayor intensidad presentan un mayor número de gotas y mayor presencia de gotas más grandes (2-3 mm de diámetro).

En climas semiáridos, como en el caso del valle del Ebro, las precipitaciones se distribuyen de forma irregular, con lluvias torrenciales y periodos de sequía, afectando de forma significativa a la formación de costra (Bermúdez et al. 1992). Este hecho condiciona el desarrollo de una cobertura vegetal, capaz de proteger al suelo del impacto de las gotas de lluvia. Las lluvias torrenciales que se producen en este tipo de clima se caracterizan por elevados valores de intensidad, que a su vez están relacionados con tamaños de gota entorno a los 2-3 mm de diámetro o mayores, con energías cinéticas asociadas a la precipitación en torno a 1,67 y 11,7 MJ ha⁻¹ mm⁻¹. El climodiagrama correspondiente a la ciudad de Zaragoza muestra la distribución de la temperatura y las precipitaciones a lo largo del año en este punto geográfico (Fig. 8). Se observa que principalmente los máximos de precipitación son equinocciales, recogiendo algo más de precipitación durante la primavera (abril-mayo) que en otoño (sep-nov). Las lluvias de primavera no son tan erosivas como las de otoño debido a las diferencias en los mecanismos de generación de la precipitación (Angulo-Martínez, 2012). Asimismo, en primavera, en la mayoría de casos ya está implementado el cultivo que absorbe una buena parte de la energía cinética de la lluvia.

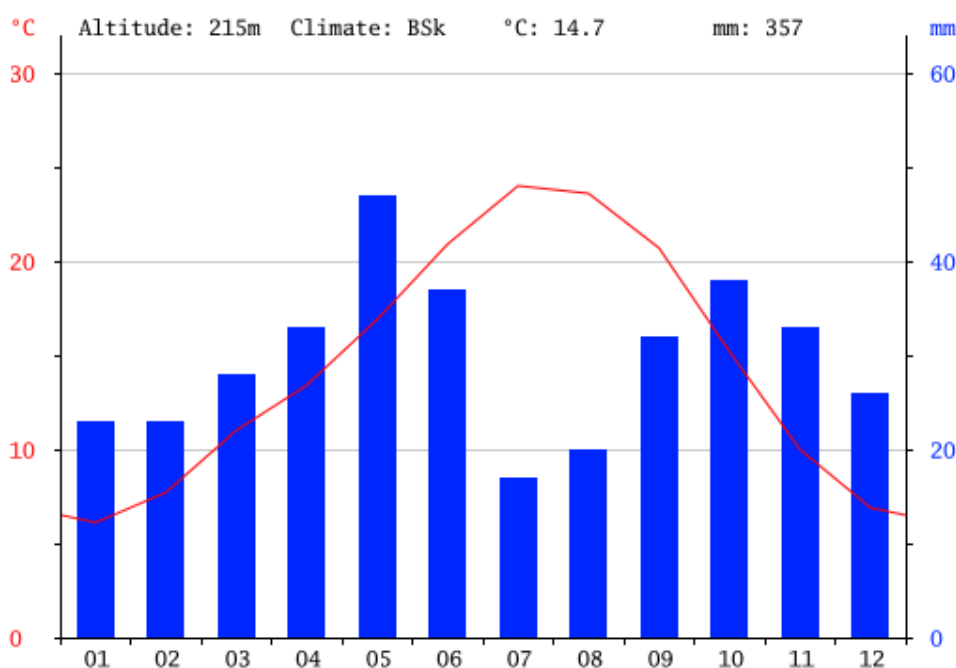


Figura 8. Climodiagrama de Zaragoza.

A las escasas precipitaciones y elevados valores térmicos se unen los efectos combinados de una elevada frecuencia del cierzo (viento que cruza el valle con dirección NW-SE), el cual es el causante de la escasa nubosidad que priva al suelo de una importante cubierta protectora, con lo que se ven acentuadas las temperaturas extremas y los procesos de evaporación. Todas estas características climatológicas reflejan el carácter continental del clima, y actúan como un factor limitante frente a la conservación del suelo (Navas y Machín, 1997).

Relaciones entre la intensidad de la lluvia y la energía cinética de las gotas de los eventos de lluvia

La intensidad (mm h^{-1}) de la precipitación es el volumen de agua caída por unidad de tiempo en una superficie determinada. Depende de las características climáticas de cada región y las características meteorológicas asociadas a los eventos de precipitación. Los eventos de precipitación tienen una intensidad variable, tanto entre eventos como dentro de los mismos. De entre todas las formas de precipitación, se considera lluvia si la precipitación se produce en forma de gotas de agua líquida con un diámetro igual o superior a 0,3 mm, e inferior a aproximadamente 6 mm. Durante una lluvia las gotas que llegan a la superficie del suelo son de distintos tamaños, constituyendo una distribución de tamaño de gotas, en las que el valor del tamaño más frecuente (D_{mo}) y el tamaño mediano (D_{50}) dependen de la intensidad de la lluvia durante un determinado intervalo de tiempo. Por ejemplo, unas precipitaciones poco intensas se caracterizan por predominar tamaños de gota pequeños en la distribución de los tamaños de gota. Según la intensidad aumenta, lo hace la cantidad de agua por unidad de tiempo lo cual supone un aumento en el número de gotas y en el tamaño de las mismas (Fig. 9).

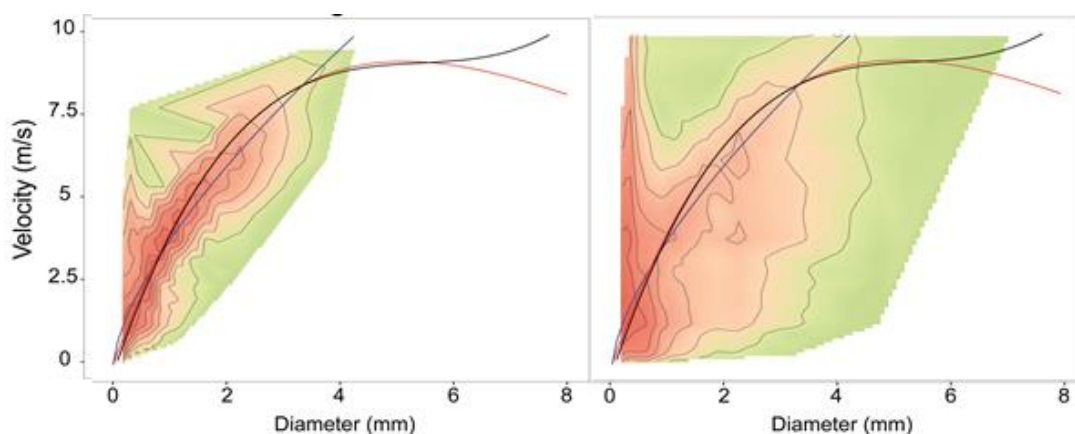


Figura 9: Relación entre la velocidad de las gotas en función de su tamaño para eventos de baja intensidad (izquierda) y de alta intensidad (derecha). (Fuente: Angulo-Martínez et al., 2016).

La intensidad de la lluvia se puede clasificar por categorías de la siguiente manera, (Tabla 2).

Tabla 2. Evaluación de diferentes rangos de intensidades de lluvia (Fuente: Porta et al., 1999).

Intensidad (mm h ⁻¹)	Evaluación
< 2	Suave
2 - 20	Moderada
20 - 50	Fuerte
50 - 90	Muy fuerte
> 90	Torrencial

Para valorar la influencia de la precipitación en la erosión del suelo (procesos como splash) y la formación de costra edáfica es necesario tanto tener en cuenta tanto la intensidad de la misma como su energía cinética. Se entiende por energía cinética de una gota, la energía con la que impactará la gota en la superficie del suelo, constituyendo la fuerza capaz de romper los agregados y desplazar partículas por el efecto de la salpicadura. La energía cinética de una gota depende del tamaño y velocidad de la misma.

$$ke = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{12}10^{-3}\pi\rho v^2 D^3 \quad (1)$$

donde m es la masa (g), ρ es la densidad del agua (1 g cm⁻³), v es la velocidad terminal de caída (m s⁻¹) y D es el diámetro de una esfera con el volumen equivalente al de una gota de lluvia (cm).

Esta información, necesaria para determinar la capacidad erosiva de un evento de lluvia, se puede obtener mediante diversos métodos: “El método de la bolitas de harina” (Bently, 1904), basado en la captura de las gotas de lluvia en un recipiente lleno de harina. Las gotas al impactar contra la harina, crean formas que representan el tamaño de éstas. Otros métodos de captura utilizan un tanque con aceite aprovechando la diferencia entre las densidades de los dos fluidos (De luna et al., 2000). En las últimas décadas se ha avanzado en la utilización de instrumentos capaces de monitorizar las gotas de lluvia, dispositivos electrónicos como videos de alta frecuencia (Mutchle, 1971) y los disdrómetros. Los primeros disdrómetros (acústicos) se basaron en la onda de presión generada por el impacto de las gotas sobre una superficie. Los disdrómetros ópticos, de desarrollo más reciente, se basan en el oscurecimiento de un haz de luz de láser infrarrojo al ser atravesado por las gotas de

lluvia. Estos métodos más recientes permiten medir no solo el tamaño de las gotas de lluvia, sino también la velocidad e incluso su forma, lo que permite disponer de mediciones más precisas de la energía cinética (Angulo-Martínez et al., 2012).

Muchos estudios sobre erosión de suelo tienen por objetivo conocer la respuesta de los distintos tipos de suelo y características asociadas, como la influencia de la pendiente, la cubierta vegetal, o métodos de manejo, ante la acción de la precipitación, para lo cual emplean simuladores de lluvia. Los simuladores de lluvia son instrumentos de investigación diseñados para generar lluvia artificial, de forma similar a los episodios tormentosos naturales, de intensidad controlable, que se proyecta sobre una superficie de extensión y características conocidas. Este sistema permite trabajar sobre superficies de inclinación variable, con lo que resulta posible comparar diferentes tratamientos y obtener datos en un período corto de tiempo con el fin de provocar importantes impactos sobre el suelo, y así obtener datos sobre erosión, infiltración, escorrentía superficial y transporte de material (Iserloh et al., 2013).

En los eventos de simulación de lluvia, se produce una lluvia constante durante el experimento por lo que no refleja con exactitud las propiedades de un evento de lluvia natural que se caracteriza por la variación frecuente de la intensidad (Dunkerley, 2008). En cuanto a la distribución de los tamaños de gota también es relativamente constante en los eventos de lluvia simulada. El diámetro máximo de las gotas, generalmente no será mayor que el que produzca la boquilla del simulador. En general la distribución de los tamaños de gota está bastante más acotada. El incremento de presión, en el simulador, permite aumentar la intensidad y con ello el número de gotas por unidad de tiempo. Aunque, en lo que respecta a la energía cinética, al ser una variable integrada que se obtiene a partir de las gotas de lluvia, al igual que la intensidad, el simulador de lluvia permite obtener valores próximos a eventos naturales, pero que se diferencian en lo comentado. El límite de potencia de cada simulador, así como la boquilla (diámetro máximo de la gota), hacen imposible emular la energía de los eventos de precipitación. La cantidad de vapor de agua presente en la nube, que supone la fuente de humedad que alimenta la formación de gotas e intensidad del evento no son equiparables a las capacidades de un simulador de lluvia. Además, el poco espacio de caída vertical en los simuladores, no permite el desarrollo de procesos de coalescencia y colisión, responsables de la distribución de tamaños de gota a distintas alturas. Las gotas tampoco suelen alcanzar la velocidad terminal de caída. Todos estos factores diferencian los eventos de lluvia natural con la simulada (Dunkerley, 2008). Aun así, los simuladores permiten reproducir altas tasas de precipitación medibles en consonancia con la respuesta edáfica, que se resumen en expresiones matemáticas y pueden ser equivalentes a los resultados que se obtendrían en eventos de lluvia natural.

Manejo de suelo

Algunos tipos de laboreo y manejo de los suelos facilitan la rotura de los agregados del suelo y remueven los suelos, modificando su estructura y quedando en la superficie, expuestos a la acción directa de las lluvias, lo cual permite formar el sellado superficial que reducirá drásticamente la infiltración.



Figura 10. En la figura se muestra el espesor de una costra de un suelo (Gypsisol), tras un episodio tormentoso en el mes de octubre en el norte del valle del Ebro. El suelo fue labrado con dos pases de cultivador (Fuente: Elaboración propia).

La labranza correctamente ejecutada, apropiada a las condiciones (textura y humedad del suelo, energía y tiempo) puede destruir las costras existentes pero al mismo tiempo ofrece las mejores condiciones para la formación de nuevas (FAO, 1993).

El tamaño del agregado juega un papel importante en el control del fenómeno de la costra. Sin embargo, es difícil obtener una distribución óptima del tamaño del terreno durante la preparación del lecho de siembra. Si los terrones son grandes, la formación de costras se reduce, pero el contacto entre el suelo y las semillas no permite una germinación adecuada. Si en cambio, son demasiado pequeños,

facilitan la formación de la costra (FAO, 1993). En segundo lugar, el pase repetido de maquinaria pesada (preparación de semilleros, siembra, y cosecha) generalmente compacta el suelo. La infiltración se reduce entonces y la acumulación de agua sobre la capa arada puede acelerar la formación de una costra superficial. En tercer lugar, las operaciones de labranza producen una pérdida de materia orgánica del suelo, ya que se favorece la mineralización de ésta teniendo como consecuencia una baja estabilidad de los agregados y la formación de costras.

En 1993, amparado por la FAO, se realizó un estudio en campos de trigo en Israel evaluando el espesor del sellado y la tasa de infiltración de lluvia, según el método de labranza: arado de vertedera + grada de discos, grada de discos (2 pasadas) y chisel. Se encontraron mayores tasas de infiltración en el método de arado por chisel, seguido del arado de vertedera y por último la grada de discos (Fig. 11). El resultado obtenido se relaciona con diferencias en la distribución de agregados. La aplicación de un método de labranza por grada de discos crea pequeños agregados que facilitan la rápida formación de costras siendo por tanto el método más desaconsejado para la prevención o control en la formación de las costras edáficas.



Figura 11. Métodos de labranza utilizados en el experimento. De izquierda a derecha: arado de vertedera, grada de discos y chisel (Fuente: Elaboración propia).

Asimismo, Ndiaye et al. (2005) estudió el efecto del sentido de labranza: a) perpendicular a la pendiente, b) a favor de la pendiente, sobre la formación de la costra en un suelo franco arenoso. Observó que el impacto de la lluvia sobre la superficie de suelo correspondiente a cada tratamiento producía diferentes resultados, en el tratamiento A se formaba una costra estructural, y que la rugosidad de los surcos perpendiculares a la pendiente dificultaba la erosión hídrica, facilitando la infiltración. En el tratamiento B, en cambio, se formó una costra de deposición, que favorece el arrastre de partículas finas que serán transportadas y depositadas posteriormente.

Los problemas ocasionados por la formación de costras también se producen bajo el riego por aspersión, ya que éste tiene el mismo efecto que la lluvia simulada. La intensidad y la energía cinética producida por el riego por aspersión pueden ser demasiado elevadas causando costras que reducen la infiltración y la nascencia de los cultivos.

Algunas soluciones para atenuar la formación de costra en riego por aspersión:

- Aumentar la frecuencia de riego por aspersión para mantener la superficie del suelo húmeda hasta que se haya implementado el cultivo y evitar así la formación de la costra.
- Utilizar boquillas que produzcan gotas de tamaño más pequeño.
- En riego por pivot la distancia entre difusores (spray) es menor que en riego por aspersión, por lo que el tamaño de gota es menor.
- En riego por goteo, la energía cinética de la gota es casi nula frente a la aspersión, ya que la gota no golpea el suelo.
- Cubrir el suelo, en la medida de lo posible, con técnicas que reduzcan el impacto de las gotas y sean compatibles con los cultivos.



Figura 12. En riego por aspersión (izquierda) el tamaño de gota es mayor que en pivot (derecha) porque es necesario para cubrir la uniformidad de riego ya que la distancia entre aspersores es mayor.

La degradación de los suelos agrícolas, debida a los procesos de erosión como consecuencia de los efectos potencialmente adversos que los sistemas de laboreo tienen sobre el régimen hídrico del suelo y compactación por el pase repetido de maquinaria pesada, constituye un problema medioambiental causado por la agricultura convencional. Con el objetivo de conservar o mejorar la

calidad del suelo y realizar una agricultura más sostenible con el medio ambiente, se han ido introduciendo progresivamente un conjunto de prácticas alternativas tales como el laboreo de conservación.

El término laboreo de conservación se caracteriza por limitar el número de labores antes de la siembra, permitiendo un manejo del suelo que altera lo menos posible su composición, estructura y biodiversidad. Se trata de tener un suelo más estable que ofrecerá más resistencia a la erosión y la degradación. Después de la siembra, a fin de recuperar nutrientes en el suelo y preservarlo de la erosión, permanecerán sobre la superficie del suelo entre un 20-30% de residuos vegetales, (López, 1993). La presencia de una cubierta vegetal o una cubierta de residuos de cosecha, es capaz de absorber la energía de gota de lluvia que cae, reduciendo y evitando el sellado de la superficie del suelo, así como el agua de escorrentía, favoreciendo la infiltración (Edward, 2000). En el laboreo de conservación, la mayoría de los restos de cosecha permanecen en la superficie del suelo, los cuales se descomponen lentamente. La materia orgánica se concentra en los primeros centímetros de la parte superior del suelo, por lo que favorece la regeneración de la estructura y mejora de la estabilidad de la misma, lo cual se traduce en un incremento de la capacidad de infiltración del agua y un mejor aprovechamiento de los nutrientes para las plantas (Edward, 2000).



Figura 13. Trigo nacido en laboreo de conservación (siembra directa) (Fuente: Elaboración propia).



Figura 14. En esta figura se muestra como la presencia de residuos de cosecha absorben la energía de gota de lluvia que cae, reduciendo y evitando el sellado de la superficie del suelo. En cambio, en la zona que no tiene restos se ha formado una pequeña costra edáfica (Fuente: Elaboración propia).

Otra práctica de conservación del suelo que se utiliza es el “mulching” o acolchado, que se refiere a cualquier material que no sea el suelo o la vegetación viva que realiza la función de una cubierta protectora permanente o semipermanente sobre la superficie del suelo (Prosdocimi et al., 2016). Para ello se pueden utilizar diferentes materiales como residuos vegetales, geotextiles biológicos, grava y piedras trituradas. Se han obtenido resultados con tasas de reducción de pérdidas de materiales y escorrentía superiores al 90% realizando éstas prácticas (Prosdocimi et al., 2016).

3.3. Infiltración de agua en el suelo

La infiltración es el proceso por el cual el agua de la superficie del suelo penetra hacia su interior por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares (Martínez y Navarro, 1995).

Al iniciarse una lluvia, un riego o llegar una corriente de agua sobre un suelo seco, la entrada tendrá lugar en condiciones no saturadas, principalmente bajo la influencia de los gradientes de potencial matricial por diferencias en el contenido de agua y, en menor medida, de la gravedad. En un suelo no saturado la infiltración está regulada por la conductividad hidráulica y la sorptividad. El

agua va rellorando los espacios porosos del suelo por lo que el gradiente de humedad establecido inicialmente va disminuyendo y, por lo tanto, también la cantidad de agua infiltrada por unidad de tiempo. En consecuencia, se favorece la formación de escorrentía superficial al disminuir la masa de agua susceptible de infiltrarse. En estado estacionario, el flujo de agua es gobernado por un factor hidráulico, un factor gravitacional y un factor de capilaridad del suelo.

Según Porta et al. (1999), la infiltración puede expresarse como:

a) La infiltración acumulada (I ; $l\ m^{-2}$): cantidad de agua que se infiltra por unidad de superficie de suelo a lo largo de un determinado lapso de tiempo, t (Fig. 15).

Se define con la ecuación:

$$I = I(t) \tag{2}$$

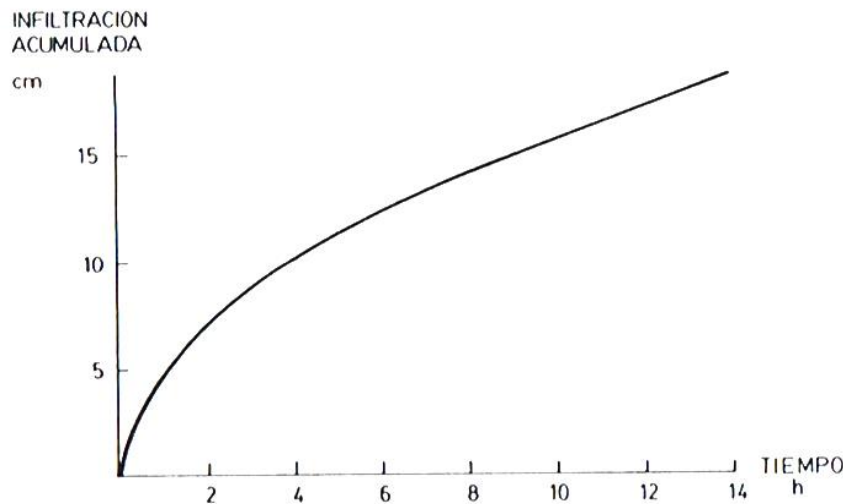


Figura 15. Curva de infiltración acumulada de agua en el suelo (Fuente: Porta et al., 1999).

b) La velocidad o tasa de infiltración (i ; $mm\ s^{-1}$): Velocidad con la que el agua entra en el suelo por unidad de tiempo. Partiendo de unas condiciones de suelo seco, la velocidad de infiltración disminuye muy rápidamente en los primeros momentos y tiende a estabilizarse asintóticamente (Fig. 16). Se denomina también velocidad de infiltración instantánea. Corresponde a la derivada de la infiltración acumulada respecto al tiempo y se define con la ecuación:

$$i(t) = \frac{dI(t)}{dt} \tag{3}$$

donde I es la infiltración acumulada y t el tiempo.

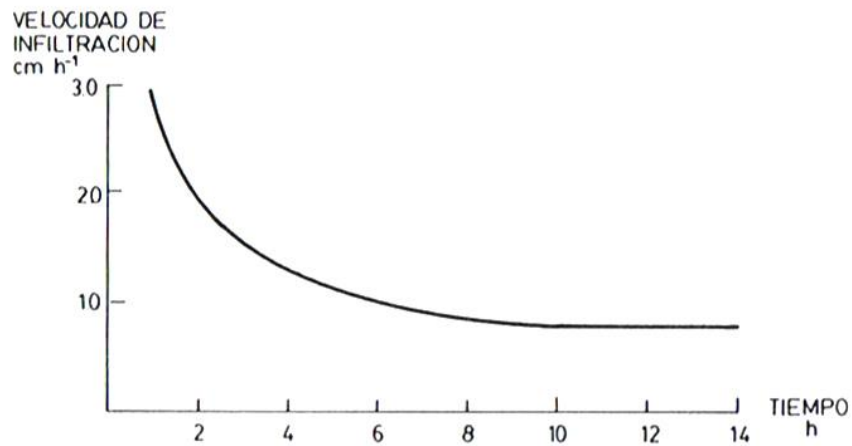


Figura 16. Curva de velocidad de infiltración de agua en el suelo (Fuente: Porta et al., 1999).

Factores que condicionan la infiltración

Porta et al., (1999) definen los siguientes factores:

a) *Tipo de suelo.* La textura y la estructura son las características que influyen principalmente al movimiento del agua en el suelo. Los suelos con una textura gruesa, como la arena, tienen una mayor cantidad de macroporos que los suelos de textura fina, como la arcilla. En consecuencia los suelos arenosos presentarán unas mayores tasas de infiltración (Brandão et al., 2007).

b) *El contenido inicial de humedad en el suelo.* Si el suelo está muy seco, la tensión capilar es la responsable de la elevada tasa de infiltración en los primeros instantes de infiltración. A medida que el terreno se humedece se reduce el gradiente de tensión y por lo tanto la tasa de infiltración.

c) *La costra superficial* afecta de forma notable a la infiltración de agua en el suelo, y en consecuencia al comportamiento hidrológico del suelo. La disminución de la conductividad hidráulica se asocia con el grado de sellado como se muestra en la siguiente curva (Fig. 17).

