

60421 TRABAJO FIN DE MÁSTER

**UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE TRATAMIENTO DE
IMÁGENES LANDSAT EN ENTORNO SIG PARA GESTIÓN DE
ESPACIOS PROTEGIDOS: APLICACIÓN AL ÁMBITO DE LA
LAGUNA DE GALLOCANTA**

Autor: Azucena Jiménez Castañeda

***Profesor: Carmen Castañeda del Álamo (EEAD-CSIC)
Raquel Montorio Lloveria***

Máster Universitario en

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del
territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

4 de Diciembre de 2014



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

Los estudios multitemporales permiten el seguimiento de fenómenos dinámicos, cuyo conocimiento es necesario para mejorar la gestión de los espacios protegidos de ecosistemas tan vulnerables como el entorno de la Laguna de Gallocanta. El desarrollo de programas semiautomáticos de pretratamiento, homogeneización de la información y obtención de índices ambientales como el NDVI y TTC de humedad permite agilizar estos procesos. Centrando los esfuerzos en comprender los resultados y relacionarlos con información auxiliar y datos in situ disponibles, puede ser de gran ayuda en futuros estudios.

Palabras clave: agricultura, humedal, Landsat, multitemporal, programa, seco

Abstract

The multitemporal studies allow the monitoring of the dynamic phenomena, whose knowledge is needed to improve the management of specific protected areas of ecosystems which are as vulnerable as the environment of Gallocanta lagoon. The development of semiautomatic programs, which are intended to cope with: both the pre-treatment and the standardization of the information and also with the obtention of certain environmental index, such as the NDVI and the humidity band of TTC helps to speed up the above mentioned processes. Focusing on understanding the results, and correlating them with both the available on-site data and the auxiliary information, could be helpful for future studies.

Keywords: agriculture, wetland, Landsat, multitemporal, program, rainfed

ÍNDICE

PREÁMBULO	pág. 5
AGRADECIMIENTOS	pág.6
1. INTRODUCCIÓN.....	pág.7
2. OBJETIVOS	pág.8
3. FISIOGRAFÍA, GEOLOGÍA Y CLIMA.....	pág.9
4. LA GESTIÓN DEL TERRITORIO	pág.11
4.1. Conservación de humedales salinos	pág.11
4.2. Uso agrícola	pág.18
5. MATERIALES Y PROGRAMAS EMPLEADOS	pág.23
5.1 Materiales	pág.23
5.1.1. Imágenes de satélite	pág.23
5.1.2. Datos meteorológicos	pág.23
5.1.3. Datos agrícolas.....	pág.24
5.1.4. Información territorial complementaria	pág.24
5.2. Programas	pág.25
6. METODOLOGÍA	pág.26
6.1. Selección de imágenes de satélite	pág.26
6.1.1. Fenología del cultivo.....	pág.26
6.1.2. Años secos y húmedos.....	pág.27
6.2. Tratamiento de imágenes Landsat	pág.29
6.2.1 Subprograma 1: Pretratamiento (PTR)	pág.30
6.2.2. Subprograma 2: homogeneización (HOMO)	pág.33
6.2.3. Subprograma 3: Generación de Índices Ambientales (GINA)	pág.38
6.3. Generación de cartografía temática.....	pág.39
6.3.1. Mapas agrícolas	pág.39
6.3.2. Mapas de vigor vegetal y de humedad	pág.39
7. RESULTADOS	pág.41
7.1. Ocupación del suelo: producto declarado SIGPAC 2013.....	pág.41
7.2. Ocupación del cultivo dentro de la Reserva Natural Dirigida de la laguna de Gallocanta.....	pág.43
7.3 Las medidas agroambientales	pág.44
8. Análisis de la información extraída de las imágenes	pág.50