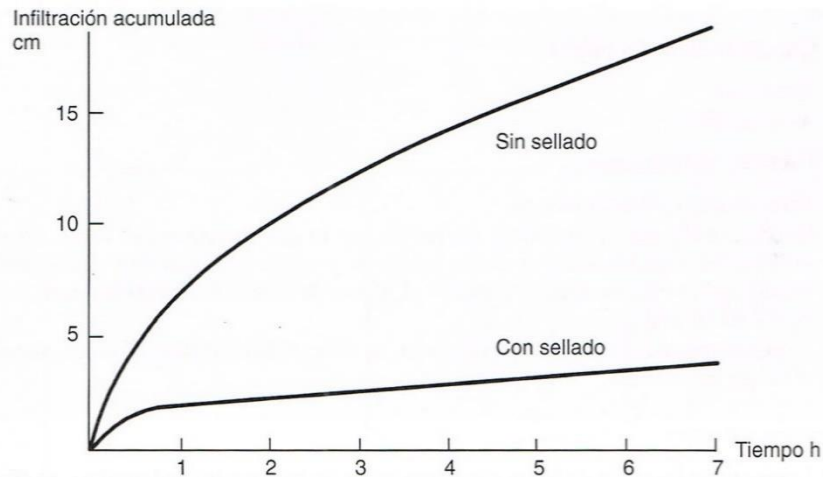


Figura 17. Evolución temporal de la infiltración en presencia (ausencia) de costra edáfica (Fuente: Porta et al., 1999).

d) Cubierta vegetal. La cubierta vegetal natural, que evita la formación de costra superficial, tiende a aumentar la tasa de infiltración y en consecuencia reducir la escorrentía superficial.

e) Rugosidad superficial y pedregosidad. Puesto que las superficies con mayor rugosidad tardan más en encostrarse, la capacidad de infiltración del agua es mayor que en aquellas superficies del suelo con mayor rugosidad.

f) Laboreo. Si el manejo del suelo es óptimo y se aproxima a las condiciones originales del suelo, favorecerá el proceso de infiltración. En caso contrario, cuando el suelo está sometido a un tránsito intensivo de ganado o sujeto al paso constante de vehículos y maquinaria pesada, la superficie tiende a compactarse y se vuelve más impermeable.

3.3.1. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica (K ; $L T^{-1}$) es la propiedad del suelo que describe la facilidad con la cual el suelo permiten el flujo del agua por efecto de la gravedad. Cuando el suelo se satura, todos los poros están llenos de agua, y en consecuencia la conductividad alcanza su mayor valor, expresada como conductividad hidráulica saturada, K_s .

El valor de la conductividad hidráulica depende en gran medida de la estructura y la textura del suelo, siendo mayor en suelos porosos, fracturados o agregados y menor en suelos con una elevada densidad aparente, compactados, o de textura fina (Reichardt y Timm, 2004). Existe, pues, una relación cuantitativa entre la conductividad hidráulica y volumen de agua en un suelo con un alto

porcentaje de partículas grandes. La presencia de arenas permitirá un flujo rápido del agua, mientras que los suelos que presenten un alto porcentaje de partículas pequeñas ralentizarán el movimiento del agua.

Como referencia se presentan valores de conductividad hidráulica saturada (Tabla 3) para diferentes texturas (Clapp y Homberger, 1978).

Tabla 3. Valores de conductividad hidráulica saturada para diferentes texturas de suelos.

Textura	Ks (cm h⁻¹)
Arenosa	62.5
Areno franca	56.3
Franco arenosa	12.5
Franco limosa	2.5
Franca	2.5
Franco arcillo arenosa	2.3
Franco arcillo limosa	0.6
Franco arcillosa	0.9
Arcillo arenoso	0.8
Arcillo limosa	0.4
Arcillosa	0.5

La conductividad hidráulica es un parámetro que se utiliza para explicar la dinámica del agua y los solutos en el suelo, así como para diseñar sistemas de riego y drenaje, o la conservación de los suelos ante los procesos erosivos o los riesgos de contaminación.

La ley física que describe el movimiento del agua en el suelo fue propuesta por Darcy en 1856. Darcy diseñó un dispositivo que consistía en un cilindro lleno de arena, por el que hacía circular agua en régimen saturado (Fig. 18):

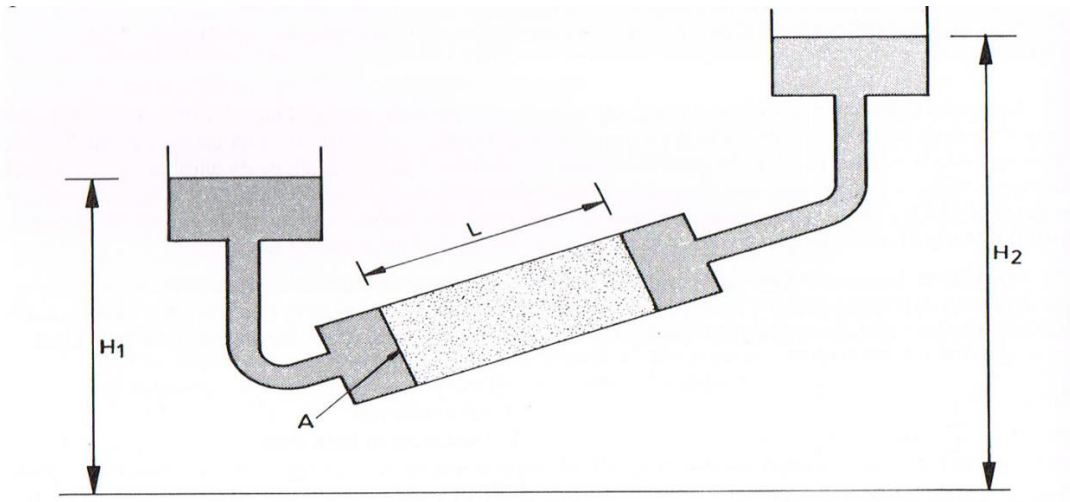


Figura 18. Dispositivo utilizado por Darcy (Porta et al., 1999).

Sus experimentos permitieron comprobar experimentalmente que:

$$Q = -K_s \frac{H_2 - H_1}{L} A = -K_s \frac{\Delta Y_H}{L} A \quad (4)$$

donde:

K_s = conductividad hidráulica del material poroso en condiciones de flujo saturado

$\frac{\Delta Y_H}{L}$ = gradiente hidráulico, que en caso de flujo saturado es igual a la unidad.

3.3.2. Sorptividad

La sorptividad se define como la capacidad de un suelo para absorber o desabsorber un líquido por capilaridad (Philip, 1957). Junto con la conductividad hidráulica (K_s), la sorptividad (S) es uno de los parámetros fundamentales que permiten definir el comportamiento de la infiltración de agua en el suelo.

En un flujo horizontal de agua a través de un medio poroso, S viene definido por (Porta, 1999):

$$I = S (\theta_2, \theta_1) \sqrt{t} \quad (5)$$

Donde:

I = cantidad acumulada de agua absorbida [$L^3 L^{-2}$]

θ_1 = contenido inicial de agua

θ_2 = contenido de agua después de un intervalo de tiempo t

S = Sorptividad, que es función de los contenidos de agua inicial y final [$L T^{-1/2}$]

Método de medida de las propiedades hidráulicas

Entre los diferentes instrumentos actualmente disponibles para caracterizar los parámetros hidráulicos del suelo, se encuentra el infiltrómetro de tensión. Este instrumento ha sido y sigue siendo ampliamente utilizado para estimar la sorptividad, S , y la conductividad hidráulica, K (Perroux and White, 1988). Éste consiste en una base de disco cubierta por una malla permeable, un depósito de suministro de agua y una torre de burbujeo con un tubo de entrada de aire móvil que impone una tensión en la base de la malla.

Para el cálculo de las propiedades hidráulicas de los suelos a partir de la infiltración acumulada, se puede utilizar la ecuación de Haverkamp et al., (1994):

$$\frac{2(K_0 - K_n)^2}{S_0^2} t = \frac{2}{1 - \beta} \frac{(K_0 - K_n)(I_{1D} - K_n t)}{S_0^2} - \frac{1}{1 - \beta} \cdot \ln \left[\frac{1}{\beta} \exp(2\beta(K_0 - K_n)(I_{1D} - K_n t)/S_0^2) + \frac{\beta - 1}{\beta} \right] \quad (6)$$

donde:

β : es una constante comprendida entre 0.3 y 1.7

γ : es una constante de valor 0.75 (Smettem et al., 1994).

S : es la sorptividad del suelo

θ_0 y θ_n : son la humedad volumétrica del suelo inicial y a saturación

R : es el radio del disco empleado

K : es la conductividad hidráulica del suelo

t : es el tiempo que transcurre hasta que termina la infiltración

4. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

4. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO Y OBJETIVOS

En este trabajo de fin de grado se pretende estudiar el efecto de la lluvia sobre la formación de la costra superficial del suelo en diferentes tipos de suelo, así como el efecto de la costra edáfica formada sobre la infiltración y las propiedades hidráulicas de los suelos. Para tal fin, se simularán eventos de precipitación con distintas características relativas a la cantidad de precipitación, intensidad y energía de la misma sobre los cuatro tipos de suelos más abundantes y representativos de esta zona: Cambisol, Gypsisol, Solonchak, y Solonetz.

Estos suelos ocupan una extensa superficie de suelo agrícola en el valle del Ebro, lo que hace útiles e interesantes los resultados obtenidos en este estudio. La combinación de métodos e instrumentos de medición permitirán relacionar las propiedades hidráulicas de la costra superficial del suelo con la intensidad y energía del evento, por tipo de suelo, lo que garantizará la consecución de resultados innovadores sobre el comportamiento de las costras en los diferentes suelos agrícolas en la cuenca del Ebro ante los eventos de precipitación o riego por aspersión. Así pues, los resultados de este estudio deberán permitir tomar medidas para la conservación del suelo, en relación a la formación de una costra superficial capaz de limitar las condiciones de los cultivos y afectar a la conservación del suelo.

Este trabajo persigue un triple objetivo:

- i) Investigar el efecto de la precipitación en su totalidad sobre la formación de la costra edáfica superficial, a partir de eventos de lluvia simulada. Este objetivo es novedoso ya que por una parte se tienen en cuenta las medidas integradas de la precipitación generalmente estudiadas, como la intensidad o cantidad de agua, e incluso la energía cinética, y, a su vez, se considera el efecto discreto de la precipitación, es decir, la distribución de tamaños y velocidades de sus partículas.
- ii) Cuantificar la influencia de la costra formada sobre la infiltración y las propiedades hidráulicas de los suelos.
- iii) Relacionar, los objetivos i) y ii) entre sí, lo cual supone dilucidar y cuantificar el efecto que tienen las propiedades de los distintos eventos de lluvia simulada sobre la infiltración en distintos tipos de suelos con distintas costras superficiales.

Para tal fin se plantean los siguientes objetivos específicos aplicados a diferentes tipos de suelo tras labores primarias:

- 1) Puesta a punto de un simulador de lluvia para simular lluvias con diferente intensidad y energía cinética.
- 2) Estudio detallado de las propiedades de la lluvia simulada a partir de la distribución de los tamaños y velocidades de las gotas.
- 3) Determinar las características de la costra formada, tomando como medida los cambios en cuanto a la resistencia a la penetración, sobre los diferentes tipos de suelo y a distinta intensidad.
- 4) Medición de las propiedades hidráulicas de la costra superficial en los diferentes suelos utilizando la técnica de infiltrometría de disco.
- 5) Estudiar, para cada tipo de suelo, la relación entre las características de las lluvias simuladas, en relación con la formación de la costra y las propiedades hidráulicas de la costra formada tras los eventos de lluvia-simulada.

5. MATERIAL Y MÉTODOS

5. MATERIAL Y MÉTODOS

5.1 Características generales del área de estudio

5.1.1. Agroclimatología de la zona de estudio

El presente estudio se ha llevado a cabo en la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC) (Fig. 19), durante los meses de julio, agosto y septiembre de 2016. El trabajo de campo se ha realizado en las parcelas experimentales pertenecientes al grupo de Erosión y Evaluación de Suelo y Agua, ubicado en el interior de la Estación Experimental, con las siguientes coordenadas: latitud, 41° 43' 30''N, y longitud, 0° 48' 39''O. La altitud sobre el nivel del mar es de 270 metros.



Figura 19. Vista de la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC).

La zona de estudio se enmarca dentro de la zona de clima mediterráneo continental (De León et al. 1987). Conforme a la clasificación agroclimática del Centro de Semillas y Protección Vegetal de la diputación General de Aragón (CSPV, 1992), desarrollada específicamente para el cultivo de cereal en las zonas de mayor aridez del valle del Ebro, el lugar de ensayo se sitúa en una zona agroclimática temprana, con un índice de Turc inferior a 7 y con una producción media inferior a 1500 kg/ha de cebada.

El clima es semiárido, con una pluviometría media anual de aproximadamente 340 mm y una temperatura media anual del aire de 14,7 °C.

Durante el periodo que se realizaron los ensayos en campo (Julio-Agosto) apenas se registraron precipitaciones, pero no influyeron en el experimento ya que en los episodios de lluvia

natural las parcelas fueron cubiertas con plásticos y posteriormente descubiertas para facilitar el secado del suelo. Las simulaciones se realizaron los días 20, 21 y 22 de julio. En la Figura 20 se presentan las temperaturas registradas desde el comienzo de las simulaciones hasta la realización de las medidas de infiltración, ya que la temperatura ha condicionado el desecado superficial.

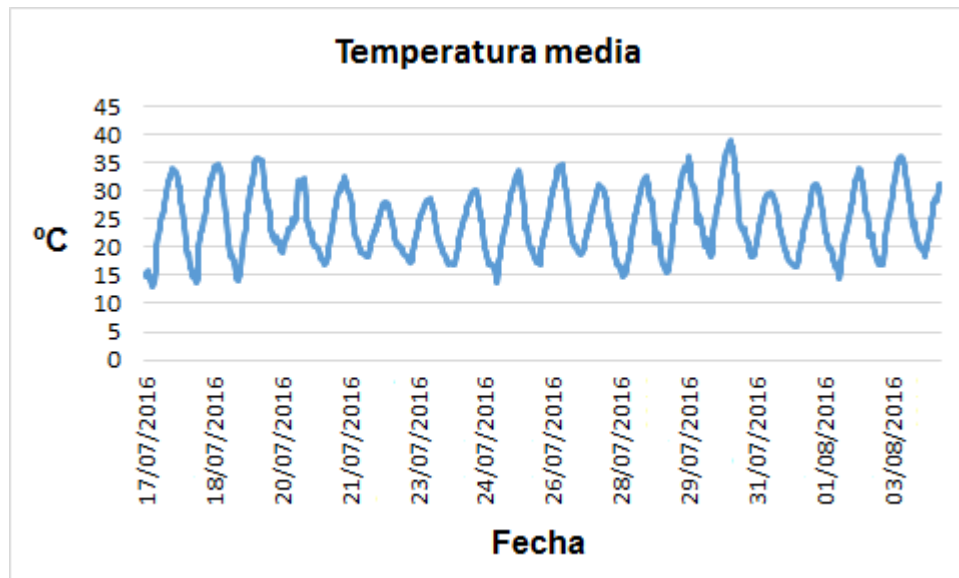


Figura 20. Se muestran las condiciones meteorológicas registradas a lo largo del periodo experimental, según datos de la oficina del regante.

5.1.2. Características de los suelos

Los cuatro tipos de suelos utilizados en este estudio fueron un Cambisol, Gypsisol, Solonchak, y Solonetz (FAO, 1989). Estos suelos, se caracterizan por ser los más abundantes y representativos del valle medio del Ebro en el noroeste de España, y están sujetos a una acelerada tasa de erosión, al estar ocupados por tierras de cultivo que dejan expuesto al suelo durante varios meses al año (Machín y Navas, 1998) o, sostienen comunidades vegetales de baja cobertura debido a sus condiciones restrictivas para la vegetación y el clima semiárido; condiciones que prevalecen en la región (Guerrero et al., 1999; Pueyo et al, 2007).

Los suelos fueron llevados a los semilleros hace 20 años, procedentes de campos de cultivos cercanos, de los que se tomaron los 30 cm superiores y se colocaron en las parcelas de $14 \times 1 \times 0,8$ del sitio experimental. Después de este tiempo, las condiciones de estos suelos experimentales están muy cerca de las que se encuentran en campo, en términos de densidad aparente y otras propiedades como granulometría y textura.

Una descripción completa y detallada de los suelos se puede encontrar en Bermúdez (1997). Las características principales de los mismos se resumen en la siguiente tabla (Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros físico-químicos de los suelos. (Fuente: Bermúdez, 1997).

Parámetros	Unidades	Cambisol	Gypsisol	Solonchak	Solonetz
densidad real	g cm ⁻³	2.52	2.01	2.52	2.43
densidad aparente	g cm ⁻³	1.31	1.18	1.31	1.59
porosidad total	%	47.88	41.26	47.94	34.52
Granulometría					
Arena	%	30.01	13.88	26.35	16.70
Limo grueso	%	12.36	18.18	12.15	10.73
Limo fino	%	33.87	45.65	33.76	41.62
Arcilla	%	23.79	22.29	27.74	30.95
Textura		franco arenoso	Limosa	Franco arcilloso	Franco limoso
pH		8.63	8.35	8.13	9.63
CE 1/5	dSm ⁻¹	0.37	2.40	2.33	2.54
CE (es)	dSm ⁻¹		3.84	5.92	19.23
C.I.C	meqL ⁻¹	149.40	119.88	155.99	146.85
Carbono	%	1.02	0.49	1.03	0.52
Materia orgánica	%	1.73	0.84	1.78	0.85
nitrógeno	%	0.11	0.07	0.06	0.02
C/N		9.19	7.54	17.76	26.00
CO ₃ ⁼	%	35.41	15.72	35.70	32.99
yesos	%	2.50	61.79	3.81	1.20

Cambisoles

Estos suelos se desarrollan sobre glaciares y terrazas de depósitos fluviales y margas. El riesgo de erosión es de bajo a medio. Su textura más frecuente es franco-limosa. Muestran un buen drenaje, pH alcalino y baja salinidad. Los contenidos de materia orgánica son bajos (<2 %), bajo contenido de yeso y un 35,4 % de carbonatos.

Gypsisoles

Se encuentran en los valles aluvio-coluviales desarrollados sobre depósitos de colinas de gipsíferos cercanos. Tienen una textura franco-limosa. Muestran un buen drenaje en el exterior,

siendo más deficiente en el interior. Tienen un pH alcalino, valor medio de salinidad ($2,2 \text{ dS m}^{-1}$), porcentajes bajos de carbonatos, mientras que los porcentajes de yeso superan el 50 %.

Solonchaks

Son suelos que se encuentran en zonas llanas o deprimidas, siendo altamente erosionables. Presentan propiedades sálicas, con elevados valores de conductividad eléctrica y pH. Su textura es arcillosa y presentan un mal drenaje.

Solonetz

Son suelos que tienen un horizonte B nátrico, con un porcentaje de sodio $\text{ESP} > 15\%$ y $\text{pH} > 8,5$ (Porta et al., 1999). Presentan baja permeabilidad, problemas de drenaje y de erosionabilidad.

5.2. Diseño del experimento

La experimentación en campo se realizó sobre 8 semilleros (dos para cada suelo; Fig. 21) de 14 m. x 1 m., situados en el recinto de la estación experimental de Aula Dei.



Figura 21. Vista general de los semilleros al inicio de la investigación (Fuente: Elaboración propia).

5.2.1. Manejo previo de los suelos

Estos suelos estaban completamente nivelados para evitar efectos de gradiente de pendiente y fueron preparados con las siguientes labores:

- 15 días antes de las simulaciones de lluvia, se retiró todo tipo de material vegetal que había en las parcelas, como malas hierbas y hojas para que no interfirieran en la formación de la costra.
- Una semana antes de las simulaciones los suelos fueron labrados mediante un arado rotativo (mula mecánica) con una profundidad de labor de 15 cm.
Esta labor es realizada comúnmente en esta zona antes de la implementación de cultivos en regadío.
- El día antes de las simulaciones se pasó un rastrillo con el objetivo de igualar el terreno, retirar alguna piedra y eliminar la posible costra que pudiese haberse formado desde el arado.

5.2.2. Diseño experimental

De acuerdo con el planteamiento y objetivos del trabajo, la experimentación llevada a cabo se dividió en dos partes. Durante la primera, se realizó una puesta a punto y preparación de los instrumentos y métodos que iban a ser utilizados posteriormente en campo. Se realizó la calibración del simulador de lluvia, de los infiltrómetros de disco, de la sonda de humedad y del penetrómetro.

En la segunda parte, realizada en campo, se siguió el siguiente procedimiento:

El mismo día que se comenzó con las simulaciones de lluvia, se tomaron las medidas de las características iniciales de los suelos, en cuanto al estado de humedad y resistencia a la penetración, así como la determinación de agregados por suelo, para ver el estado inicial en el que se encontraban antes de empezar los ensayos en campo.

A continuación, se simularon un total de 4 episodios de lluvia por suelo con una duración de 15 minutos, tratando de mantener la intensidad del flujo de agua lo más estable posible durante cada simulación. Con el fin de conseguir una mayor robustez estadística tanto en la lluvia simulada como en la respuesta de los suelos, en cuanto a la formación de la costra, se realizaron tres repeticiones de cada tipo de episodio de lluvia. De este modo, cada parcela de suelo se dividió en cuatro secciones correspondientes a cada episodio de lluvia, repetidas a su vez tres veces sobre el mismo suelo. En total, se realizaron 48 simulaciones, 12 por tipo de suelo y por intensidad de lluvia (Fig. 22). Suponiendo un total de 12h de lluvia simulada, sin contar el tiempo de descanso entre simulaciones. Con el fin de mantener las características ambientales lo más estables e iguales posibles para cada suelo, las simulaciones de lluvia se realizaron lo más seguidas posibles en el tiempo.

Al finalizar las simulaciones, una vez seco el suelo, se midió la resistencia a la penetración, la humedad del suelo y la infiltración. En las medidas de infiltración se utilizaron dos infiltrómetros de

disco, efectuando dos repeticiones por episodio de simulación de lluvia, efectuándose un total de 96 medidas de infiltración.

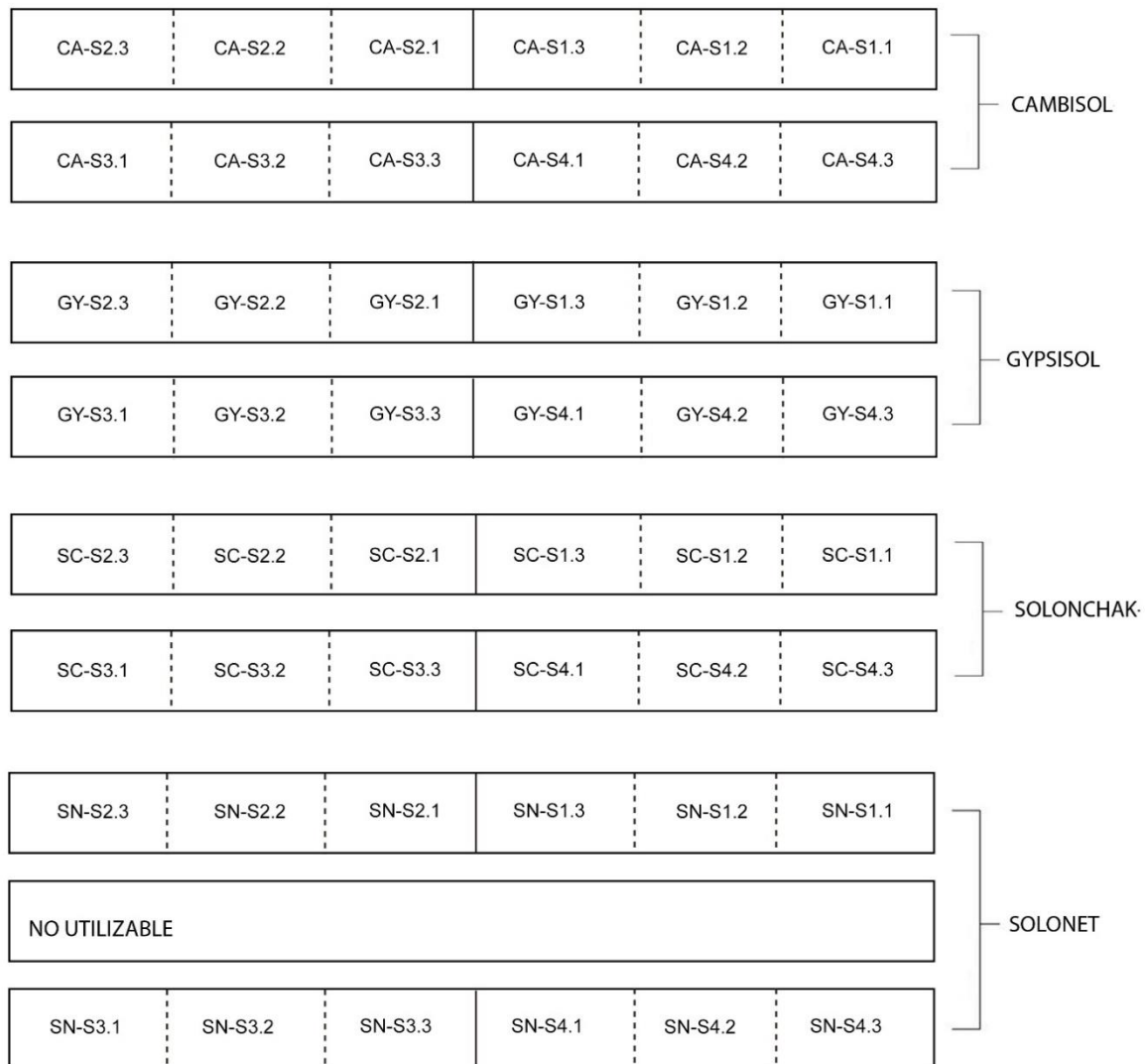


Figura 22. El diseño experimental se muestra en este esquema (Fuente: Elaboración propia).

5.3. Instrumentación y toma de datos

5.3.1. Suelos y costra superficial

Medición de la costra superficial: resistencia a la penetración

La determinación de la resistencia del suelo a la penetración se efectuó con un penetrómetro de bolsillo (geotester; Fig. 23).

El penetrómetro consta de un muelle calibrado en el interior de la carcasa para la determinación de las cargas aplicadas, de una esfera en la que se lee la carga total aplicada, y puntas intercambiables de diferentes diámetros. En nuestro caso se utilizó la punta de 6,4 mm de diámetro de sección plana.

El penetrómetro se manejaba con la mano derecha y se introducía la varilla de punta plana en el suelo presionando progresivamente con una velocidad constante hasta una hendidura visible en la punta. Acto seguido se apuntaba el valor en kg cm^{-2} .

Las medidas de resistencia a la penetración, se efectuaron sobre el suelo inicial y sobre el suelo seco después de la aplicación de lluvia simulada. Se tomaron datos de resistencia a la penetración en un total de 9 puntos de muestreo al azar por simulación y réplica.



Figura 23. Realizando una medida de resistencia a la penetración en campo (Fuente: Elaboración propia).

Contenido de humedad del suelo

Se utilizó una sonda capacitiva Delta-T SM200. Dicha sonda consta de una carcasa impermeable que contiene el sistema electrónico y dos varillas de acero inoxidable conectadas en un extremo a la carcasa. Las varillas se introducen completamente en el suelo cuando se van a realizar las medidas de humedad volumétrica. El instrumento mide la constante dieléctrica aparente del suelo a partir de la cual se calcula el contenido de agua volumétrico (% vol.) (Fig. 24).

Al igual que las medidas de resistencia a la penetración, las medidas de humedad se efectuaron sobre el suelo inicial y sobre el suelo seco después de la aplicación de lluvia simulada, un total de 9 puntos de muestreo por simulación y réplica.



Figura 24. Realizando una medida de humedad en campo con la sonda capacitiva (Fuente: Elaboración propia).

Estudio de agregados e índice de agregación de los suelos

La distribución de los tamaños de los agregados juega un papel muy importante en el proceso de formación de costras. Tras haber sometido a los suelos a un laboreo intenso, se procedió a analizar el estado de los agregados por suelo para determinar si existían diferencias por el tipo de suelo. Para determinar el estado de los agregados en los suelos, en condiciones de suelo seco y arado, se tomó una muestra compuesta de 0-5 cm de profundidad en las parcelas experimentales correspondiente a cada parcela de simulación por intensidad y por suelo (S1, S2, S3 y S4, Fig. 22) y, así saber el tamaño

de los agregados antes de producirse este evento. Fueron recogidas en botes de plástico con una cuchara las muestras de tierra para su análisis en el laboratorio. Las muestras se dejaron secar al aire, para posteriormente separar los agregados por clases de tamaños realizando un tamizado de la muestra compuesta obtenida con el fin de obtener el diámetro medio ponderado de los agregados.

En primer lugar, se separó la fracción superior 8 mm desmenuzando los agregados de ese tamaño para juntarlos con el resto de la muestra, siendo así una muestra representativa. Tras separar manualmente las piedras y los restos orgánicos, se pesaron unos 200 gr. aproximadamente de la muestra inicial y fueron pasados por una columna de tamices con la siguiente luz: 4, 2, 1, 0.85, 0.5, 0,25 y 0.05 mm, para lo cual se empleó una tamizadora electromagnética (Fig. 25), cuya función es agitar la torre de tamices separar los agregados de diferentes tamaños, sin que se produzca la disgregación de éstos por el movimiento. Para eso se calibró previamente un tiempo de tamizado y una amplitud óptimos, de 5 minutos y 0,1 mm, respectivamente. Una vez separados se pesó el contenido de cada tamiz.



Figura 25. Detalle de la tamizadora electromagnética (Fuente: Elaboración propia).

A partir de la distribución de tamaño de agregados, se calculó, el diámetro medio ponderado (DMP), de acuerdo con la expresión de Kemper y Rosenau (1986).

$$DMP' = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (7)$$

donde X_i es el diámetro medio de cada fracción de tamaños y W_i la proporción del peso de cada fracción con respecto al peso total. Generalmente esta expresión sobreestima el diámetro medio ponderado, por lo que se corrigió según la expresión dada por Younker y McGuinness (1956):

$$DMP = 0,876 DMP' - 0,079 \quad (8)$$

En segundo lugar, y siguiendo la propuesta de Dobrzanski et al., (1975), se calculó el índice de agregación (IA), según:

$$IA = \sum_{i=1}^n P_i Q_i \quad (9)$$

donde P_i , es el porcentaje de agregados de cada fracción y Q_i un factor de ponderación asignado a cada una de ellas. Los valores de Q_i se eligieron adaptando los propuestos por Dobrzanski et al., (1975) y weill et al., (1988) a nuestras clases de agregados, según la siguiente equivalencia:

Fracciones de agregados (mm)

	>8	8-4	4-2	2-1	1-0,84	0,84-0,5	0,5-0,25	<0,25
Q_i	0	3	8,5	9,5	6	4,5	3	0

5.3.2 Simulación de lluvia

Los simuladores de lluvia son ampliamente utilizados como método para evaluar la generación de escorrentía superficial, erosión del suelo, infiltración y procesos relacionados como costras, salpicaduras y redistribución de sólidos y solutos por el impacto de las gotas de lluvia (Arnáez

et al., 2007). El uso de lluvias simuladas proporciona un mejor control experimental sobre las muchas variables que rigen la precipitación natural, tales como duración, intensidad y energía cinética entre otras (Nadal-Romero y Regüés, 2009). La posibilidad de altas tasas de repetición ofrece una mayor robustez estadística para abordar los diferentes factores que influyen en la formación de la costra.

No hay una estandarización entre simuladores de lluvia, éstos difieren en diseño, intensidades de lluvia, distribución espacial de la precipitación, tamaños de gota y velocidades de caída, lo que impide abordar una comparación significativa entre los resultados. Por lo tanto, el conocimiento exacto de las condiciones de la prueba es un requisito fundamental para interpretar, combinar y clasificar resultados y poder así tomar decisiones contra la formación de la costra edáfica.

Las propiedades más sustanciales y críticas de una precipitación simulada son la distribución del tamaño de gota, las velocidades de caída de las gotas y la distribución espacial de la precipitación en la parcela (Iserloh et al., 2013). Para el cálculo de la distribución espacial de la precipitación es necesario calcular el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU) (Christiansen, 1942). Este valor ha sido tomado de Iserloh et al. (2013) en el que define las características de varios simuladores, y se muestra en la tabla 5.

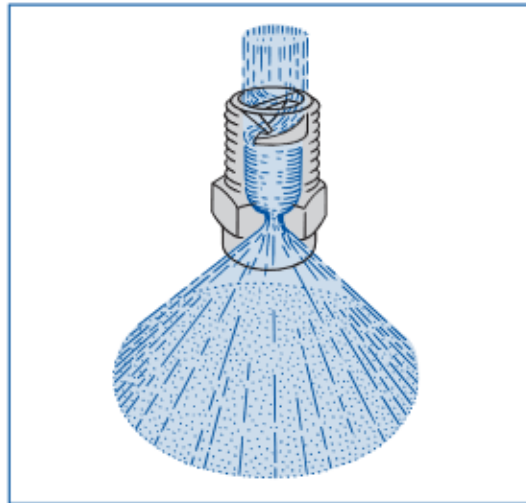


Figura 26. En esta figura se muestra como se produce la pulverización en el interior de la boquilla y el ángulo de rociado producido a continuación (fuente: Lechler. Recuperado de http://www.lechler.de/pdf/axial_vollkegelduesen_e.pdf).

Los componentes básicos del simulador de lluvia son una boquilla, una estructura en la que se instala la boquilla, las conexiones con el suministro de agua y el sistema de bombeo, provisto de un manómetro que permita regular la presión de agua y con ello la intensidad de cada evento.

Asimismo, se instaló un protector contra el viento para evitar interferencias durante el experimento. A continuación se describen todas las partes con más detalle.

Tabla 5. Principales características del simulador de lluvia.

Altura de caída (m)	2,2
Boquilla	Lechler 460.608.17
Angulo de rociado	120°
Orificio de salida (mm)	1,4
CU (%)	96.5
Fuente de agua	Bomba de presión accionada por motor de gasolina
Detalles	Arnaez et al. (2007)

a) *Boquilla:* La boquilla (Lechler 460.608.17 para intensidades intermedias: 45 mm h^{-1} con una variación de $\pm 15 \text{ mm h}^{-1}$, dependiendo de las condiciones de presión del agua y oscilaciones) se colocó en la parte superior de la estructura (Fig. 28), a una altura de 2.2 m. por encima de la superficie del suelo, y se conectó a través de la manguera de goma a la bomba.

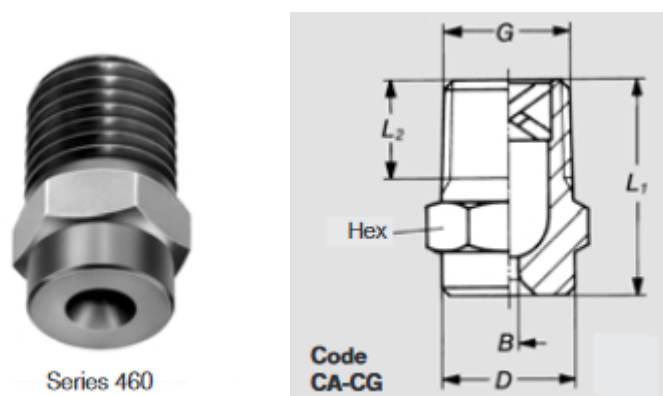


Figura 27. Imagen de la boquilla utilizada en el experimento (Fuente: Lechler. Recuperado de http://www.lechler.de/pdf/axial_vollkegelduesen_e.pdf).



Figura 28. Vista de la boquilla en funcionamiento, instalada en la parte superior de la estructura del simulador (Fuente: Elaboración propia).

b) Estructura: consiste en una plataforma trapezoidal de 0.5×0.5 m, y 4 patas de metal de 2.5 m de largo, en forma de pirámide truncada. Las patas telescópicas permiten aumentar o disminuir la altura del aparato y dos se ajustan perfectamente en un terreno accidentado (Fig. 29). La parte superior de la torre consiste en una lámina metálica donde se coloca el dispositivo que sostiene la boquilla.



Figura 29. Vista de la estructura del simulador con el plástico protector del viento (Fuente: Elaboración propia).

c) *Sistema de bombeo*: consiste de una bomba (betolini, presión máxima de 20 bar, 17 l/min), un motor móvil (Honda G100) y una tanque de agua de 100 l., instalados los tres aparatos en un carrito manual (Fig. 30). Una manguera de goma de 10 m de largo lleva el agua desde la bomba hasta la boquilla y las características de la precipitación son reguladas por un presiométrico situado en la bomba. La intensidad se controla con una llave de paso que nos permite regular de forma manual la presión de salida del agua y dispone de un manómetro que indica la presión de trabajo en todo momento (Fig. 30). Estas presiones son de 1, 1.6, 2.2 y 2.5 bares.



Figura 30. Vista del carrito manual que contiene el sistema de bombeo y el depósito del simulador (Fuente: Elaboración propia).

d) *Protector contra el viento*: la estructura estaba cubierta de un plástico a medida para aislar la zona de acción de la boquilla. Esta protección impide que sea posible la evaporación de las gotas más pequeñas, y las perturbaciones causadas por el viento (Fig. 29).

La boquilla produce, en principio, una distribución uniforme de la lluvia simulada en un área definida por un anillo de acero de 0.35 m de diámetro (Fig. 31). En el interior del cilindro es donde se realizaron las mediciones. El anillo se colocó en el suelo para evitar fugas y para dirigir la escorrentía a la salida de la trama. En nuestro caso, como consecuencia de la corta duración de los ensayos con intensidades no muy elevadas no se llegó a formar agua de escorrentía.



Figura 31. Vista del cilindro de acero (Fuente: Elaboración propia).

Caracterización de los eventos de lluvia simulada

Las características de la lluvia simulada fueron monitorizadas a tiempo real mediante un monitor de precipitación láser (LPM) o disdrómetro óptico de la marca THIES Clima, dispuesto a unos 40 cm del suelo (Fig. 32). Inicialmente desarrollado por Donnadieu et al., (1969), el LPM está diseñado como un sensor del tipo de tiempo capaz de determinar el tipo de precipitación (llovizna, lluvia, nieve, granizo) a partir de la medición del tamaño y velocidad de caída de las partículas que atraviesan el rayo láser. El principio de medición se basa en la obscuración de la señal del láser infrarrojo provocada por el paso de las partículas a través del mismo, con una superficie de muestreo de 0.00514 m^2 . Además, incluye un software capaz de proporcionar medidas integradas por unidad de tiempo como la cantidad e intensidad de las precipitaciones a partir del espectro disdrométrico de la precipitación.



Figura 32. THIES instalado en la estructura del simulador de lluvia (Fuente: Elaboración propia).

Los datos fueron almacenados en un ordenador de campo (Artila Matrix 504) para su posterior tratamiento. Éste se instaló dentro de una caja hermética (Fig.33) para soportar las condiciones en campo, junto con un transformador de corriente alterna a continua y una fuente de alimentación de 220 V. Esta caja facilitaba la toma de datos de todos los ensayos ya que disponía de un cable de alimentación que cubría todos los puntos de las parcelas. A medida que se cambiaba el simulador de ensayo se movía la caja con el ordenador de campo.



Figura 33. Caja hermética que contiene el ordenador de campo (Matrix 504) para la recogida de datos (Fuente: Elaboración propia).

El sensor LPM (disdrómetro) clasifica cada gota medida en una matriz de 22 clases de tamaños de diámetro, y 20 clases de velocidad de las gotas (tabla 6), pudiendo determinar el número de gotas de un determinado tamaño que caen a una determinada velocidad. A partir de estos datos el sensor proporciona, para cada minuto, una serie de variables integradas, además de la matriz de gotas. Para cada evento de simulación se calculó la intensidad de la lluvia (I , mm h^{-1}), la cantidad de lluvia (P , mm), y la energía cinética por minuto (E_c , $\text{J m}^{-2} \text{mm}^{-1}$). Se consideró el comienzo de cada evento, desde el momento que se ponía en funcionamiento el simulador de lluvia, durante un tiempo de 15 minutos.

Tabla 6. Clasificación del diámetro y la velocidad de la gota.

Clase de diámetro de partícula				Clase de velocidad de partícula			
Clase	Diámetro desde (mm)	A (mm)	Ancho de la clase (m/s)	Clase	Velocidad desde (m/s)	A (m/s)	Ancho de la clase (m/s)
1	0.125	0.250	0.125	1	0.00	0.20	0.20
2	0.250	0.375	0.125	2	0.20	0.40	0.20
3	0.375	0.500	0.125	3	4.00	0.60	0.20
4	0.500	0.750	0.250	4	0.60	0.80	0.20
5	0.750	1.000	0.250	5	0.80	1.00	0.20
6	1.000	1.250	0.250	6	1.00	1.40	0.40
7	1.250	1.500	0.250	7	1.40	1.80	0.40
8	1.500	1.750	0.250	8	1.80	2.20	0.40
9	1.750	2.000	0.250	9	2.20	2.60	0.40
10	2.000	2.500	0.500	10	2.60	3.00	0.40
11	2.500	3.000	0.500	11	3.00	3.40	0.40
12	3.000	3.500	0.500	12	3.40	4.20	0.80
13	3.500	4.000	0.500	13	4.20	5.00	0.80
14	4.000	4.500	0.500	14	5.00	5.80	0.80
15	4.500	5.000	0.500	15	5.80	6.60	0.80
16	5.000	5.500	0.500	16	6.60	7.40	0.80
17	5.500	6.000	0.500	17	7.40	8.20	0.80
18	6.000	6.500	0.500	18	8.20	9.00	0.80
19	6.500	7.000	0.500	19	9.00	10.00	1.00
20	7.000	7.500	0.500	20	10.00	□	□
21	7.500	8.000	0.500	-	-	-	-
22	8.000	□	□	-	-	-	-

El sensor no calcula la energía cinética total ($E_{c_{\text{sum}}}$) por minuto, de modo que esta variable se estima a partir de la multiplicación de la energía cinética de cada gota en cada diámetro y clase de velocidad por el número de gotas en cada tamaño y clase de velocidad. Seguidamente, se obtiene la

energía cinética por superficie y volumen de lluvia dividiendo por el área de muestra del dispositivo (a, 0,00514 m²) y lluvia por minuto (P_r):

$$KE_o = \frac{Ke_{sum}}{aP_r} = \frac{\sum N \frac{1}{12} 10^{-3} \pi \rho v_j^2 D_i^3}{aP_r} \quad (10)$$

donde N es el número de gotas en una clase de tamaño, ρ es la densidad del agua (1 g cm⁻³), v_j es la velocidad media para la clase de velocidad j (m s⁻¹) y D_i es el diámetro medio para la clase i (mm). Este cálculo está implementado en un código de procesado en el que además se obtienen estadísticos descriptivos de la matriz de gota, tales como el D50 o V50. La siguiente tabla muestra las variables que se obtienen en el procesado inicial de los datos brutos.

Tabla 7. Variables que se obtienen del disdrómetro óptico en el procesado inicial de los datos brutos.

Nombre	Descripción
type	modelo del aparato
serial	número de serie del aparato
time	fecha y hora de la observación
synop	SYNOP code 4677
r	Intensidad de lluvia calculada, mm h⁻¹
p	Cantidad de precipitación calculada, mm
m	Contenido de agua calculado , g m ⁻³
z	Reflectividad radar calculado, dB mm ⁶ m ⁻³
ke	Energía cinética, J m⁻² mm⁻¹
mor	Visibilidad MOR calculada, m
r_meas	Intensidad de lluvia medida, mm h⁻¹
z_meas	Reflectividad radar medida, dB mm ⁶ m ⁻³
mor_meas	Visibilidad MOR medida, m
qual	Calidad de datos, %
np	Número de partículas detectadas (-)
lcurrent	Valor medio de la corriente láser (1/100 mA)
ocontrol	Salida de control óptico (mV)
power	Fuente de alimentación del sensor (V)
tmp_int	Temperatura interna (sensor) (°C)
d10	Diámetro de la gota, percentil 10 (mm)

Nombre	Descripción
d25	Diámetro de la gota, percentil 25 (mm)
d50	Diámetro de la gota, percentil 50 (mm)
d75	Diámetro de la gota, percentil 75 (mm)
d90	Diámetro de la gota, percentil 90 (mm)
dmean	Diámetro promedio de la gota (mm)
v10	Velocidad de caída, percentil 10 (m s^{-1})
v25	Velocidad de caída, percentil 25 (m s^{-1})
v50	Velocidad de caída, percentil 50 (m s^{-1})
v75	Velocidad de caída, percentil 75 (m s^{-1})
v90	Velocidad de caída, percentil 90 (m s^{-1})
vmean	Velocidad media de caída (m s^{-1})
t_shift	Cambio de hora de telegrama (s)
nrow	Número de línea de telegrama
err	Código de estado de error (0, sin error; 1, sin datos)
ncol	Número de campos de telegrama

Descripción ensayos simulación

El procedimiento experimental fue el siguiente. En primer lugar, se eligió la zona donde se realizaría la medición dentro de cada parcela insertando unos 5 cm el anillo metálico en el suelo en la zona central de cada réplica (Fig. 22). En el interior del cilindro, con un área de 0.1 m^2 es donde se tomarán las medidas tanto de la lluvia simulada, con el LPM, como de la costra superficial, a través del penetrómetro, y las relativas a la infiltración. Se entiende que la zona elegida para emplazar el cilindro es representativa del conjunto de la réplica, donde se tomaron las medidas sobre el estado inicial del suelo; de humedad, resistencia a la penetración inicial, así como una muestra compuesta de 0-5 cm de profundidad para determinar el estado de los agregados en los suelos.

Una vez tomadas las medidas y muestras del estadio inicial de los suelos, se procedió a colocar el simulador sobre la parcela, realizando los necesarios ajustes iniciales; se colocó el simulador de forma que la boquilla coincidiera con el centro del anillo metálico y después se adaptaron y nivelaron las patas telescópicas de tal forma que la boquilla quedase a una altura de 2.2 m. sobre el suelo. Asimismo, se situó el LPM a una altura de unos 40-50 cm sobre la superficie del suelo con el fin de que las medidas de lluvia que se obtuviesen fueran lo más parecidas posibles a las que precipitarían sobre el suelo.

Seguidamente, se procedió a la simulación de lluvia durante un tiempo de 15 minutos para cada intensidad correspondiente, tratando de mantener ésta lo más estable posible durante el tiempo de la simulación. La cantidad de agua que sale de la boquilla se regula con un manómetro capaz de controlar la presión. Inicialmente se diseñaron cuatro tipos de eventos de lluvia simulada manteniendo la presión constante en torno a 1, 1.6, 2.2 y 2.5 bares.