8.1. Diferencias de NDVI entre municipios y entre fechas	pág.51
8.2. Diferencias de la variable Humedad de TTC entre fechas y municipios	pág.54
9. Conclusiones	pág.56
10. BIBLIOGRAFÍA	pág.57
11. Anejos	pág.60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Climograma elaborado con datos de la estación meteorológica de Tornos.....	pág.10
Figura 2. Paisaje agrícola en mosaico en el entorno de la laguna de Gallocanta	pág.18
Figura 3. Grullas común (<i>Grus grus</i>) en los campos que rodean la laguna Gallocanta.	pág.20
Figura 4. Parcela en retirada de cultivo, donde aún se aprecian señales del uso agrícola, especialmente la vegetación.	pág.21
Figura 5. Parcelas en retirada de cultivo colonizada por vegetación natural.	pág.21
Figura 6. Ejemplo de arbolado no productivo.....	22
Figura 7. Esquema de las firmas espectrales de la vegetación, suelo y agua.	pág.27
Figura 8. Esquema de la metodología empleada para el desarrollo del TFM: a) esquema general; b) esquema específico de la programación.	pág.29
Figura 9. Recorte de la escena completa y obtención de la zona de estudio.....	pág 37
Figura 10. Porcentaje de los productos agrícolas declarados en el conjunto de los municipios (SIGPAC 2013)	pág.41
Figura 11. Porcentaje de cultivos por municipio respecto a la superficie municipal	pág.43
Figura 12. Porcentaje de los cultivos declarados dentro de la Reserva Natural Dirigida de la laguna de Gallocanta	pág.44
Figura 13. Diagrama de cajas con los valores de NDVI obtenidos para cada municipio en 2001.....	pág.51
Figura 14. Diagrama de cajas con los valores de NDVI obtenidos para cada municipio en 2010.....	pág.52
Figura 15. NDVI en el municipio de Tornos (arriba) y Gallocanta (abajo) en las fechas de primavera analizadas.....	pág.53
Figura 16. Variable Humedad obtenida para cada municipio a partir de la transformación Tasseled Cap de octubre de 1984 (arriba) y octubre de 2009 (abajo).....	pág.55

PREÁMBULO

La presente memoria corresponde al Trabajo Fin de Master en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, impartido en la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Zaragoza.

El estudio se ha desarrollado, bajo la dirección y supervisión de la Dra. Carmen Castañeda del Álamo, en el Departamento de Suelo y Agua de la Estación Experimental de Aula Dei del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), en Zaragoza.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a mi tutora Dra. Carmen Castañeda del Álamo, por brindarme esta gran oportunidad, por su paciencia y ayuda incondicional. Sin ella esta labor no hubiera sido posible.

Al Dr. Borja la Torre, por animarme y mostrarme las posibilidades que ofrece el mundo de la programación.

A la Dra. Estela Luna, por facilitarme y ayudarme con sus datos.

Al Dr. Jorge Álvaro, por su ánimo y simpatía.

Al Dr. Juan Herrero Isern, por suscitar mi curiosidad.

A todos mis compañeros de Aula Dei, han hecho que mi estancia sea inmejorable. Y al apoyo incondicional de Enzo, mi pareja.

1. INTRODUCCIÓN

La laguna de Gallocanta y su entorno constituye un ecosistema único en Europa occidental y uno de los más importantes de la Península Ibérica. Los estudios sobre su singularidad y las labores acometidas por las diversas Administraciones han llevado a calificarla como Lugar de Importancia Comunitaria, a incluirla como Zona Especial de Conservación en la red ecológica europea (Red Natura 2000) y a declararla Reserva Natural Dirigida dentro del Plan de Ordenación de los Recursos Naturales (PORN).

Las aves esteparias, especies de especial interés para su conservación en Europa y globalmente, constituyen uno de los principales atractivos para muchos visitantes de la laguna. La principal amenaza para este grupo de aves es la transformación creciente de su hábitat: las zonas esteparias y las zonas agrícolas de secano tradicional, están siendo sustituidas por zonas de regadío o secanos cada vez más humanizados, aumentando el uso de fitosanitarios, maquinaria agrícola, explotación intensiva de los acuíferos, etc.

El estudio de la dinámica espacio-temporal de la humedad del suelo en los ambientes agrícolas de secano es esencial para mejorar el conocimiento de la dinámica hídrica de la laguna y su relación con los cultivos en zonas encharcables o salinas próximas a la laguna. La posibilidad de cartografiar en distintas épocas del año este tipo de ambientes supondría un avance clave en la disponibilidad de información ambiental aplicada al estudio de cambios en los patrones de humedad de este ambiente agrícola de secano.

Las imágenes de resolución media de Landsat ofrecen información directa e indirecta sobre el estado y la distribución de la humedad y otras características del suelo. La información espectral que ofrece Landsat refleja el estado de la superficie del terreno o de sus coberturas y no del suelo en profundidad. Sin embargo, la información indirecta a través de, por ejemplo, diversos índices obtenidos mediante los valores de reflectancia de sus bandas. Así, el índice de vegetación normalizada (NDVI) calculado a partir de imágenes de primavera proporciona información del desarrollo del cultivo en el momento de máximo vigor vegetativo del cereal de secano; o la variable Humedad de la transformación Tasseled Cap (TTC) calculada a partir de imágenes de otoño donde el suelo agrícola está desnudo, que permite evaluar el estado de humedad del suelo y relacionarlo con características intrínsecas del territorio, fisiográficas, geológicas, edáficas u otras.