En el cuaderno de campo se anotó información relativa a cada simulación: la hora de inicio y fin, así como cualquier observación o incidencia, necesaria de ser tenida en cuenta en el tratamiento de los datos. Los datos relativos a la simulación de lluvia, almacenados en el datalogger Artila Matrix 504, fueron descargados al final de las simulaciones con el fin de proceder a su análisis en el laboratorio.

Incidencias

Las principales incidencias a resaltar son las siguientes:

- El agua que sale por la boquilla no cae verticalmente, sino que la presión dota a las gotas de una trayectoria con un ángulo distinto al de la vertical, así como una mayor velocidad que la velocidad terminal de caída. Ambas características, además de evidenciar las diferencias con respecto a la lluvia natural, supusieron que una gran parte del agua que salía desde la boquilla se canalizase a través del plástico que a su vez goteaba este caudal en el suelo (Fig. 34). En principio, al evitar este problema en la zona central donde se situaba el cilindro es una incidencia a tener en cuenta pero que no creemos que afectase al suelo justo donde se tomaron las medidas.



Figura 34. Vista de los encharcamientos en el suelo debido al flujo de agua canalizado a través del plástico (izquierda), y vista del suelo minutos después de la simulación de lluvia (derecha), donde se observa una desagregación del suelo mayor en la zona exterior al cilindro de medición (Fuente: Elaboración propia).

- Otra de las incidencias relevantes es la oscilación en la presión de entrada del agua, capaz de generar cambios de intensidad y alteraciones en la distribución del agua pulverizada por la boquilla.

5.3.3. Determinación de las propiedades hidrofísicas del suelo tras la formación de la costra

Método de medición: infiltrómetro de disco

El infiltrómetro de disco consta de tres partes principalmente:

a) Depósito de agua.

El depósito consta de un tubo de metacrilato con una altura de 45 cm y 4 cm de diámetro interno. En el que se incorpora el sistema de medida automático de altura de agua con transductores diferenciales de presión. El transductor de presión se instala en la parte baja del tubo de metacrilato conectado a un codo que sale del depósito. En la parte alta del depósito, alineado con el transductor de presión sale otro codo. Ambos codos se conectan con un tubo de silicona.

b) Torre de burbujeo.

Consiste en un tubo de metacrilato sujeto a la pared del depósito mediante una brida metálica. En este tubo se insertan dos tubitos sobre un tapón de goma que ajusta la parte superior del tubo, de manera

que uno permite mantener la entrada de aire y servirnos de referencia para llenar de agua un depósito a la altura deseada, y el otro permite que el aire que entra a través del otro tubito pase directamente al disco. El tubo de entrada de aire está sumergido 0.5 cm en agua, lo que permite suministrar la tensión de infiltración deseada.

c) Disco.

Está compuesto por una pieza circular, que consta de una base en la que se inserta la malla permeable, y un cuello, que permite un correcto acoplamiento con el depósito. La base del disco tiene una altura de 3 cm y un diámetro de 10 cm. La altura total del disco, con la altura del cuello es de 6 cm.

En la parte superior del disco se inserta un tubo de hierro que permite conectar, a través de un tubo de goma, la base del disco con la torre de burbujeo. El otro extremo del tubo de hierro termina en la base del disco a 0.5 cm de altura del suelo. La membrana porosa colocada en la base del disco es una malla de nylon de 20 μm de tamaño de poro. Esta malla se ajusta en la base del disco con una goma insertada sobre una hendidura del cuello del disco, de modo que le proporcionaba un buen acople y la malla permanecía rígida.



Figura 35. Infiltrómetros de disco utilizados en el experimento (Fuente: Elaboración propia).

Calibración transductores de presión

Para las medidas de infiltración, se utilizó un sistema de medición automática de la altura de la columna de agua (infiltrómetro de disco), utilizando transductores diferenciales de presión conectados a un datalogger Campbell CR1000. El diseño es el mismo que el expuesto por Casey y Derby, (2002).

En primer lugar, previo a la realización de las mediciones en campo, se procedió a comprobar su precisión. Para ello, se utilizaron dos infiltrómetros conectados a los transductores de presión del datalogger, que a su vez estaba conectado a un ordenador que incorpora el programa informático (Campbell PC 400) capaz de leer a tiempo real el voltaje del transductor.

A continuación, se llenó el tubo de metacrilato (de 45 cm de altura y 4 cm de diámetro) de agua y se midió el voltaje a diferentes alturas de columna de agua; a 30, 25, 20, 15, 10 y 0 cm, que es dónde está fijado el transductor de presión.

Medidas de las propiedades hidráulicas del suelo con infiltrómetro de disco

Se utilizaron simultáneamente dos infiltrómetros, los cuales estaban automatizados con un transductor diferencial de presión conectado a un datalogger. Se utilizó un PDA (Personal Digital Assistant), conectado al datalogger que permitía visualizar a tiempo real la altura de columna de agua del infiltrómetro, y así detectar posibles errores en las medidas de infiltración.

El procedimiento experimental fue el siguiente. En primer lugar, se eligió la zona donde se realizaría la medición dentro de cada parcela. Escogiendo el microrelieve más llano posible para obtener mejor contacto con la superficie del suelo y una mejor estabilidad. En esa misma zona se tomó la humedad final del suelo con la sonda de humedad, la medida de resistencia a la penetración final con el penetrómetro y se cogió una muestra de suelo inicial (seco) con la espátula, que quedaron almacenadas en botes de plástico para su futuro análisis, necesario para calcular la conductividad hidráulica.

Posteriormente, en laboratorio se secaron las muestras a 105 °C durante 24 h o 50 °C durante 48 h en el caso del Gypsisol. Una vez secas se volvieron a pesar las muestras de suelo, tarando también los botes de plástico correspondientes a cada muestra, con el fin de determinar la humedad gravimétrica del suelo.

En la zona escogida para realizar la medición se extendió una capa de arena fina para cada infiltrómetro, de unos 2 mm de altura, ocupando una superficie igual a la de la base del disco.



Figura 36. Izquierda: Preparación del suelo con capa fina de arena antes de la infiltración. Derecha: Resultado del suelo después de la infiltración (Fuente: Elaboración propia).

Se llenaron los depósitos de los infiltrómetros, se conectó al datalogger Campbell a sus respectivos transductores diferenciales de presión instalados en cada infiltrómetro y se comprobó a través de PDA que los transductores de presión medían correctamente la altura de agua del infiltrómetro. Una vez terminado este proceso, se procedió a colocar los infiltrómetros sobre sus respectivas superficies preparadas en el suelo con un intervalo de tiempo de 10 segundos entre las 2 réplicas. Se apuntó la hora de comienzo y final de la toma de medidas. Las medidas de infiltración duraron de 9 a 15 minutos. Una vez termina la medida de infiltración, se retiraron los infiltrómetros. Al final de la infiltración, inmediatamente después de retirar el infiltrómetro, se tomó en cada zona de medida una muestra de suelo saturado, justo debajo del disco, que posteriormente en laboratorio se secaron, según procedimiento descrito en los párrafos anteriores, para obtener la humedad saturada del suelo.

Los datos almacenados en el datalogger se descargaron en un ordenador para su posterior tratamiento y análisis en el laboratorio.

Propiedades hidráulicas del suelo: conductividad hidráulica y sorptividad.

Humedad gravimétrica y volumétrica

La humedad gravimétrica (w) es la cantidad de agua en peso contenido en una muestra de suelo seco tras secar a 105 °C hasta obtener un peso constante. Constituye el método de referencia de medida de humedad volumétrica del suelo. Se calcula según:

$$W = \frac{(m1 - m2)}{(m2 - m3)} = \frac{m4}{m5} \quad (11)$$

donde:

W = contenido de agua

m1 = masa de la tara y el espécimen húmedo (g)

m2 = masa de la tara y la muestra seca (g)

m3 = masa de la tara (g)

m4 = masa de agua (g)

m5 = masa de las partículas sólidas (g)

Se introdujeron los botes con las muestras de suelo para su desecación en una estufa con el tape abierto. Se realizaron dos periodos sucesivos de secado, una a 50° durante 24 horas y otra seguidamente a 105 °C durante 24 horas para verificar la calidad del secado. Al finalizar cada uno de los periodos se pesaron todas las muestras con una balanza de precisión.

Al hacer la resta del peso 50 °C menos peso a 105 °C se verificaron diferencias importantes en el Gypsisol. Estos es porque al secar un suelo yesoso a 105 °C se evapora el agua de constitución de la molécula de yeso (CaSO4·½H2O). Este agua, es un agua no disponible para las planta, luego no hay que considerarla.

La humedad volumétrica a saturación (θ_s) que es equivalente a la porosidad total del suelo (P) (Porta et al., 1999) se puede calcular según:

$$P = 1 - \frac{\rho a}{\rho r} \quad (12)$$

donde:

P = porosidad (en tanto por uno) $m^3 m^{-3}$

ρa = densidad aparente

ρr = densidad real

La densidad real (ρ_r) corresponde a la densidad media de la fase sólida o densidad de las partículas. El valor medio para suelos minerales es de 2650 kg m^{-3} . Para calcularla se aplica la siguiente fórmula:

$$\rho_r = \frac{Ms}{Vs} \quad (13)$$

donde Ms es masa de sólidos y Vs es el volumen de sólidos.

La densidad aparente (ρ_a) se define como la masa por unidad de volumen e informa sobre el grado de compactación del suelo. Para calcularla se aplica la siguiente fórmula:

$$\rho_a = \frac{Ms}{Vt} \quad (14)$$

donde Ms es masa de sólidos y Vt es el volumen total de la muestra.

En nuestro caso, la humedad volumétrica ha sido calculada directamente a partir de los valores de porosidad total dados en la tabla de descripción de los suelos en el apartado 3.1.2 de material y métodos.

Propiedades hidráulicas del suelo: conductividad hidráulica y sorptividad

Para el cálculo de las propiedades hidráulicas de los suelos a partir de la infiltración acumulada, se utilizó la ecuación de Haverkamp et al., (1990), válida para la totalidad del tiempo de infiltración:

$$\frac{2(K_0 - K_n)^2}{S_0^2} t = \frac{2}{1 - \beta} \frac{(K_0 - K_n)(I_{1D} - K_n t)}{S_0^2} - \frac{1}{1 - \beta} \cdot \ln \left[\frac{1}{\beta} \exp(2\beta(K_0 - K_n)(I_{1D} - K_n t)/S_0^2) + \frac{\beta - 1}{\beta} \right] \quad (15)$$

β : es un parámetro de forma integral

θ_0 y θ_n : son la humedad volumétrica del suelo inicial y a saturación

S_0 : es la sorptividad para θ_0

K_0 y K_n : Son los valores de conductividad hidráulica correspondientes a θ_0 y θ_n

t : es el tiempo que transcurre hasta que termina la infiltración

La solución numérica de esta expresión permite estimar los valores de la conductividad hidráulica y de la sorptividad (Latorre y Moret-Fernandez, 2015). Para tal fin se utilizó un programa informático desarrollado en la EEAD que permite hacer estos cálculos (<http://swi.csic.es/infiltration/>).

5.4. Análisis estadístico de la relación entre lluvia, costra e infiltración por tipo de suelo

Tal y como se explicó en los objetivos del trabajo, el estudio realizado trata de entender y explicar varias cuestiones, en primer lugar por separado, con el fin último de estudiar la relación entre los episodios de lluvia simulada, la costra que éstos han provocado por tipo de suelo y, finalmente entender de qué manera se infiltra el agua en el suelo y sus parámetros en relación con la costra existente, formada en cada episodio de lluvia y por tipo de suelo.

El diseño experimental está pensado para dotar de robustez al modelo estadístico que caracterice y explique lo anteriormente planteado.

En primer lugar, se realiza una caracterización de la lluvia simulada a partir de un modelo lineal de efectos mixtos. Este tipo de modelo nos permite entender el patrón de cada variable relativa a cada episodio de lluvia simulada (intensidad, energía cinética, diámetro medio, ...), añadiendo la variabilidad que ocurre al repetir los episodios por tipo de suelo. Al mismo tiempo se testea si las variables de la lluvia por episodio de simulación son estadísticamente diferentes, empleando el test de Tukey o test de medias, que a su vez permite también introducir el valor de las réplicas como variabilidad aleatoria.

Los modelos lineales de efectos mixtos permiten incorporar los efectos fijos, tales como la intensidad por episodio de simulación (a 1, 1.6, 2.2 y 2.5 bares) incluyendo los efectos aleatorios, atribuibles a la réplica de cada simulación. Así, la tabla de datos se compone de una variable factorial compuesta de unas siglas que indican la réplica además de la variable factorial que indica el episodio

de simulación (1, 1.6, 2.2 y 2.5 bares) y la variable numérica que representa, en este caso, el valor de intensidad de la precipitación por minuto. Los efectos aleatorios pueden deberse a muchas causas que no podemos controlar, como oscilaciones en el caudal, y como consecuencia en la lluvia simulada, derivadas de oscilaciones de presión debidas al motor del simulador. Al añadir en el modelo los efectos aleatorios y tratarlos como tales, se evita que esta variabilidad se incorpore a los residuales del modelo, lo cual conlleva un resultado cuya variabilidad está sobrevalorada, al considerar todas las medidas como representativas. Este modelo combina una regresión lineal junto con el análisis de varianza de los efectos aleatorios. Matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$y_{ji} = \beta_1 + \beta_2 x_{ji} + b_j + \varepsilon_{ji}$$

$$b_j \sim N(0, \sigma^2 b_j), \varepsilon_{ji} \sim N(0, \sigma_j^2) \quad (16)$$

Un ejemplo con nuestros datos toma la siguiente forma:

$$I_{ji} = lme \text{ (fixed = } i \sim 0 + \text{ Sim, datos, } \sim 1 | \text{ Rep)}$$

donde la intensidad de la lluvia simulada, $I \text{ mmh}^{-1}$, por cada simulación j con el efecto aleatorio correspondiente a cada réplica i se tiene en cuenta. En este caso el modelo lineal empezaría en 0 (~ 0), lo cual equivale a β_1 ; “ i ” es el valor de intensidad por minuto, lo que equivale a $\beta_2 x_{ji}$. “Sim” indica la simulación a la que pertenece el valor de intensidad obtenido, equivale a b_j . Seguidamente se indica la tabla de datos (datos) donde se encuentran las variables, así como los efectos aleatorios correspondientes a cada réplica (Rep).

Con el fin de estudiar las propiedades de la lluvia simulada, se llevó a cabo este análisis para las variables: intensidad (I , mm h^{-1}) energía cinética (Ec , $\text{J m}^{-2} \text{mm}^{-1}$), número de partículas (np), diámetro y velocidad media (d_m , mm y v_m , m s^{-1}) y los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90 correspondientes a las distribuciones de diámetro y velocidad de las gotas de lluvia simulada, por minuto.

En segundo lugar, se analiza la relación conjunta entre lluvia, costra e infiltración. En este caso se utiliza un modelo de regresión lineal, dado que la recogida de datos no ha mantenido el patrón de repetición de las simulaciones de lluvia. En este análisis se relacionan todas las variables existentes en la tabla de datos relativas a la lluvia, características de los suelos y los resultados de las medidas de infiltración a través de los valores de sorptividad y conductividad hidráulica. Así, para analizar estadísticamente qué explica el desarrollo de la costra se toma como variable dependiente la variación

de la resistencia a la penetración, Δpen (Kg cm^{-2}) por tipo de suelo, siendo el tipo de suelo una variable factorial. El valor de variación de la resistencia a la penetración, Δpen (Kg cm^{-2}) por tipo de suelo, se relaciona con las variables independientes que pueden influir en la generación de la costra. Es el caso del diámetro mediano (d_{50} , mm) generalmente empleado para describir los procesos de splash o el impacto de las gotas, la intensidad de la lluvia (I , mm h^{-1}) que se relaciona con procesos de slaking, o la energía cinética (E_c , $\text{J m}^{-2} \text{mm}^{-1}$), entre otras.

En el caso de los valores obtenidos de sorptividad y conductividad hidráulica el modelo estadístico empleado es igual al descrito, teniendo en cuenta distintas variables independientes que pueden explicar las características de la infiltración en costra por suelo.

Para el análisis estadístico se utilizó el software de análisis estadístico R y Microsoft Excel para la caracterización general de cada una de las variables.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Estado inicial de los suelos y calibración de sensores

6.1.1. Medición de la costra superficial: resistencia a la penetración

La resistencia del suelo a la penetración permite, entre otras cosas, ver los cambios en la densidad aparente de los suelos, debidos a la compactación (López, 1993) y obtener así una evaluación indirecta de la degradación física, contribuyendo a definir requerimientos de manejo de los suelos. También es un indicador del espesor de la costra edáfica.

Por todo ello, se efectuaron medidas de resistencia a la penetración sobre el suelo inicial (una vez labrados los suelos) y sobre el suelo final (una vez el suelo se secó tras aplicar lluvia simulada) para describir el estado de compactación del suelo en estas dos situaciones.

En la Tabla 8, se presentan los datos de resistencia a la penetración (kg cm^{-2}) iniciales y finales, así como las desviaciones estándar, estimándose como valor medio representativo la media de las 9 medidas de resistencia a la penetración realizadas por simulación y réplica. Se observa como después del evento de lluvia simulada, y conforme aumenta la intensidad de lluvia, aumentan los valores de ΔRP ($\text{RP. final} - \text{RP. inicial}$), debido al aumento del espesor de la costra como consecuencia de la desintegración de los agregados por el impacto de las gotas de lluvia.

Tabla 8. Media y desviación estándar de las 9 medidas de resistencia a la penetración (kg cm^{-2}) tomadas por suelo, antes de comenzar las simulaciones y tras la formación de la costra.

Suelo	RP.inicial	sd_RP.inicial	RP.final	sd_RP.final	ΔRP
CA-S1.1	0.27	0.17	0.44	0.1	0.08
CA-S1.2	0.22	0.07	0.36	0.07	
CA-S1.3	0.41	0.22	0.34	0.09	
CA-S2.1	0.3	0.1	1.08	0.31	0.83
CA-S2.2	0.24	0.09	1.07	0.29	
CA-S2.3	0.34	0.19	1.22	0.39	
CA-S3.1	0.4	0.14	1.63	0.35	0.9
CA-S3.2	0.37	0.1	1.16	0.29	
CA-S3.3	0.54	0.11	1.21	0.15	
CA-S4.1	0.41	0.14	1.12	0.18	0.9
CA-S4.2	0.47	0.13	1.57	0.34	
CA-S4.3	0.33	0.13	1.21	0.18	

Suelo	RP.inicial	sd_RP.inicial	RP.final	sd_RP.final	Δ RP
GY-S1.1	0.31	0.16	0.6	0.18	0.75
GY-S1.2	0.41	0.14	1.1	0.51	
GY-S1.3	0.3	0.1	1.57	0.66	
GY-S2.1	0.43	0.16	1.93	0.5	1.53
GY-S2.2	0.43	0.1	2.05	1.07	
GY-S2.3	0.33	0.12	1.8	0.39	
GY-S3.1	0.34	0.17	1.68	0.39	1.27
GY-S3.2	0.33	0.13	1.55	0.48	
GY-S3.3	0.27	0.12	1.53	0.32	
GY-S4.1	0.38	0.1	1.43	0.25	1.28
GY-S4.2	0.38	0.07	1.27	0.41	
GY-S4.3	0.29	0.08	2.18	0.51	

Suelo	RP.inicial	sd_RP.inicial	RP.final	sd_RP.final	Δ RP
SC-S1.1	0.47	0.15	0.63	0.14	0.043
SC-S1.2	0.52	0.11	0.59	0.11	
SC-S1.3	0.58	0.2	0.48	0.12	
SC-S2.1	0.38	0.14	0.54	0.07	0.4
SC-S2.2	0.38	0.13	0.84	0.07	
SC-S2.3	0.41	0.15	1	0.15	
SC-S3.1	0.54	0.11	1.21	0.18	0.56
SC-S3.2	0.6	0.14	1.08	0.16	
SC-S3.3	0.53	0.16	1.06	0.13	
SC-S4.1	0.42	0.12	1.21	0.2	0.7
SC-S4.2	0.47	0.16	1.1	0.19	
SC-S4.3	0.48	0.16	1.18	0.19	

Suelo	RP.inicial	sd_RP.inicial	RP.final	sd_RP.final	Δ RP
SN-S1.1	0.62	0.08	1.04	0.16	0.26
SN-S1.2	0.93	0.35	1.09	0.2	
SN-S1.3	0.86	0.14	1.07	0.22	
SN-S2.1	0.74	0.17	1.03	0.14	0.2
SN-S2.2	0.97	0.4	1.06	0.17	
SN-S2.3	0.77	0.16	1.01	0.18	
SN-S3.1	0.74	0.11	1.6	0.23	0.64
SN-S3.2	0.86	0.13	1.42	0.25	
SN-S3.3	0.78	0.22	1.29	0.14	
SN-S4.1	0.81	0.12	1.78	0.31	1
SN-S4.2	0.78	0.21	1.94	0.3	
SN-S4.3	0.98	0.39	1.87	0.22	

6.1.2. Contenido de humedad del suelo

Con el fin de verificar el estado seco de los suelos se tomaron medidas de humedad del suelo iniciales y después de la simulación de lluvia, tras el secado de la costra edáfica. El valor de humedad inicial se utilizó, junto con la humedad a saturación para el cálculo de las propiedades hidráulicas del suelo.

En la Tabla 9, se presentan los datos de humedad del suelo (% vol.) iniciales y finales, así como las desviaciones estándar, estimándose como valor medio representativo la media de las 9 medidas de resistencia a la penetración realizadas por simulación y réplica.

Los valores medios más altos de humedad, tanto inicial como final han sido para el Gypsisol, ya que elevados porcentajes de yeso incrementan la capacidad de retención de agua (Aznar et al., 2013).

Tabla 9. Media y desviación estándar de las 9 medidas de humedad del suelo (%) para cada suelo, antes de comenzar las simulaciones y tras la formación de la costra.

Suelo	H.inicial	sd_H.inicial	H.final	sd_H.final
CA-S1.1	6.46	2.57	3.87	1.18
CA-S1.2	9.12	2.34	5.83	0.45
CA-S1.3	4.71	1.89	3.7	2.88
CA-S2.1	2.39	1.01	1.53	1.15
CA-S2.2	2.21	0.92	1.6	1.21
CA-S2.3	3.02	0.77	1.23	0.57
CA-S3.1	3.83	1.48	2.4	1.18
CA-S3.2	3.69	0.56	2.63	0.64
CA-S3.3	1.31	1.1	1.13	0.74
CA-S4.1	4.78	1.33	4.03	0.21
CA-S4.2	4.71	1.88	6.1	1.39
CA-S4.3	6.46	1.81	4.77	1.27

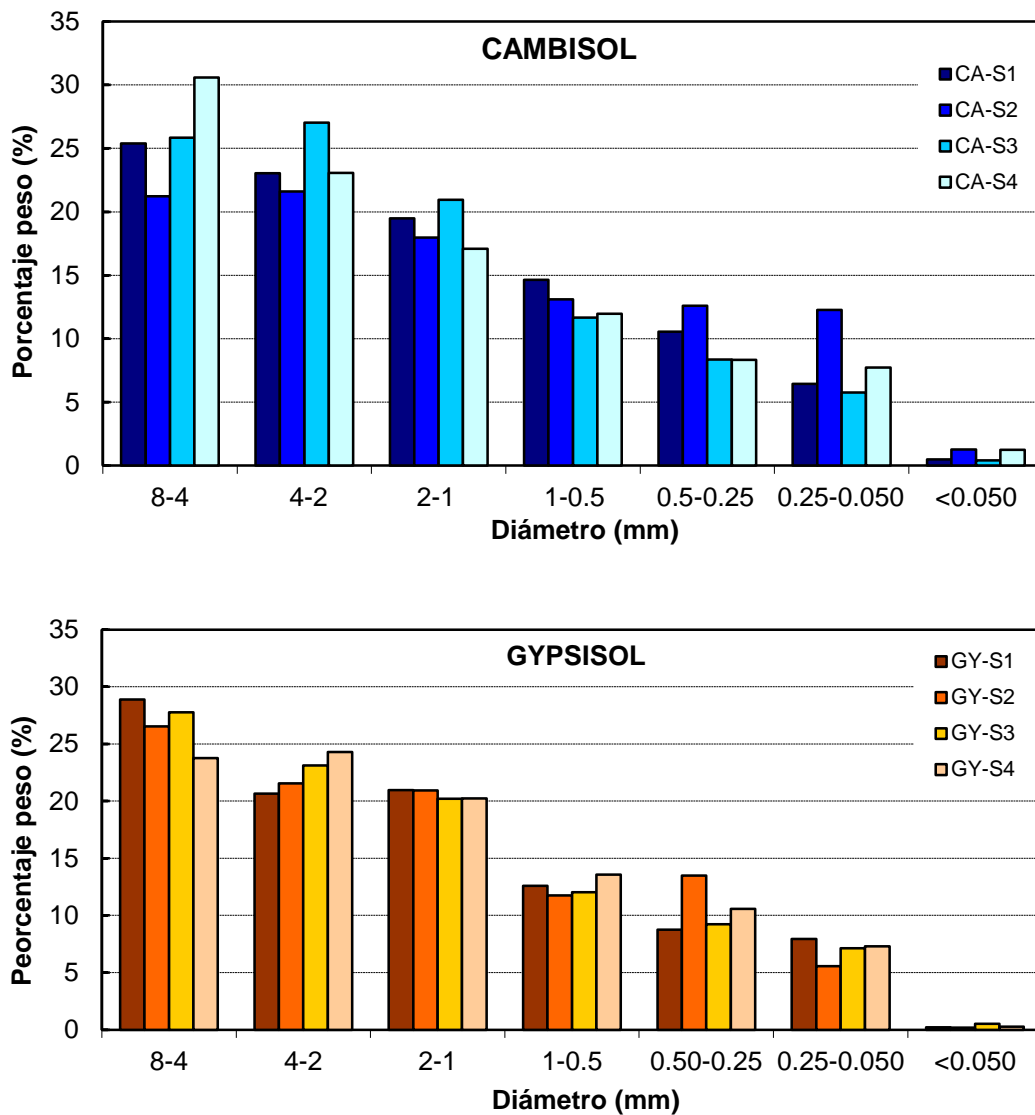
Suelo	H.inicial	sd_H.inicial	H.final	sd_H.final
GY-S1.1	9.07	2.22	8.1	1.55
GY-S1.2	13.76	2.12	12.47	1.46
GY-S1.3	9.79	1.27	9.87	0.86
GY-S2.1	11.87	2.25	10.33	0.06
GY-S2.2	11.14	2.3	9.03	2.18
GY-S2.3	7	0.98	6.07	0.9
GY-S3.1	9.67	2.09	7.6	0.92
GY-S3.2	9.07	2.93	11.27	1.4
GY-S3.3	8.79	1.58	11.47	1
GY-S4.1	7.7	2.04	10.63	0.5
GY-S4.2	8.63	2.06	13.17	2.38
GY-S4.3	12.02	1.82	16.97	1.16

Suelo	H.inicial	sd_H.inicial	H.final	sd_H.final
SC-S1.1	5.99	0.9	4.1	0.7
SC-S1.2	4.27	1.16	4.83	1.53
SC-S1.3	3.68	1.79	4.03	2.92
SC-S2.1	3.19	1.24	3	2
SC-S2.2	4.18	0.54	2.83	0.5
SC-S2.3	4.61	1.49	3.73	1.97
SC-S3.1	3.99	0.79	6.87	1.15
SC-S3.2	4.18	0.61	6.03	0.4
SC-S3.3	3.8	2.16	5.9	0.62
SC-S4.1	4.54	1.37	5.97	1.76
SC-S4.2	5.22	1.65	5.8	0.5
SC-S4.3	2.59	1.66	4.8	1.18

Suelo	H.inicial	sd_H.inicial	H.final	sd_H.final
SN-S1.1	2.88	0.78	2	0.46
SN-S1.2	5.47	1.94	1.5	0.82
SN-S1.3	4.46	1.97	1.7	0.36
SN-S2.1	5.1	1.62	2.37	0.31
SN-S2.2	4.39	1.35	3.67	1.29
SN-S2.3	4.7	1.4	4.9	0.17
SN-S3.1	6.51	1.38	5.5	0.95
SN-S3.2	7.69	1.93	5.2	1.21
SN-S3.3	6.79	2.75	6.9	1.47
SN-S4.1	5.16	1.26	8.1	0.89
SN-S4.2	5.4	2.05	6.47	2.35
SN-S4.3	6.13	1.92	8.77	0.47

6.1.3. Estudio de agregados e índice de agregación de los suelos

Los resultados de la Figura 37 no evidencian un efecto apreciable de diferencias de tamaños de agregados en cada suelo, ya que se ha aplicado el mismo tratamiento de laboreo (arado rotativo) en todos ellos. Esto nos permite verificar que el estado inicial de los suelos era uniforme para los 4 suelos y las diferencias en cuanto a la costra vendrán dadas por las características físico-químicas de cada suelo así como de los eventos de lluvia.



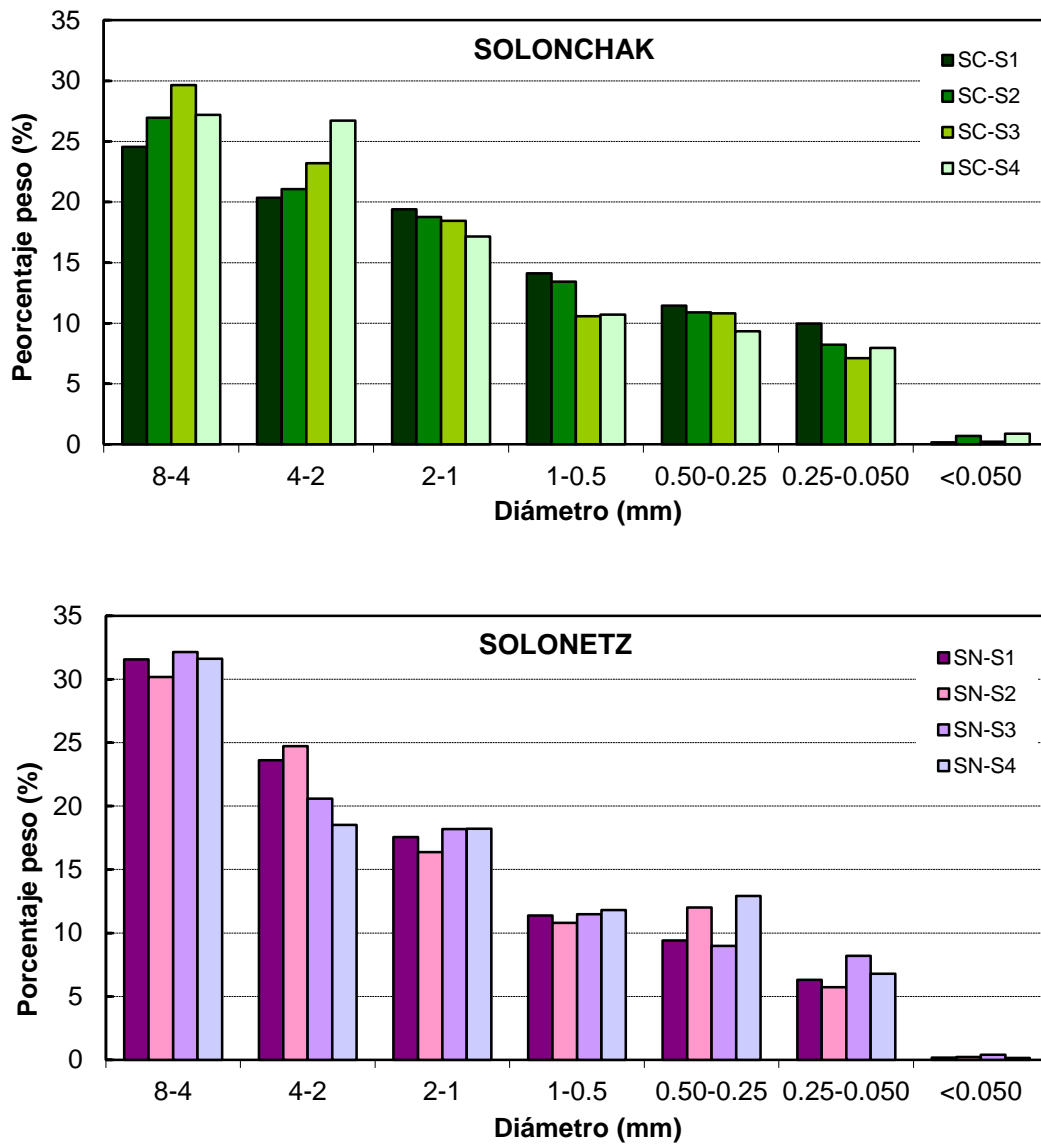


Figura 37. Porcentaje en peso (%) de agregados en función del diámetro de estos (mm).

El único aspecto a destacar es que el solonezt presenta un mayor porcentaje de agregados de 8-4 mm que puede ser debido a que inicialmente presentaba una consistencia más dura, por lo que el laboreo no desmenuzó tanto el terreno. Para eso se realizaron test ANOVA que verificaron que el diámetro medio ponderado es levemente superior en el solonetz sin ser excesivamente significativo.

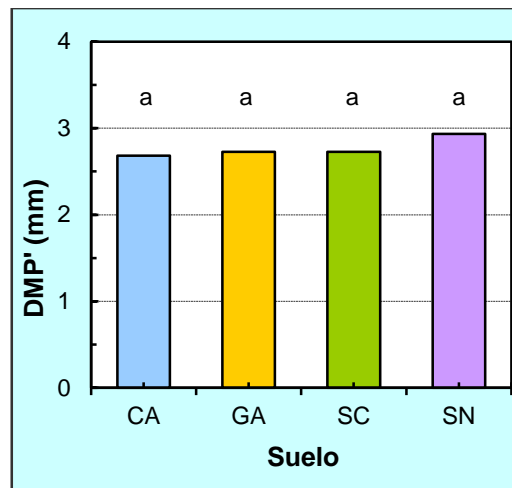


Figura 38. Diámetro medio ponderado (mm) por suelo.

6.2. Caracterización de la lluvia simulada

Durante el desarrollo de las simulaciones y el análisis de los datos se observó una escasa variación en los valores de las distintas variables de la lluvia según se incrementaba la presión. A partir de 1.6 bares de presión apenas existía una diferencia en los valores medidos por el LPM, asimismo los test estadísticos no mostraron diferencias significativas entre la simulación 3 y la simulación 4, por este motivo, así como por la existencia de una incidencia en campo durante una de las réplicas de la simulación 4, se decidió no considerar la simulación 4 en la descripción de los resultados. Los valores medios de cada variable relativa a cada episodio de simulación se muestran en la Tabla 10.

Como se muestra en la Tabla 10, apenas hay diferencias significativas entre las variables de la simulación 2 y 3 ya que a partir de aproximadamente 1.6 bares de presión, el LPM registraba un número menor de gotas de lluvia. Lo cual se explica por el ángulo de la boquilla utilizada. Esta boquilla está diseñada para repartir el agua, en principio homogéneamente, en un ángulo de 120° entorno al orificio por el que sale, sin embargo, durante las simulaciones de lluvia se apreció que un aumento de presión derivaba a un mayor flujo hacia los bordes del ángulo. En efecto, un mayor porcentaje del agua que salía de la boquilla se proyectaba hacia los bordes, chocando contra el plástico, mientras que la parte central, de caída vertical directa, donde se encontraba el área de medida y toma de datos, apenas mostraba variación.

Tabla 10. Análisis de la lluvia simulada (valores medios por minuto en cada tipo de simulación).

	Simulación 1 (~1 bar)		Simulación 2 (~1.6 bar)		Simulación 3 (~2.2 bar)	
	<i>media</i>	<i>std.dev</i>	<i>media</i>	<i>std.dev</i>	<i>media</i>	<i>std.dev</i>
Intensidad (mm/h)	26.454	12.677	40.504	6.906	41.137	8.802
Precip acum (mm)	6.614	3.169	10.126	1.727	10.284	2.200
Ke (Jm-2mm-1)	1.075	0.877	0.505	0.198	0.571	1.380
N gotas	22409	3113	18754	2599	18154	2223
d10 (mm)	0.204	0.014	0.239	0.013	0.249	0.014
d25 (mm)	0.300	0.025	0.372	0.020	0.387	0.022
d50 (mm)	0.428	0.035	0.538	0.027	0.559	0.026
d75 (mm)	0.586	0.054	0.700	0.023	0.718	0.026
d90 (mm)	0.727	0.034	0.875	0.040	0.900	0.038
dmedia (mm)	0.462	0.033	0.551	0.023	0.569	0.024
v10 (m/s)	0.361	0.064	0.277	0.016	0.269	0.016
v25(m/s)	0.605	0.064	0.501	0.039	0.481	0.036
v50 (m/s)	1.010	0.072	0.940	0.063	0.922	0.059
v75(m/s)	1.647	0.083	1.678	0.102	1.679	0.087
v90 (m/s)	2.308	0.097	2.531	0.162	2.569	0.159
vmedia (m/s)	1.205	0.067	1.210	0.076	1.211	0.066

En cambio, sí obtuvimos diferencias significativas en variables como el número de partículas y el diámetro medio de la gota entre las simulaciones 2 y 3. Otra de las incidencias que explican los valores observados es la gran variación de presión dentro de cada simulación, que aumentaba con el funcionamiento ininterrumpido del simulador.

A continuación se muestran los resultados de las diversas variables que hemos analizado en las simulaciones de lluvia. La figura incorpora los valores de cada réplica con el fin de visualizar posibles diferencias entre réplicas correspondientes a cada simulación.

Los valores de intensidad por simulación y réplica se muestran en la Figura 39, con una intensidad media de 26 mm h⁻¹ para la simulación 1, 40 mm h⁻¹ para la simulación 2 y 41 mm h⁻¹ para la simulación 3. Un aspecto a destacar es la amplia variabilidad que ha habido en las intensidades, siendo mayor en la simulación 1 y la simulación 3. Esto puede ser debido a que a 1 bar el simulador trabaja a la presión más baja generando una mayor oscilación en la presión. Al igual ocurre en la simulación 3, el simulador a 2.2 bares trabaja casi al máximo potencial encontrándose aquí las mayores oscilaciones de presión.

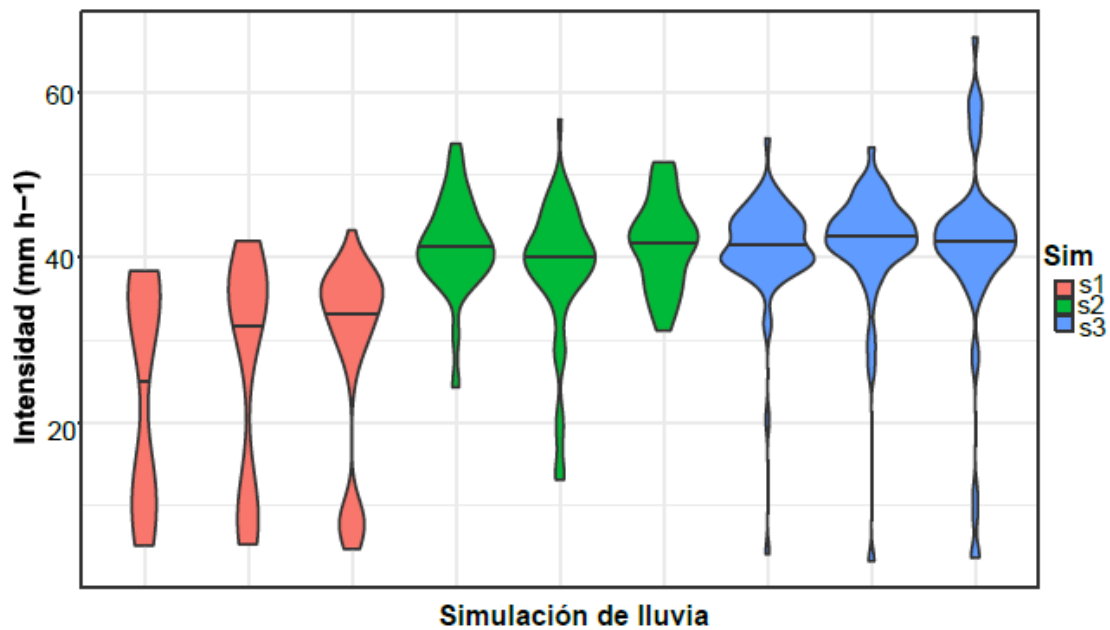


Figura 39. Muestra los valores de intensidad por simulación y réplica.

En la Figura 40 se muestra que los valores de energía cinética son muy similares para las 3 simulaciones, siendo incluso levemente superior en la simulación 1. Esto se explica, por lo comentado anteriormente, un aumento de presión incrementa el flujo en todo el ángulo que sale de la boquilla (120°), registrando el LPM un número menor de partículas a medida que aumenta la presión (Fig. 41). Al registrar más gotas, da un valor de energía cinética mayor, mientras que a mayor presión más flujo hacia el exterior y menor número de gotas sobre la superficie de medida.

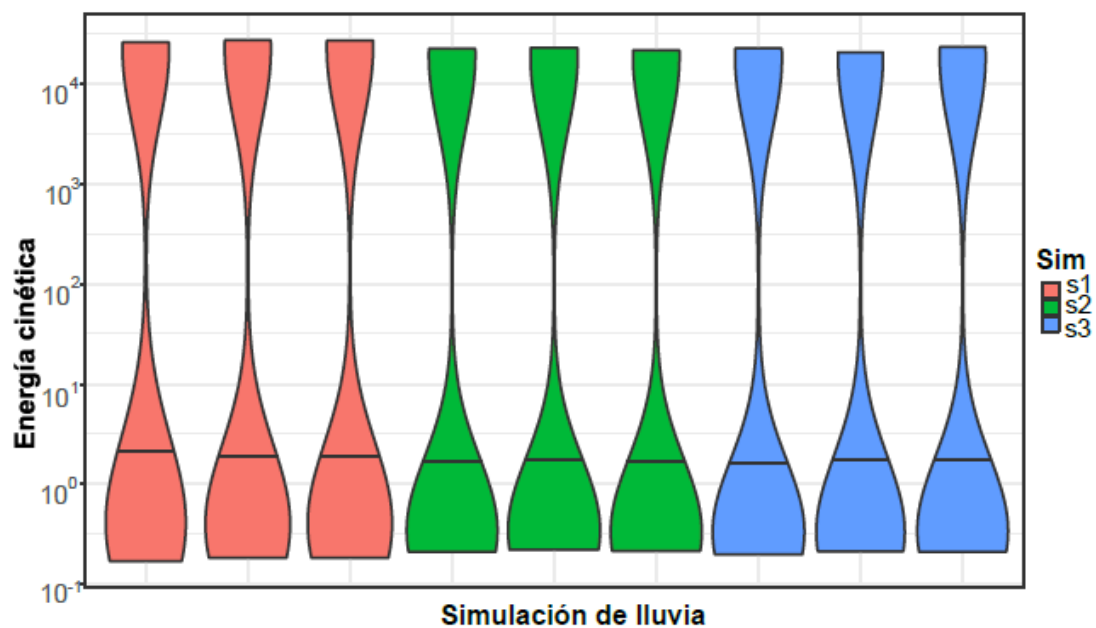


Figura 40. Muestra los valores de energía cinética por simulación y réplica.

A pesar de la reducción del número de gotas registradas por el LPM, 22409 en la simulación 1, 18754 en la simulación 2, y 18154 en la simulación 3, a medida que aumenta la presión del simulador y la intensidad de precipitación se ha registrado un diámetro medio de gota mayor (Fig. 42). Esto explica que los valores de energía cinética sean tan similares para las 3 simulaciones, ya que el menor número de gotas registradas en la simulación 2 y 3, es compensado por el aumento del diámetro medio de la gota a medida.

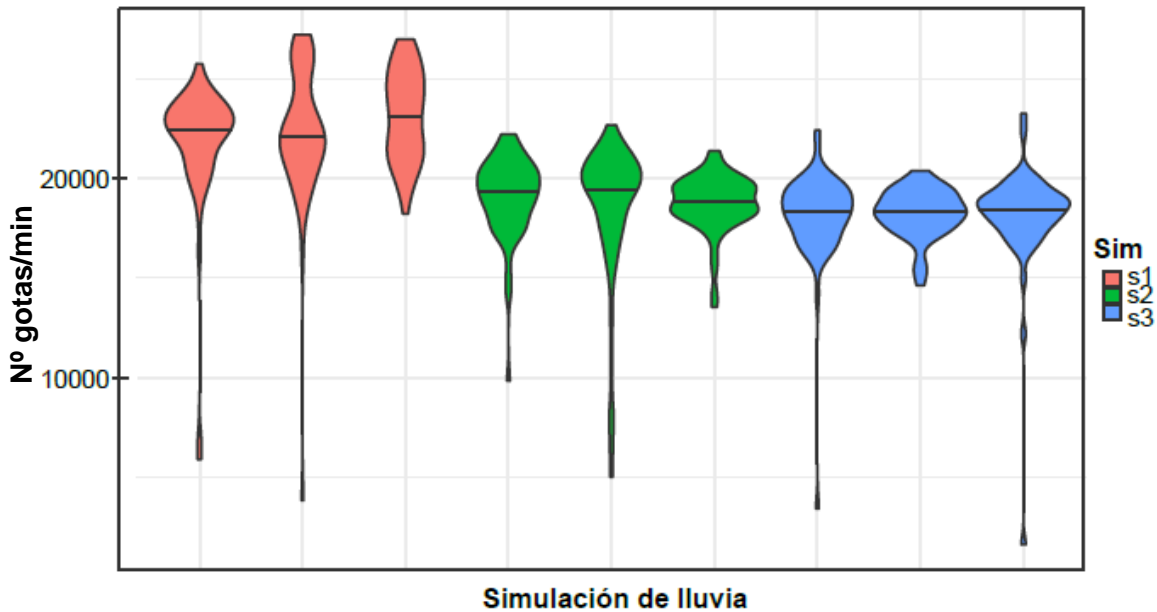


Figura 41. Muestra los valores de número de gotas de lluvia registradas por el LPM por simulación y réplica.

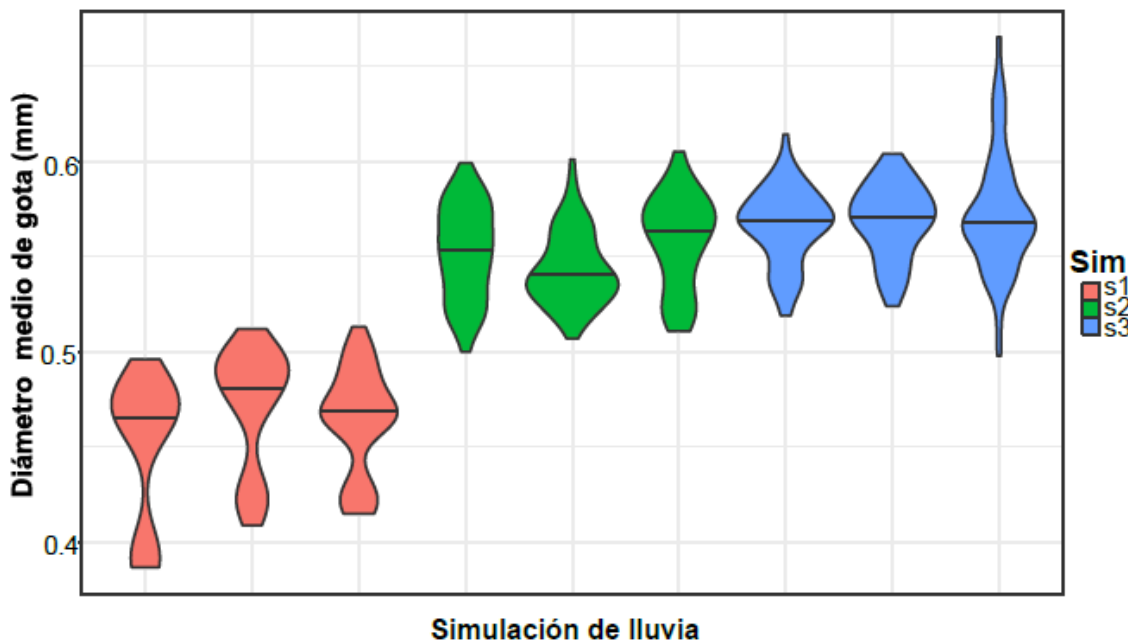


Figura 42. Muestra los valores del diámetro medio de la gota (mm) por simulación y réplica.

Los valores medios del diámetro medio de la gota son de 0,46 mm para la simulación 1 y de 0,55 y 0,57 mm para la simulación 2 y 3 respectivamente.

La boquilla utilizada en el simulador, Lechler Axial-flow full cone nozzle-460, presenta un orificio de generación de gota con un diámetro entre 1.40 - 2.10 mm que, a las distintas presiones aplicadas, ha sido capaz de pulverizar el agua en gotas que oscilan aproximadamente entre 0.20 mm y 0.9 mm. La lluvia simulada a 1 bar está constituida por una distribución de tamaños de gotas que varía entre 0.20 y 0.73 mm. A 1.6 bar varía entre 0.24 y 0.87 mm. Por último, a 2.2 bar varía entre 0.25 y 0.9 mm. Estas son las variaciones de tamaños de gota que produce el simulador en las diferentes presiones analizadas (Fig. 43). Al igual que con la intensidad se observa en los percentiles del diámetro de la gota una mayor variabilidad en los tamaños de las simulaciones 1 y 3 debido a las mayores oscilaciones encontradas en esas presiones de trabajo.

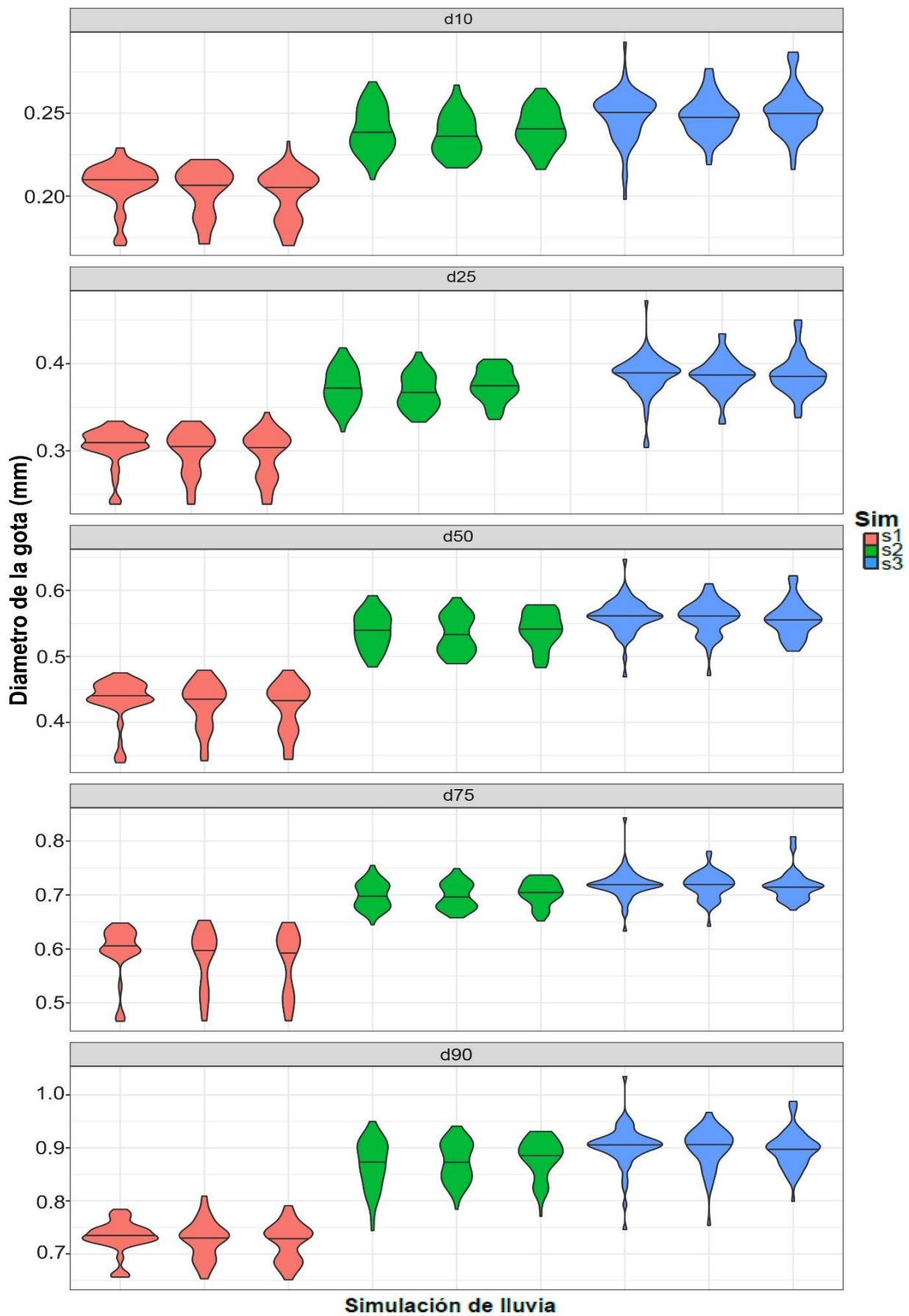


Figura 43. Muestra los valores del diámetro medio de la gota (mm) por simulación, réplica y percentiles.

La velocidad media de la gota es prácticamente la misma para las 3 simulaciones, en torno a 1.2 m s^{-1} .

La lluvia simulada a 1 bar está constituida por una velocidad media de la gota que varía entre 0.36 y 2.3 m s^{-1} . A 1.6 bar varía entre 0.27 y 2.53 m s^{-1} . Y a 2.2 bar varía entre 0.27 y 2.57 m s^{-1} . Estas son las variaciones de la velocidad media de la gota que produce el simulador en las diferentes presiones analizadas (Fig. 44).

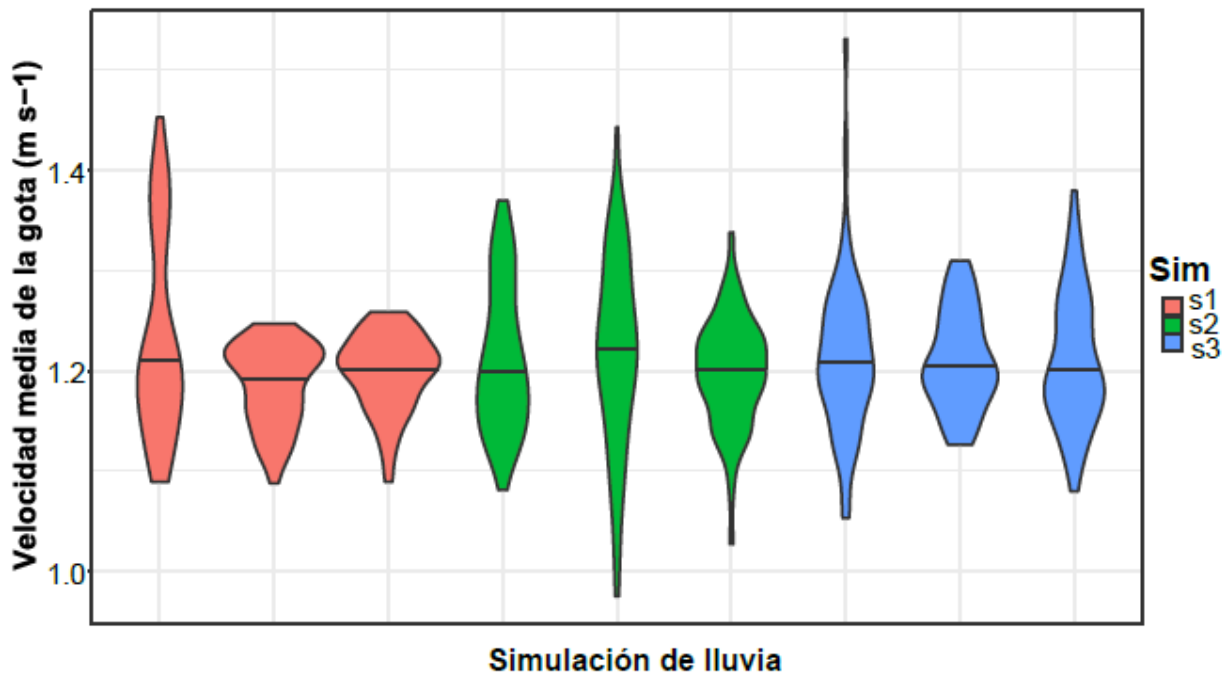


Figura 44. Muestra los valores de la velocidad media de la gota (m s^{-1}) por simulación y réplica.

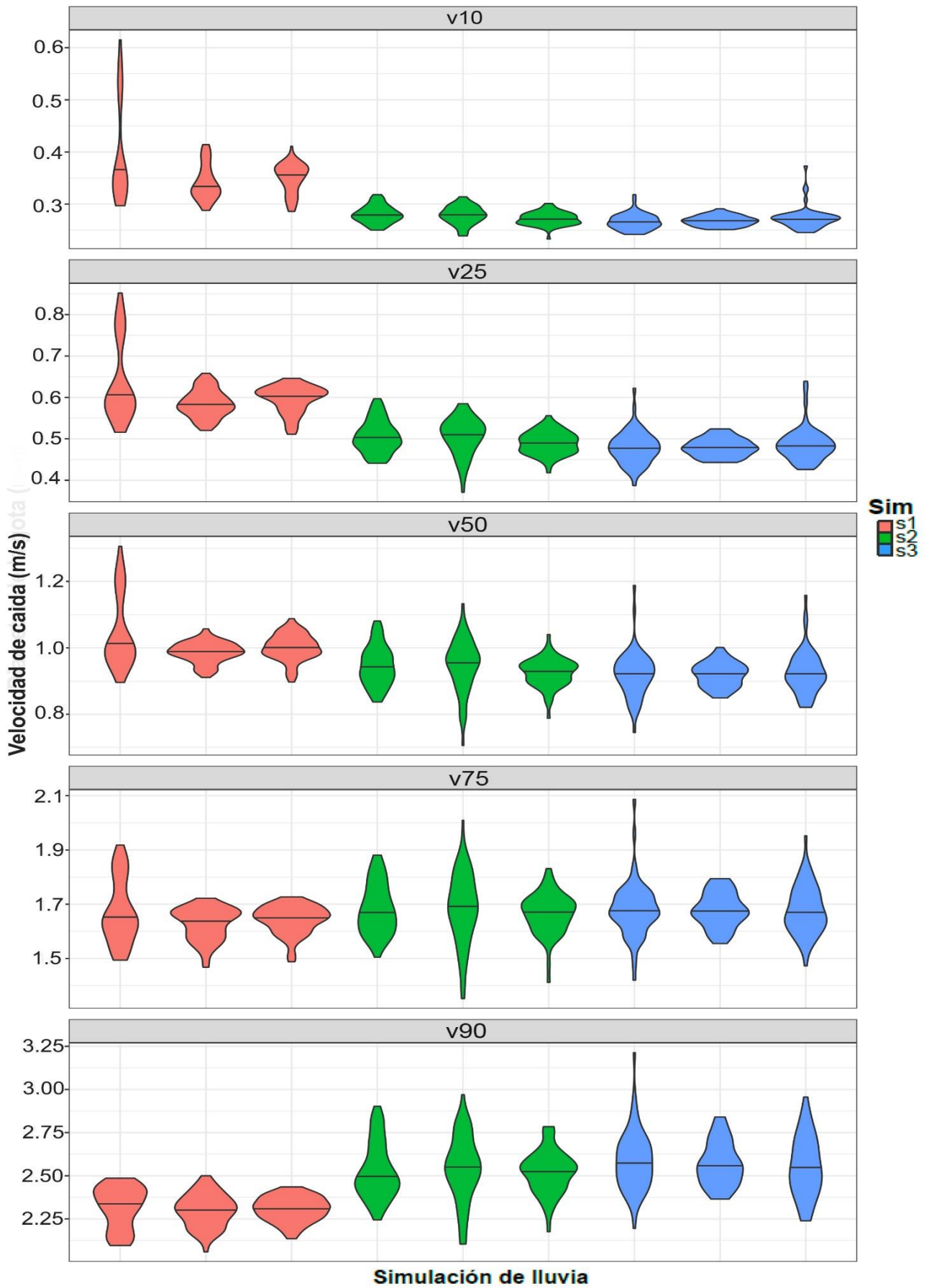


Figura 45. Muestra los valores de la velocidad media de la gota ($m s^{-1}$) por simulación, réplica y percentiles.

6.3. Caracterización de los parámetros de infiltración

Calibración transductores de presión

En este punto se exponen los resultados del experimento de calibrado de los transductores diferenciales de presión, en el que se compara la altura de agua medida visualmente y el voltaje registrado por los transductores de presión (Fig. 46).

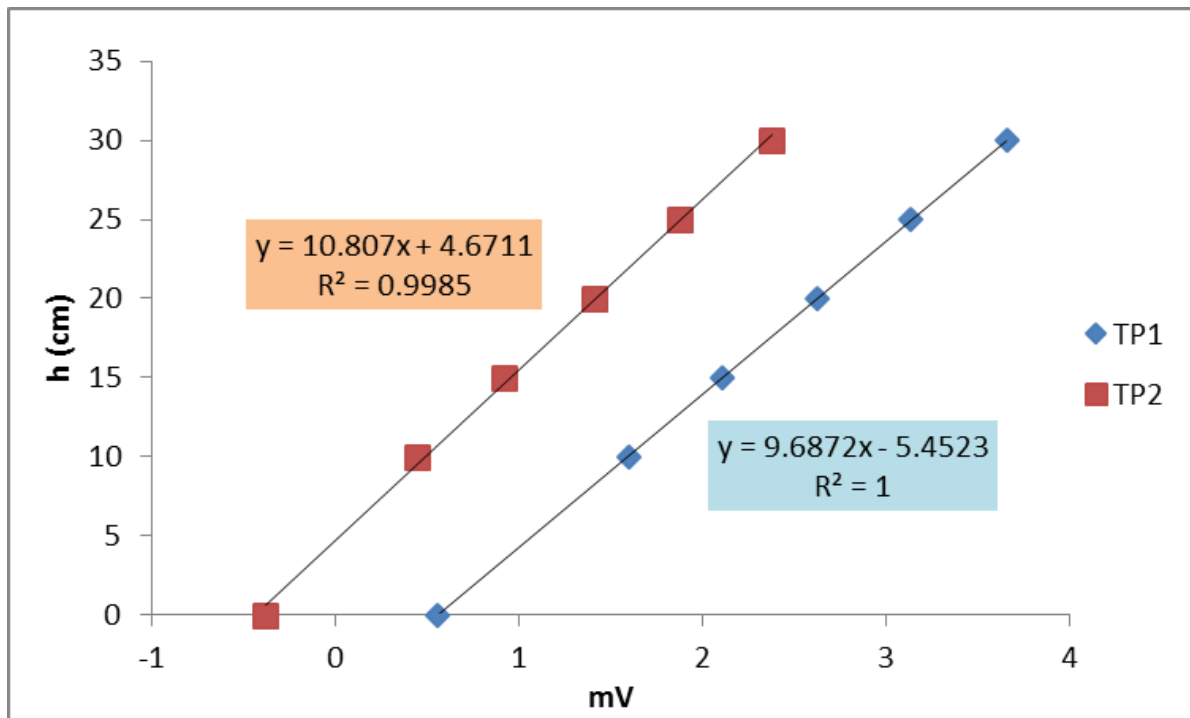


Figura 46. Relación entre la altura visual de agua y el voltaje registrado por los dos transductores de presión (TP1 y TP2) utilizados en los experimentos de campo.

Como se observa en la Figura 46, la relación entre los valores de altura visual de agua y los valores de voltaje obtenidos para los dos transductores utilizados posteriormente en los experimentos de campo es muy buena ya que sigue una función lineal con una correlación R^2 próxima a 1.

A partir de las rectas de cada uno de los transductores se calcula la altura de agua medida con los transductores de presión.

Resultados de la humedad volumétrica del suelo inicial y a saturación

A continuación se muestran los valores de humedad a saturación calculados por el método gravimétrico y a partir de la porosidad total de los suelos, necesaria para estimar las propiedades

hidráulicas del suelo, junto con la humedad inicial calculada directamente con la sonda de capacitancia Delta-T.

En cuanto a la humedad a saturación se desechó la calculada por el método gravimétrico porque los valores que se midieron eran excesivamente altos. Posiblemente esto fue debido a que al recoger la muestra del suelo, se cogió más agua que la contenida en la muestra saturada del suelo. Por lo tanto, los valores de humedad a saturación escogidos para el cálculo de las propiedades hidráulicas fueron los calculados a partir de la porosidad total.

A continuación, se presentan los datos de humedad a saturación calculados por el método gravimétrico siendo éstos más elevados que los calculados a partir de la porosidad total de cada suelo.

Tabla 11. Valores de humedad a saturación calculados por el método gravimétrico y valores de humedad a saturación calculados a partir de la porosidad total de cada suelo.

SUELO	W (Hum gravimétrica)	W (porosidad total)
CA-S1.1	0.60	0.48
CA-S1.2	0.67	0.48
CA-S1.3	0.58	0.48
CA-S2.1	0.49	0.48
CA-S2.2	0.55	0.48
CA-S2.3	0.50	0.48
CA-S3.1	0.66	0.48
CA-S3.2	0.45	0.48
CA-S3.3	0.60	0.48
CA-S4.1	0.59	0.48
CA-S4.2	0.51	0.48
CA-S4.3	0.63	0.48

SUELO	W (Hum gravimétrica)	W (porosidad total)
GY-S1.1	0.61	0.41
GY-S1.2	0.55	0.41
GY-S1.3	0.53	0.41
GY-S2.1	0.41	0.41
GY-S2.2	0.48	0.41
GY-S2.3	0.60	0.41
GY-S3.1	0.53	0.41
GY-S3.2	0.51	0.41
GY-S3.3	0.41	0.41
GY-S4.1	0.43	0.41
GY-S4.2	0.54	0.41
GY-S4.3	0.59	0.41

SUELO	W (Hum gravimétrica)	W (porosidad total)
SC-S1.1	0.48	0.48
SC-S1.2	0.55	0.48
SC-S1.3	0.61	0.48
SC-S2.1	0.61	0.48
SC-S2.2	0.57	0.48
SC-S2.3	0.54	0.48
SC-S3.1	0.57	0.48
SC-S3.2	0.55	0.48
SC-S3.3	0.63	0.48
SC-S4.1	0.56	0.48
SC-S4.2	0.44	0.48
SC-S4.3	0.58	0.48

SUELO	W (Hum gravimétrica)	W (porosidad total)
SN-S1.1	0.60	0.35
SN-S1.2	0.69	0.35
SN-S1.3	0.57	0.35
SN-S2.1	0.55	0.35
SN-S2.2	0.48	0.35
SN-S2.3	0.52	0.35
SN-S3.1	0.48	0.35
SN-S3.2	0.45	0.35
SN-S3.3	0.55	0.35
SN-S4.1	0.60	0.35
SN-S4.2	0.56	0.35
SN-S4.3	0.55	0.35

Ejemplo de cálculo de la conductividad hidráulica (k) y la sorptividad (S) a partir de la infiltración acumulada en campo

En esta imagen se muestra el programa utilizado para estimar la conductividad hidráulica y la sorptividad a partir de las curvas de infiltración acumulada en función del tiempo.

Data fitting to Haverkamp 3D model

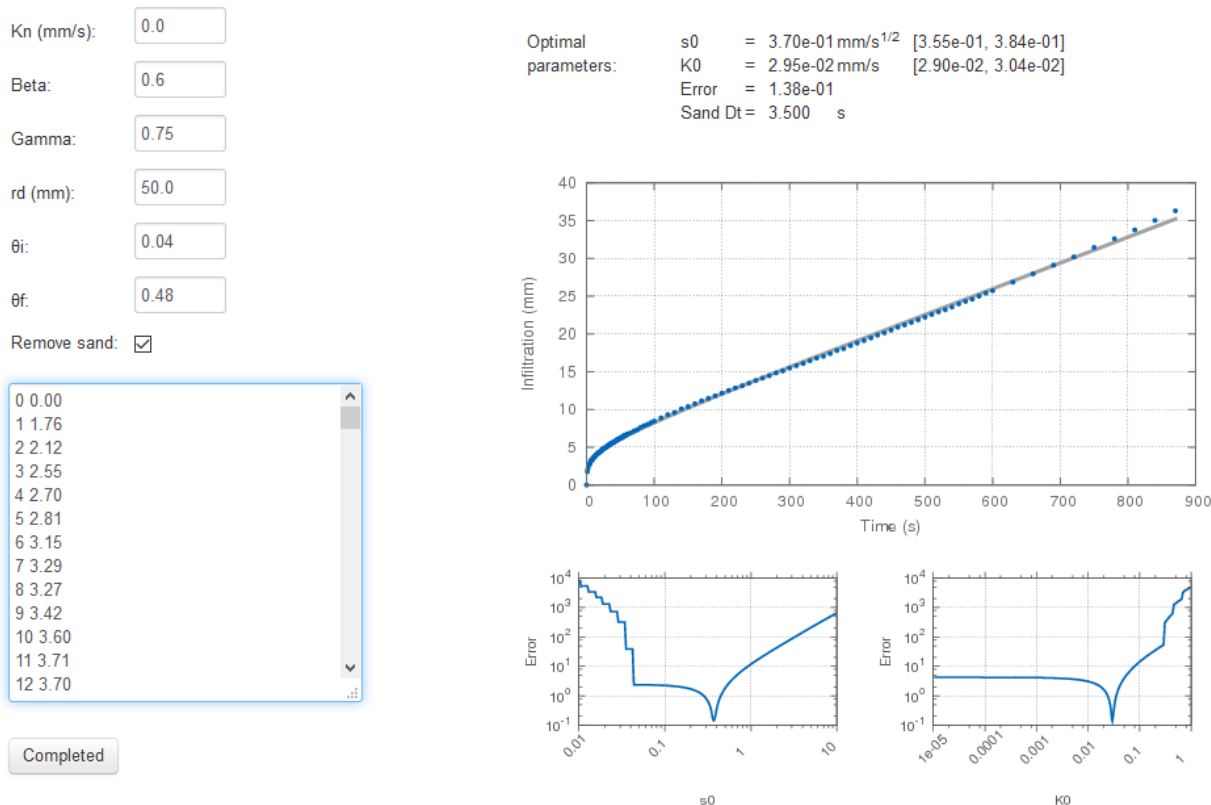


Figura 47. Ejemplo de cálculo de la conductividad hidráulica (k) y la sorptividad (S) a partir de la infiltración acumulada en campo.

En primer lugar se fijan los datos experimentales de infiltración acumulada (mm), definimos el radio inferior del infiltrómetro (50 mm), la humedad inicial y la humedad de saturación. Por último seleccionamos la opción de “Remove sand”. Esta opción elimina el efecto de la capa de arena utilizada para realizar las medidas de infiltración, y asume que el agua no se infiltra en el suelo hasta que la capa de arena está completamente saturada. Después la infiltración ocurre como si la capa de arena fuera inexistente sin impedancia de flujo ya que la arena es altamente conductora.

Una vez fijados todos los parámetros, seleccionamos la opción “completed” y te da el resultado. Te muestra la curva de infiltración con el mejor ajuste, por lo que permite seleccionar los

parámetros hidráulicos que mejor se ajusten. “Optimal parameters” te muestra los parámetros óptimos para un mejor ajuste de la mejor curva. “Mapas de sensibilidad” que te permite un menor error.

Este programa, diseñado por el informático de Aula Dei, se aplicó de forma automática en todas las curvas de infiltración de cada simulación y réplica.

Resultados conductividad hidráulica (K) y sorptividad (S)

En función del tipo de suelo se aprecia un comportamiento en los parámetros hidráulicos dependiente del mismo, en el que además, la presencia de una costra de diferente espesor relacionada con las simulaciones de lluvia, da lugar a diferencias entre los valores medidos.

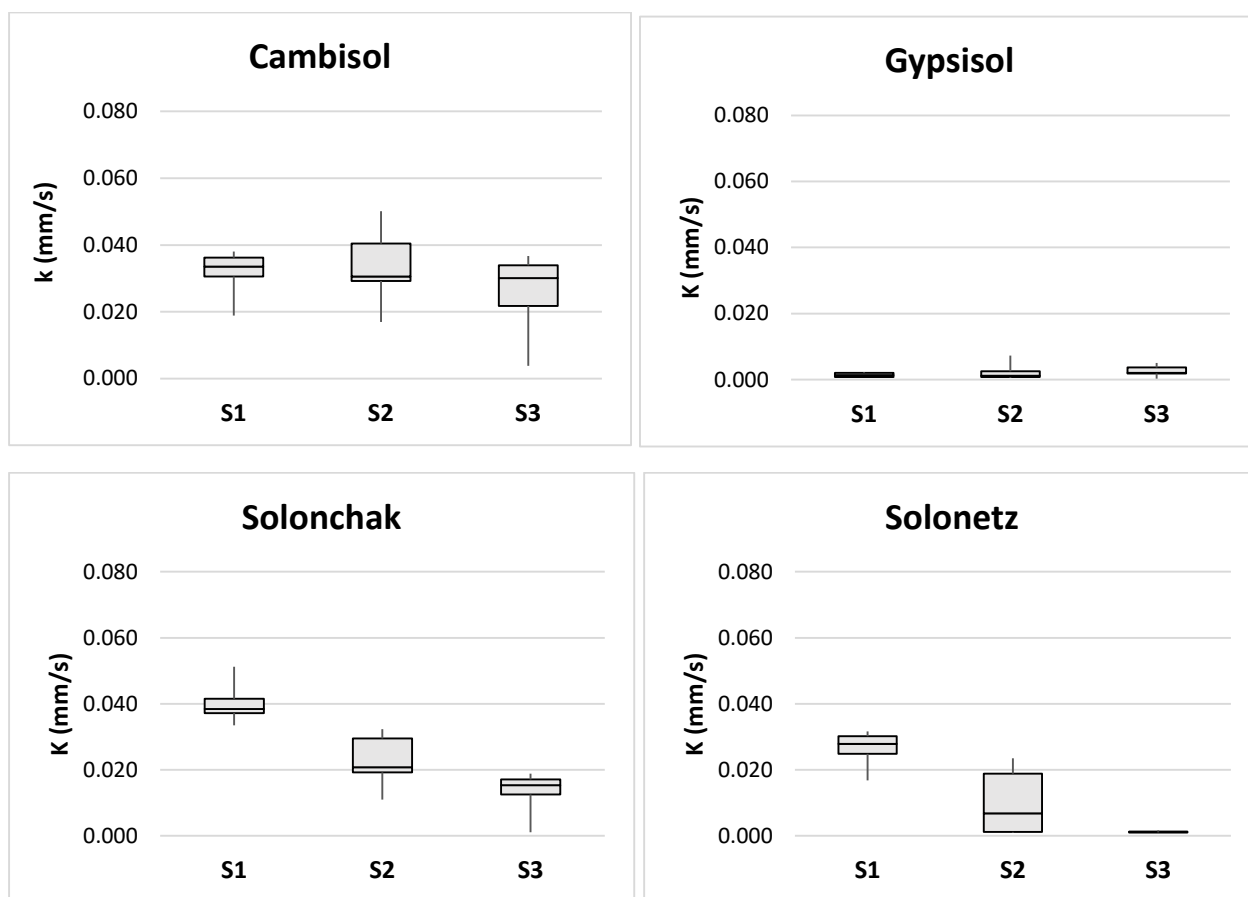


Figura 48 Gráfico que explica la evolución de la conductividad hidráulica (K) en las tres simulaciones de lluvia.

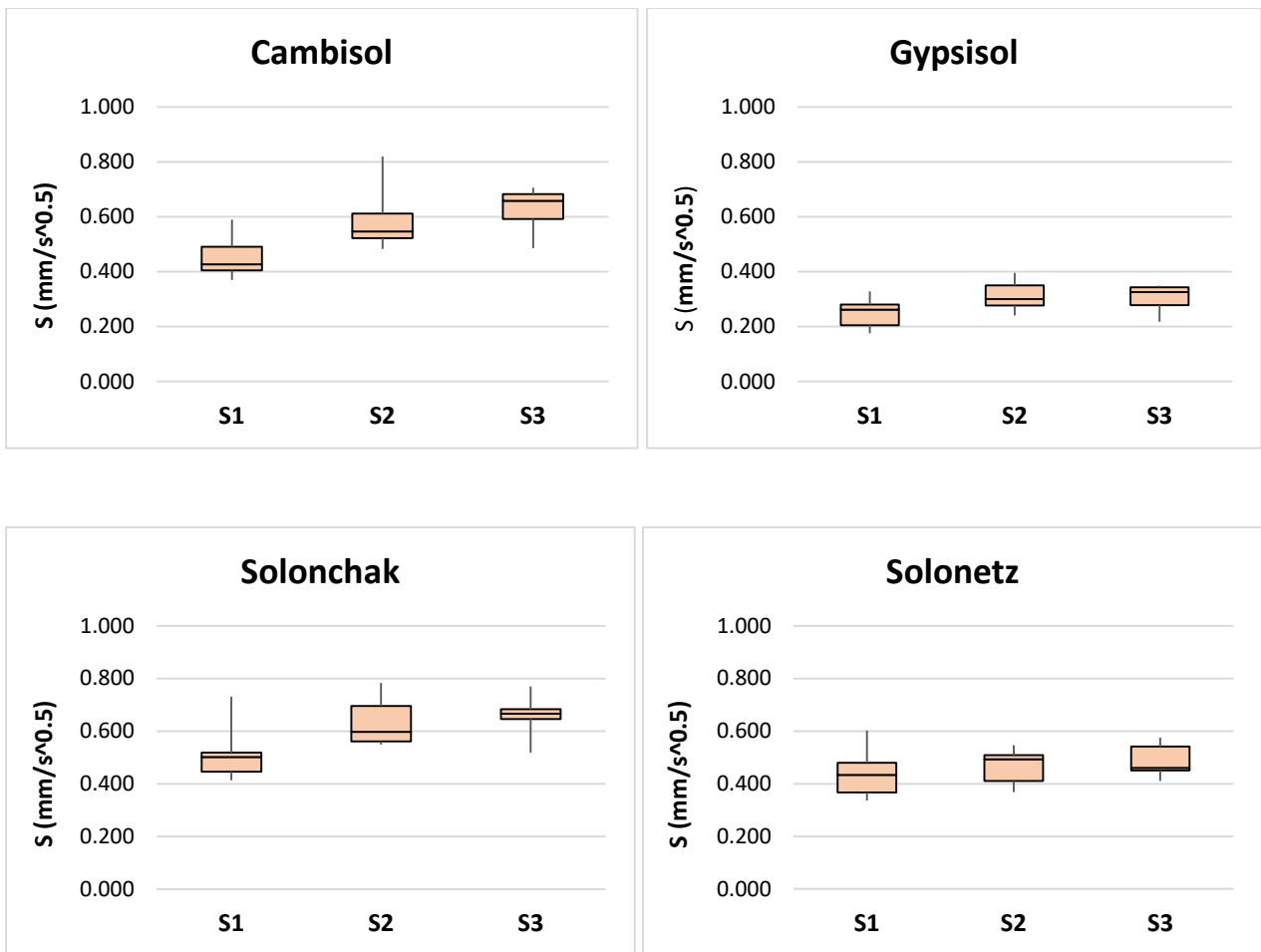


Figura 49. Gráfico que explica la evolución de la Sorptividad (S) en las tres simulaciones de lluvia.

6.4. Resultados del análisis estadístico de la relación entre lluvia simulada, costra superficial e infiltración

El modelo estadístico estudió la relación existente entre qué variables de la lluvia y de los suelos explicaban mejor la formación de costra por suelo. En cuanto a las variables de los suelos, es el tipo de suelo en su conjunto el que explica las diferencias en la formación de la costra. De entre las variables de la lluvia simulada, la variable más significativa es el diámetro mediano. El aumento en este valor en cada simulación y réplica, explica el incremento en el espesor de la costra, atestiguado por un incremento en la variación de la resistencia a la penetración (medida de la resistencia a la penetración inicial – final; Δpen). Este resultado es coherente con el proceso de destrucción de agregados por impacto de las gotas de lluvia sobre suelos secos. La Tabla 12 muestra los coeficientes resultantes del modelo que permitirían obtener un valor de resistencia a la penetración en función del diámetro mediano de un aguacero, lo que nos dará información útil sobre tasas de escorrentía, infiltración y nascencia de los cultivos en los diferentes suelos agrícolas de la cuenca del Ebro ante

los diferentes eventos de precipitación o riego por aspersión. Las ecuaciones obtenidas fueron significativas al 99% para todos los suelos excepto el Gypsisol, cuya significación fue del 95%. El modelo ofrece muy buen ajuste con un valor de r^2 de 0.92.

Tabla 12. Ecuaciones para estimar la formación de costra medida en función del incremento en la resistencia a la penetración por suelo.

Tipo de suelo	Ecuación
Cambisol	$\Delta pen = 2.72 \times d50$
Gypsisol	$\Delta pen = 3.51 \times d50$
Solonchak	$\Delta pen = 1.96 \times d50$
Solonetz	$\Delta pen = 1.98 \times d50$

Eventos de lluvia intensas ($I > 25 \text{ mm h}^{-1}$) medidos por el grupo de trabajo de Aula Dei en la zona de campo dan valores medios de $d50$ de 0.6 mm de diámetro, lo cual supondría un valor de Δpen por suelo de 1.63, 2.11, 1.18 y 1.19, para Cambisol, Gypsisol, Solonchack y Solonetz. Indicando la generación de una mayor costra en Gypsisoles. Este resultado se corresponde con lo observado en campo durante las simulaciones.

La hipótesis inicial sobre la formación de una costra está muy vinculada a factores como la textura, por lo que supone que aquellos suelos con un mayor porcentaje de tamaños finos en su granulometría, serían más proclives a la formación de costras. En este sentido, se probaron modelos basados en el porcentaje de arcilla y limo junto con el $d50$, así como otros en los que se tenía en cuenta el $d50$ y la intensidad. Estos modelos son significativos, sin embargo el coeficiente de determinación, r^2 , no mejora en exceso por lo cual se eligió el modelo más simple, basado en el $d50$ para cada tipo de suelo como el modelo más explicativo para el incremento en la resistencia a la penetración en relación con la formación de costra.

El aumento del diámetro mediano del tamaño de las gotas de lluvia explica la formación y el aumento del espesor de la costra como consecuencia de la mayor desintegración física de los agregados del suelo por el impacto de las gotas de lluvia. Por lo que los resultados indican que la formación de la costra depende más de las características de la lluvia, como es el $d50$, que de su volumen, lo cual es coherente con la importancia del splash como principal proceso responsable de la dispersión de los agregados.

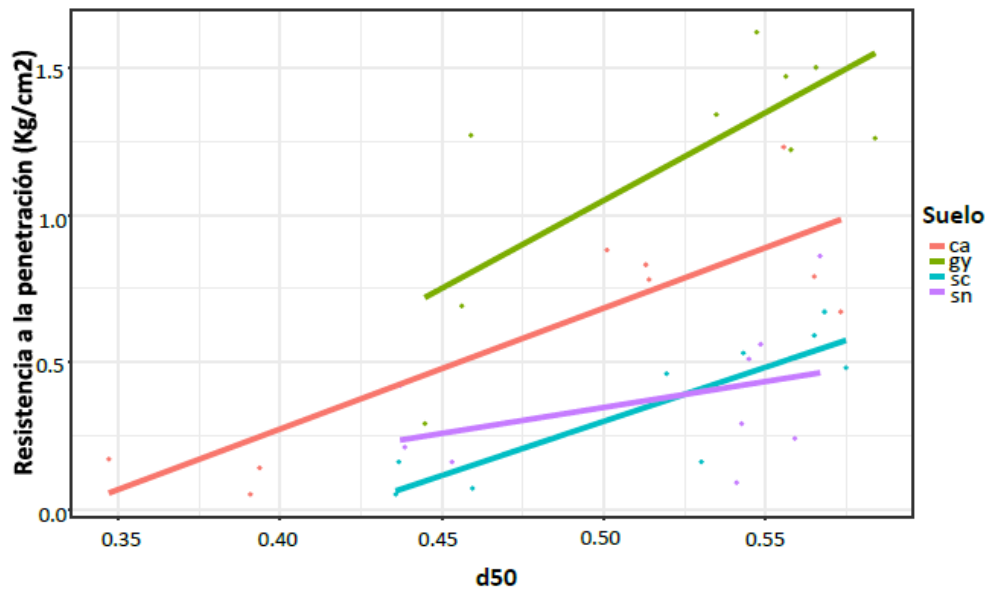


Figura 50. Gráfico que explica la relación entre el desarrollo de la costra en función de la variación en el incremento a la resistencia a la penetración, por simulación y réplica, en relación con el valor de d50 por simulación y réplica.

En el Gypsisol fué donde se encontraron los mayores incrementos en la variación de la resistencia a la penetración, con una pendiente de 0.55, ya que este tipo de suelo presenta un alto contenido de limo (45%) en el horizonte superficial, y la baja capacidad de cohesión de estos suelos genera agregados de alta susceptibilidad a la desagregación, aumentando así la densidad aparente de la costra. Seguido del Cambisol y Solonchak con una pendiente similar de 0.38 y 0.34 respectivamente. Por último el Solonetz con una pendiente de 0.17, es el que menos variación ha reflejado en cuanto al aumento de la resistencia a la penetración tras el episodio de lluvia, esto es debido no porque este suelo presente una gran resistencia a la dispersión de los agregados por el impacto de las gotas de lluvia, sino porque este suelo inicialmente era el más compactado como se muestra en la Tabla 8 y ha experimentado poca variación respecto a la penetración final. Ya que la resistencia a la penetración depende del efecto de la costra superficial del suelo, pero también de la estructura del suelo justo debajo de la costra.



Figura 51. Se muestra la costra formada en el Gypsisol para el evento de lluvia más intenso (Fuente: Elaboración propia).

El análisis de la conductividad hidráulica (K), manifiesta una mayor variabilidad entre suelos, siendo las características de cada suelo en su conjunto las responsables. En cuanto a la relación con los parámetros de la lluvia, es la influencia combinada de la intensidad y el d_{50} , lo que explica significativamente los valores de conductividad hidráulica obtenidos (Fig. 52 y Fig 53).

La formación de la costra, como ya se ha comentado anteriormente, provoca un reordenamiento de las partículas del suelo y modificación de la porosidad superficial, lo que se manifiesta en una disminución significativa en los valores de conductividad hidráulica.

Dados los cambios texturales producidos en la formación de las costras desarrolladas a distintas intensidades, los gráficos muestran como las costras más desarrolladas, por el efecto de mayores intensidades y D_{50} , alcanzan antes la saturación, con valores más bajos de conductividad hidráulica, en los suelos Solonchack y Solonetz. Cambisol muestra una evolución semejante más gradual, indicando una variación de la costra inferior en relación con la intensidad y el D_{50} . Los Gypsisoles, tienen un comportamiento bastante constante, mostrando un encharcamiento prácticamente inmediato, independiente de la costra.

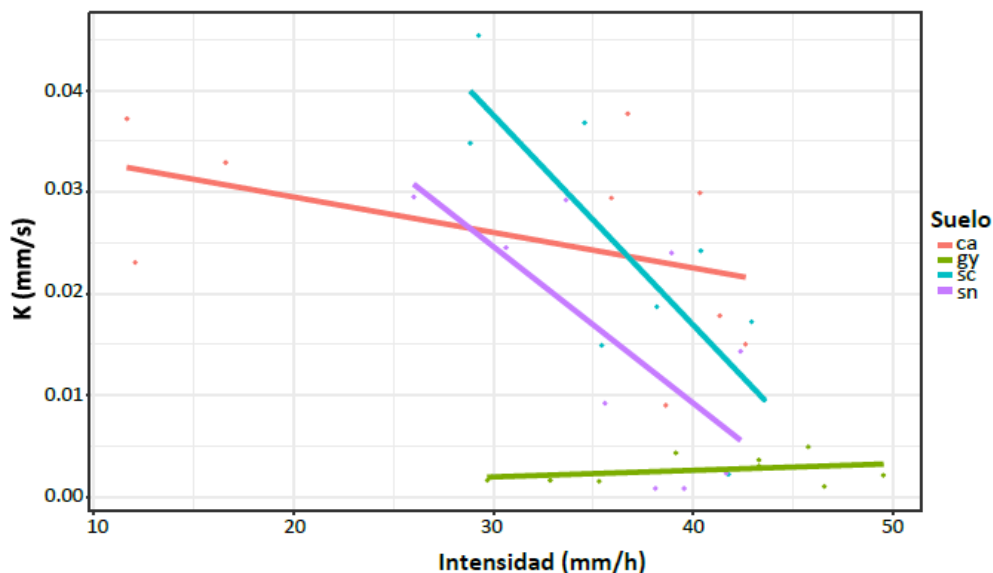


Figura 52. Gráfico que explica la relación entre el desarrollo de la costra en función de la conductividad hidráulica, por simulación y réplica, en relación con el valor de intensidad por simulación y réplica.

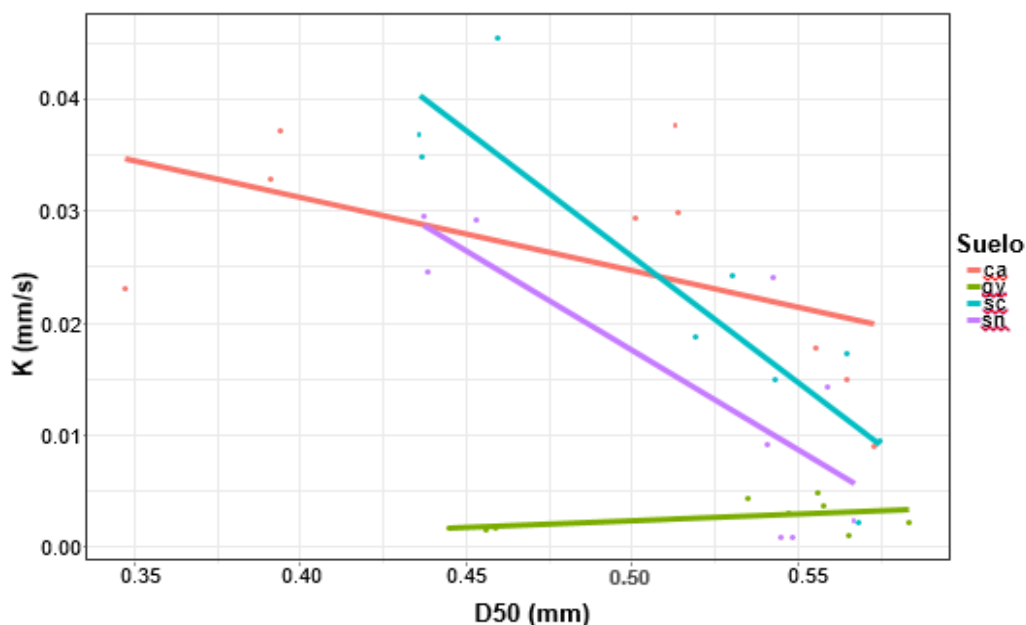


Figura 53. Gráfico que explica la relación entre el desarrollo de la costra en función de la conductividad hidráulica, por simulación y réplica, en relación con el d50.

En cuanto al factor suelo, los parámetros de infiltración están influenciados por las características físico-químicas de cada suelo, que se muestran en la Tabla 4 de material y métodos. Tanto el Cambisol, el Solonchak y el Solonetz son calcáreos, con contenidos de CO_3^{2-} del orden del 33-35 % y el Gypsisol con contenidos del 61 % de yesos. Un suelo es salino (Solonchak), y otro

salino-sódico (Solonetz) y el resto de suelos son no salinos no sódicos. Dichos suelos presentan además ciertas características desfavorables, como el predominio de limo fino (del 33 al 45 % en todos ellos) y contenidos de materia orgánica relativamente bajos. Un factor de gran influencia en la infiltración de cada suelo es la capacidad de intercambio catiónico que interviene en los procesos de floculación-dispersión de las arcillas y por consiguiente en el desarrollo de estructura y estabilidad de los agregados (Porta et al., 1999).

Los Cambisoles, son suelos que se caracterizan por presentar cationes como calcio y magnesio, que son atraídos a la superficie de las arcillas para su cohesión y formación de agregados estables, con una adecuada estructura. Por esto, la conductividad hidráulica no disminuye en exceso con el aumento de la intensidad, ya que los agregados presentan una mayor resistencia al impacto de las gotas de lluvia, y así a la formación de la costra.

El Gypsisol se caracteriza por tener un comportamiento peculiar en cuanto a su comportamiento físico-químico. Son suelos con una textura limosa y muy bajo porcentaje de materia orgánica. Se caracterizan por una composición altamente mono-mineral con un bajo contenido de minerales arcillosos que impide la agregación de partículas (Beguería et al., 2015). Esto explica los bajos valores de la conductividad hidráulica ya que son suelos que carecen de plasticidad y no se agregan convirtiéndose inestables en el agua, por lo que el espacio de poros es muy reducido al carecer de estructura.

Los elevados contenidos de sales principalmente el cloruro (Solonchak) y sodio (Solonetz) de cambio influyen en las características físicas del suelo, con una disminución de la porosidad. El mecanismo de hinchamiento de los coloides del suelo, causado por el sodio de cambio, afecta a su estructura debido al aumento del grosor de la capa de agua ligada a las partículas, haciendo que las mismas se separen entre sí, provocando la dispersión de las arcillas. Este proceso es el principal responsable de la disminución de la estabilidad estructural, lo que influye en la reducción de las tasas de infiltración y conductividad hidráulica del suelo a medida que aumenta la intensidad y así la precipitación acumulada, como se muestra en la Figura 52.

Al analizar comparativamente los valores presentados en la Figura 52 se verifica que los valores más elevados de K se corresponden con el Cambisol, lo que condice con su mayor índice de agregación y contenido de materia orgánica y su menor porcentaje de finos (Tabla 4). Es evidente que en este nivel de comparación el componente estructural juega un rol determinante en el arreglo espacial y distribución de los poros, lo que determinaría en forma directa la mayor conductividad hidráulica. En cambio, los valores más bajos de K se corresponden con el Gypsisol ya que un alto porcentaje de finos, con bajo poder de agregación reducen la distribución de los poros y así la conductividad hidráulica.

La relación entre los valores de K obtenidos y las variables intensidad de lluvia y D50, reflejan que la reestructuración textural ha resultado de la acción combinada de procesos tales como el impacto de las gotas (D50) y procesos de slaking (Intensidad).

El valor de Sorptividad (S) por suelo se explica con la intensidad. Se han estudiado todas las variables pero esta es la que mejor explica los valores de sorptividad obtenidos, sin incluir ninguna otra variable ni de la precipitación ni del suelo. Es importante resaltar como el Gypsisol no es significativo, ya que los yesos tienen un comportamiento particular en cuanto a las propiedades hidrofísicas. El resultado de este modelo (Fig. 54), que relaciona sorptividad con intensidad de la precipitación, manifiesta la importancia de los procesos de slaking en la formación de la costra.

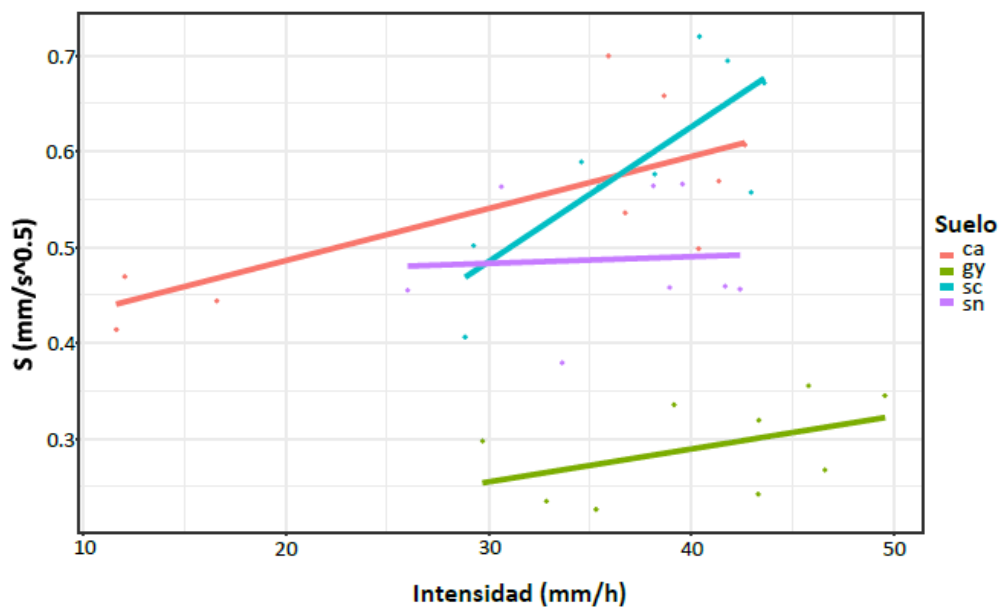


Figura 54. Gráfico que explica la relación entre el desarrollo de la costra en función de la sorptividad, por simulación y réplica, en relación con el valor de intensidad por simulación y réplica.

Según Moret-Fernández y Latorre (2017) la sorptividad puede expresarse según:

$$S^2 = \frac{(1-m)K_s}{\alpha m(\theta_s - \theta_r)} \int_{\theta_i}^{\theta_s} [\theta_s + \theta - 2\theta_i] S_e^{1/2-1/m} \left[\left(1 - S_e^{1/m}\right)^{-m} + \left(1 - S_e^{1/m}\right) - 2 \right] d\theta \quad (17)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

donde θ es la humedad volumétrica, θ_r y θ_s son la humedad residual y humedad a saturación del suelo, y α y $m = 1-1/n$ son los parámetros del modelo de van Genuchten (1980) de curva de retención de agua en el suelo, según

$$\theta(h) = \theta_r + \left[(\theta_s - \theta_r) \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \right] \quad (18)$$

donde h es el potencial matricial del suelo o fuerza con la que el suelo retiene el agua. Dicha función presenta una forma tipo

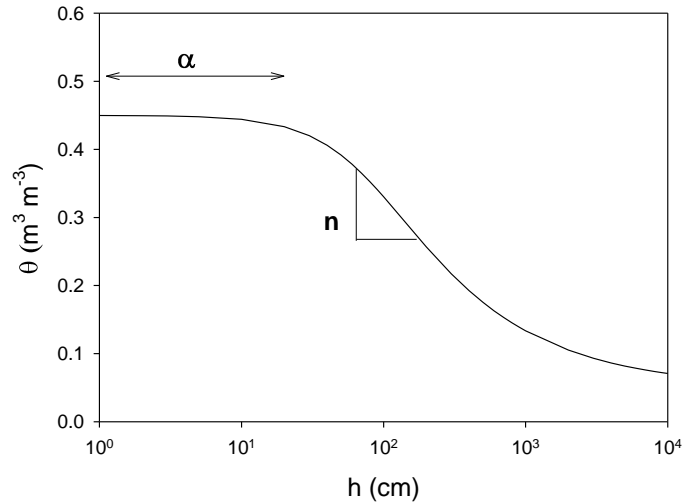


Figura 55. Ejemplo de curva de retención de agua en el suelo

El parámetro α , que define la primera parte de la curva de retención, está relacionado con la estructura del suelo. Por contra, n es un parámetro que depende principalmente de la textura del suelo y define la pendiente de la curva de retención (Fig. 55). Los valores de α oscilan entre 0.1 y 0.0001 cm^{-1} , y su valor tiende a disminuir en suelos compactados o aumentar en suelo recién labrados (Moret-Fernández et al., 2016).

Si consideramos que la textura dentro de cada uno de los suelos es un factor constante a corto-medio plazo, al agrupar los parámetros de la ecuación (17) en parámetros texturales y estructurales del suelo, obtenemos la siguiente simplificación:

$$S^2 = \frac{K_s}{\alpha(\theta_s - \theta_r)} f(n, \theta) \quad \Leftrightarrow \quad \alpha = \frac{K_s}{S^2(\theta_s - \theta_r)} f(n, \theta) \quad (19)$$

donde $f(n, \theta) = \frac{(1-m)}{m} \int_{\theta_i}^{\theta_s} [\theta_s + \theta - 2\theta_i] S_e^{1/2-1/m} \left[\left(1 - S_e^{1/m}\right)^{-m} + \left(1 - S_e^{1/m}\right) - 2 \right] d\theta$, agrupa los parámetros

que dependen de la textura del suelo.

Los resultados obtenidos en la Figura 54 reflejan, en todos los suelos, un aumento de S y una disminución de K a medida que aumenta la intensidad de lluvia. Por otro lado, observamos que al aumentar la intensidad de lluvia, aumenta el d_{50} y la resistencia a la penetración (Fig. 50), lo que implica un aumento de la densidad aparente de la costra o mayor compactación. Así pues, si al aumentar la intensidad de la lluvia, K y S disminuyen y aumentan, respectivamente, según ecuación (19) α tiene necesariamente que disminuir, lo que indica una mayor compactación del suelo o, lo que es lo mismo, un incremento de la resistencia a la penetración. Conclusión, el incremento de S y la disminución de K observado al aumentar la intensidad de la lluvia guarda relación con la curva de retención y sugiere una disminución del parámetro α .

7. CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES.

El estudio que se presenta ha permitido evaluar las relaciones entre lluvia, costra superficial e implicaciones para los parámetros de infiltración de manera conjunta, siendo éste el primer trabajo que ha abordado un estudio tan completo.

Como hecho más reseñable de este trabajo, destacar la importancia del disdrómetro óptico (Thies Clima) que permite una completa caracterización de la microfísica de lluvia simulada empleada (distribución de tamaños de gota y velocidades) y variables integradas (número de partículas, lluvia acumulada, intensidad y energía cinética).

El estudio ha estado limitado por la parte instrumental de la lluvia simulada, tanto en cuanto a la boquilla empleada como a las oscilaciones de presión del simulador. En cuanto a la boquilla utilizada (Lechler 460.608; ángulo de rociado 120°) se observó que a partir de 1.6 bares, el disdrómetro registraba un menor número de gotas de lluvia que llegan al disdrómetro, debido a la apertura del cono de aspersión a medida que aumenta la presión del simulador. Por eso a medida que aumenta la intensidad de lluvia disminuyeron los impactos de gotas y la energía cinética se mantuvo constante para las tres simulaciones. También se observó la necesidad de instalar un estabilizador de presión para disminuir la variabilidad observada debido al motor del simulador.

A pesar de estas limitaciones se ha llegado a unos resultados robustos y explicativos, válidos tanto para lluvia natural como para riego por aspersión, que describen como los suelos se comportan de forma distinta tanto en la formación de su costra como en la infiltración para distintos eventos de lluvia con distintas características.

La lluvia simulada no refleja con exactitud las propiedades de la precipitación natural, ya que generalmente el suelo está expuesto a intensas tasas de lluvia constante durante el experimento, mientras que en la naturaleza la lluvia se caracteriza por una variación de intensidad muy alta. En cambio, como en los fenómenos naturales, se ha apreciado un incremento del tamaño de gota en relación con el incremento de presión, lo cual ha supuesto la formación de costras más gruesas, dada la mayor capacidad de dispersión de partículas y rotura de agregados de gotas de mayor tamaño.

Por otro lado, los resultados han mostrado que la formación de la costra depende más de las características de la lluvia, como es el d50, que de su volumen, por la importancia del splash como principal proceso responsable de la dispersión de los agregados, si bien este resultado está condicionado por las limitaciones del experimento. En suelos como Solonetz y Solonchack, se ha observado un aumento de la dureza de la costra a medida que aumenta la intensidad y el d50, por

tanto disminuye la K y hace que facilite la escorrentía y un descenso del agua para las plantas, por efecto de la costra.

Este problema es remediable mediante distintas medidas de conservación del suelo como evitar el impacto directo de las gotas de lluvia por medio de una cubierta protectora (vegetación o *mulching*). Mejorar la estructura del horizonte superficial aportando materia orgánica. Aumentar la frecuencia de riego por aspersión para mantener la superficie del suelo húmeda o bien utilizando pulverizadores que produzcan gotas de tamaño más pequeño (pulverizadores).

8. BIBLIOGRAFÍA

- Agassi, M., Morin, J., Shainberg, I. 1985. *Effect of raindrop impact energy and water salinity on infiltration rates of sodic soils*. Soil Sci. Soc. Am. J. 49, 186-190.
- Agriculture Organization of the United Nations. Land, & Water Development Division. (1993). *Soil tillage in Africa: needs and challenges* (No. 69). Food & Agriculture Org.
- Alberto, F. y Machín, J. (1978). *Delimitación de áreas de suelos con régimen de humedad árido en la depresión media del Ebro*. Trabajos Compostelanos de Biología 6: 29-45.
- Angulo-Martinez, M., Beguería, S., Navas, A. and Machin, J. (2012). *Splash erosion under natural rainfall on three soil types in NE Spain*. Geomorphology, 175, 38-44.
- Angulo-Martínez, M. (2012). *El factor climático en la erosión del suelo: erosividad de la lluvia en la cuenca del Ebro*. PhD thesis.
- Arrúe Ugarte, J. L., Álvaro-Fuentes, J., Cantero-Martínez, C. y Plaza-Bonilla, D. (2014). *Beneficios agroambientales de la reducción del laboreo en los secanos semiáridos del valle del Ebro*.
- Aznar, J. M., Villas, D. B., & Poch, R. M. (2013). *Propiedades del suelo y relaciones micromorfológicas de suelos yesosos forestales en el Valle medio del Ebro*. Spanish Journal of Soil Science, 3(1).
- Beguería, S., Angulo-Martínez, M., Gaspar, L. and Navas, A. (2015). *Detachment of soil organic carbon by rainfall splash: Experimental assessment on three agricultural soils of Spain*. Geoderma, 245, 21-30.
- Bentley, W.A. (1904). *Studies of raindrops and raindrop phenomena*. Monthly Weather Review, 32(10), 450–456.
- Bermúdez, F. L. y Díaz, M. A. R. (1992). *Génesis y consecuencias erosivas de las lluvias de alta intensidad en la región mediterránea*. Cuadernos de Investigación Geográfica, (18), 7-28.
- Bermúdez, F.G. (1997). *Aplicación agronómica de lodos residuales a suelos en ambientes semiáridos y su efecto sobre propiedades físico-químicas*. Tesis Doctoral, Zaragoza-Lleida. 368 pp.
- Boiffin J. (1984). *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse Docteur Ingénieur, INA-PG. 320 p. + Annexes.

Brandao, V. D. S., Silva, D. D., Ruiz, H. A., Pruski, F. F., Schaefer, C., Martinez, M. A. y Silva, E. O. (2007). *Perdas de solo e caracterização física e micromorfológica de crostas formadas em solos sob chuva simulada*. Engenharia Agrícola, 27(1), 129-138.

Cabeda, M.S.V. (1984). *Degradação física e erosão*. En: *I Simpósio de manejo do solo e plantio direto no sul do Brasil e III Simpósio de conservação de solos do planalto*. Passo Fundo, RS, 1983. Anais.

Casenave, A. and Valentin, C. (1992). *A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa*. Journal of Hydrology, 130(1), 231-249.

Chamizo, S., Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y., Asensio, C. y Domingo, F. (2015). *Penetration resistance of biological soil crusts and its dynamics after crust removal: Relationships with runoff and soil detachment*. Catena, 126, 164-172.

Chamizo, S., Rodríguez-Caballero, E., Miralles-Mellado, I., Afana, A., Lázaro, R., Domingo, F. y Cantón, Y. (2010). *Características de las costras físicas y biológicas del suelo con mayor influencia sobre la infiltración y la erosión en ecosistemas semiáridos*. Pirineos, 165, 69-96.

Chen, Y., Tarchitzky, J., Brouwer, J., Morin, J. and Banin, A. (1980). *Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation*. Soil Science, 130(1), 49-55.

Christiansen, J.E., 1942. *Irrigation by Sprinkling*. California Agricultural Experiment Station Bulletin 670.

Clapp R.B. and Homberger G.M. (1978). *Empirical equations for some soil hydraulic properties*. Water Resources Res. 14: 601.

Dalla Rosa, J., Cooper, M., Darboux, F., Medeiros, J. C. y Medeiros, J. (2013). *Processo de formação de crostas superficiais em razão de sistemas de preparo do solo e chuva simulada*. R Bras Ci Solo, 37, 400-10.

Darboux, F., Dalla Rosa, J. and Cooper, M. (2016). *Conditions for the Occurrence of Slaking and Other Disaggregation Processes under Rainfall*. Hydrology, 3(3), 27.

De Luna, E., Laguna, A., Giráldez, J.V. (2000). *The role of olive trees in rainfall erosivity and runoff and sediment yield in the soil beneath*. Hydrology and Earth System Sciences, 4(1), 141-153.

- Dobrzanski, B., Witkowska B. and Walczak, R. (1975). *Soil-aggregation and water-stability index*. Polish Journal of Soil Science 8: 3-8.
- Dunkerley, D. (2008). *Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting*. Hydrological Processes 22, 4415–4435.
- Edward J. (2000). *La ciencia del suelo y su manejo*. Madrid: Paraninfo.
- Eldridge, D.J. and Greene, R.S.B. (1994). *Assessment of sediment yield by splash erosion on a semi-arid soil with varying cryptogam cover*. Journal of Arid Environments, 26 (3): 221-232.
- Eldridge, D.J. and Kinnell, P.I.A. (1997). *Assessment of erosion rates from microphyte dominated calcareous soils under rain-impacted flow*. Australian Journal of Soil Research, 35 (3): 475-489.
- FAO. (1989). *Mapa mundial de suelos*. Leyenda revisada: Informes sobre recursos mundiales de suelos, 60. Roma.
- Font, I. (1983). *Climatología de España y Portugal*. Instituto Nacional de meteorología. Madrid
- Giasson, E. (2000). *Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos: Efecto de la labranza sobre las características físicas del suelo*. FAO, Roma, 53-57.
- Gicheru, P., Gachene, C., Mbuvi, J. and Mare, E. (2004). *Effects of soil management practices and tillage systems on surface soil water conservation and crust formation on a sandy loam in semi-arid Kenya*. Soil and Tillage Research, 75(2), 173-184.
- Guerrero, J., Alberto, F., Hodgson, J., García-Ruiz, J.M., Montserrat, G. (1999). *Plant community patterns in a gypsum area of NE Spain*. 1. Interactions with topographic factors and soil erosion. Journal of Arid Environments 41, 401–410.
- Gilley, J. E., & Finker, S. C. (1985). *Estimating soil detachment caused by raindrop impact*. Transactions of the ASAE, 28(1), 140-0146.
- Haverkamp, R., Parlange, J.Y., Starr, J.L., Schmitz, G., Fuentes, C. (1990). *Infiltration under ponded conditions: 3. A predictive equation based on physical parameters*. Soil Sci. 149, 292–300.
- Hudson, N.W. (1995). *Soil Conservation*. Third Edition. Batsford. London 304 pp.

- ICONA (1978). *Mapas de estados erosivos*. Cuenca del Ebro. Servicios de publicaciones. MAPA. Madrid.
- Iserloh, T., Ries, J. B., Arnáez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerdà, A., ... & Gómez, J. A. (2013). *European small portable rainfall simulators: a comparison of rainfall characteristics*. *Catena*, 110, 100-112.
- Kemper, W. D. and Rosenau R. C. (1986). *Aggregate stability and size distribution*. P. 435-442. In: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1, Agronomy No. 9*, ASA, Madison, WI.
- Kohnke, H. (1968). *Soil Physics*. McGraw Hill, New York. 224 p.
- Lado, M., Paz, A. and Ben-Hur, M. (2004). *Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation, and soil loss*. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 935-942.
- Lampurlanés, J., Cantero-Martínez, C. (2002). *Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationships with barley rooy growth*. *Agronomie* 95, 526-536.
- Latorre, B., Peña, C., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., & Moret-Fernández, D. (2015). *Estimate of soil hydraulic properties from disc infiltrometer three-dimensional infiltration curve. Numerical analysis and field application*. *Journal of Hydrology*, 527, 1-12.
- Legout, C., Leguedois, S., & Le Bissonnais, Y. (2005). *Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements*. *European Journal of Soil Science*, 56(2), 225-238.
- López, M.V. (1993). *Respuesta del suelo y de un cultivo de cebada al laboreo de conservación en agrosistemas de secano de Aragón*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, Universidad de Navarra.
- Lozano, J., Mendoza A.J. (2006). *Caracterización, degradación y uso de los suelos con un fin: el desarrollo sostenible*. En D. Armando Martínez Raya y D. Ramón Francia, *Degradación de suelos. Erosión hídrica en ambientes agrícolas*. Almería: Universidad de Almería.
- Machín, J. and Navas, A. (1998). *Spatial analysis of gypsiferous soils in the Zaragoza province (Spain), using GIS as an aid to conservation*. *Geoderma* 87, 57–66.
- Moret, D. and Arrúe, J.L. (2007). *Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage*. *Soil Till. Res.* 96, 103–113.

- Morin, J., Benyamini, Y. & Michaeli, A. *The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile*. Journal of Hydrology 52, 321–335 (1981).
- Moret-Fernández, D., Peña-Sancho, C., López, M.V. 2016. *Influence of the wetting process on estimation of the waterretention curve of tilled soils*. Soil Res.
- Moret-Fernández, D., Latorre, B. 2017. *Estimate of the soil water retention curve from the sorptivity and β parameter calculated from an upward infiltration experiment*. Journal of Hydrology.
- Mutchler, C.K. (1971). *Splash droplet production by water drop impact*. Water Resource Research, 7, 1024-1030.
- Nadal-Romero, E. and Regüés, D. (2009). *Detachment and infiltration variations as consequence of regolith development in a Pyrenean badland system*. Earth Surface Processes and Landforms, 34(6), 824-838.
- Navas Izquierdo, A., y Machín Gayarre, J. (1997). *Capacidad de uso de los suelos del Campo de Zaragoza*. Afecciones antrópicas y riesgos de desertificación.
- Ndiaye, B., Esteves, M., Vandervaere, J. P., Lapetite, J. M. and Vauclin, M. (2005). *Effect of rainfall and tillage direction on the evolution of surface crusts, soil hydraulic properties and runoff generation for a sandy loam soil*. Journal of hydrology, 307(1), 294-311.
- Perroux, K.M., White, I. (1988). *Designs for disc permeameters*. Soil Sci. Soc. Am. J. 52, 1205–1215.
- Philip, J.R. (1957). *The theory of infiltration*. 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Science. 84: 257-264.
- Poch, R. M., Jacovella, L. y Usón, A. (1997). *Micromorfología de costras superficiales en suelos de viña en el Anoia-Penedès: implicaciones en el manejo de suelos*. Edafología, 2.
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero de Laburu, C., (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones mundi-prensa, Madrid. 849 pp.
- Prats, J.C. (1999). *El clima de Aragón*.
- Prosdocimi, M., Tarolli, P. and Cerdà, A. (2016). *Mulching practices for reducing soil water erosion: A review*. Earth-Science Reviews, 161, 191-203.

Pueyo, Y., Alados, C.L., Maestro, M., Komac, B. (2007). *Gypsophile vegetation patterns under a range of soil properties induced by topographical position*. Plant Ecology 189, 301–311.

Quiñones-Vera, J. J., Castellanos-Pérez, E., Valencia-Castro, C. M., Martínez-Ríos, J. J., Sánchez-Olvera, T. y Montes-González, C. A. (2009). Efecto de la costra biológica sobre la infiltración de agua en un pastizal. Terra Latinoamericana, 27(4), 287-293.

Regüés, D. y Torri, D. (2002). *Efecto de la energía cinética de la lluvia sobre la dinámica de las propiedades físicas y el encostramiento en un suelo arcilloso sin vegetación*. Cuaternario y geomorfología: Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario, 16(1), 57-71.

Reichardt, K., Timm, L. C., Bacchi, O. O. S., Oliveira, J. C. M. and Dourado-Neto, D. (2004). *A parameterised equation to estimate soil hydraulic conductivity in the field*. Soil Research, 42(3), 283-287.

Roldan Soriano, M. (2006). *El poder de la lluvia. Características de la lluvia y erosividad. Nueva formulación para la estimación de la erosividad. Aplicación al cálculo del factor R de la USLE*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid 125 pág.

Romero, M. E. N., Regüés, D., Sanchís, P. S. y Torri, D. (2009). *La estabilidad de los agregados del suelo en ambientes forestales y acarcavados del Pirineo Central*. Cuaternario y geomorfología: Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario, 23(1), 49-64.

Smettem, K.R.J., Parlange, J.Y., Ross, P.J. and Haverkamp, R. (1994). *Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer*. Part 1. A capillary-based theory. Water Resour. Res. 30, 2925–2929.

Van Genuchten, M.T. 1980. *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal 44, 892– 898.

VV.AA. 2007. *Atlas climático de Aragón*. 222 pp. Gobierno de Aragón. (2007).

VV.AA. 2015. *Superficies y rendimientos de cultivos*. Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. Gobierno de España.

Weber, B., Olehowski, C., Knerr, T., Hill, J., Deutschewitz, K., Wessels, D. C. J. and Büdel, B. (2008). *A new approach for mapping of biological soil crusts in semidesert areas with hyperspectral imagery*. Remote Sensing of Environment, 112(5), 2187-2201.

Weill, A.N., Kimpe, C.R. and Mckyes, E. (1988). *Effect of tillage reduction and fertilizer on soil macro-and microaggregation*. Canadian Journal of Soil Science 68: 489-500.

Youker, R.E. and McGuinness J.L. (1956). *A short method of obtaining mean weight-diameter values of aggregate analyses of soils*. Soil Science 83: 291-294.

Youngs, E.G. (1991). *Hydraulic Conductivity of saturated soils*.