En este contexto, las imágenes Landsat son útiles para identificar la distribución de la humedad áreas de secano con una marcada dinámica temporal. Sus ventajas son el aportar información sincrónica de superficies muy superiores a las abarcables con trabajo de campo y con un esfuerzo menor. Como es obvio, sería conveniente disponer de datos de humedad tomados en campo, en especial los días de adquisición de las imágenes. Ello permitiría calibrar los datos satelitales y establecer modelos de funcionamiento a escalas territoriales adecuadas para la gestión.

El disponer gratuitamente del archivo histórico de imágenes comparables de la familia Landsat, proporciona gran cantidad de información de la zona de estudio. El manejo de esta información, desde la descarga, corrección radiométrica y obtención de variables físicas de interés, constituye un trabajo muy laborioso. Ello ha motivado la creación de una serie de programas que, semiautomáticamente descargan las imágenes, corrigen su radiometría y obtienen productos derivados.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología basada en el tratamiento semiautomático de imágenes de satélite que facilite la obtención de índices de interés ambiental de forma rutinaria y aplicable a la gestión del territorio. Con ello se trata de caracterizar el medio agrícola en el entorno de la Laguna de Gallocanta, humedal protegido con normativas específicas desde el punto de vista agrícola y ambiental. Como herramienta de gestión a largo plazo del territorio, la metodología exige la integración de datos satelitales con datos agrícolas declarados e información complementaria del territorio.

3. FISIOGRAFÍA, GEOLOGÍA Y CLIMA

La laguna de Gallocanta se localiza en una depresión Cuaternaria de unos 550 km², en el sector central del sistema Ibérico, a una altitud media de 1000 m s.n.m. El relieve inicial de la Cordillera Ibérica fue construido por la compresión alpina durante el Paleógeno, configurándose las estructuras dominantes de dirección NO-SE. Durante este periodo la cordillera alcanzó la mayor altitud. Los procesos de neotectónica, y el desmantelamiento del macizo y posterior sedimentación ocurridos durante el Neógeno y Cuaternario confeccionaron el relieve actual de la Cordillera Ibérica.

La depresión de Gallocanta proviene de un polje creado durante el Pleistoceno y desarrollado durante el Cuaternario (Gracia, 1995; 2014). La disolución por escorrentía y colapso de las estructuras internas del polje finalizó cuando los materiales Triásicos afloraron. Estos materiales más insolubles (facies Keuper) crearon el sustrato impermeable que favoreció la acumulación de agua dando lugar al germen de diferentes lagunas, algunas colmatadas, dependiendo de su tamaño.

Los rasgos geomorfológicos del entorno de la Laguna de Gallocanta presentan evidencias de que su tamaño fue mucho mayor en el pasado (Gracia, 2014; Castañeda et al., 2015). Así, lo denotan los diferentes niveles de terrazas, especialmente desarrollados en su margen SO; las formas litorales asociadas al agua y al viento predominante del NO como playas, deltas, pequeños acantilados decimétricos, barras arenosas, lagoons etc.; la presencia al NO de un curso fluvial seco desarrollado en épocas más húmedas y la presencia, al sureste, de la Lagunica, hoy desecada y roturada. A pesar de ello, la Laguna de Gallocanta mantiene una masa de agua importante (Castañeda y Herrero, 2009) que da soporte a miles de aves migratorias además de preservar hábitats singulares y especies endémicas.

La laguna actual presenta una morfología alargada con dirección NO-SE con una superficie aproximada de 14 km². Forma parte de una cuenca endorreica cuyas aguas superficiales y subterráneas fluyen principalmente hacia el centro originando diversas lagunas de escasa profundidad, siendo Gallocanta la de mayor tamaño y con una profundidad máxima conocida de 2.8 m en 1974 (Pérez, 2014). La zona de estudio de este trabajo comprende porciones de los cinco municipios que rodean la laguna: Bello, Berrueco, Gallocanta, Las Cuerlas y Tornos.

La zona de estudio se emplaza al este de la depresión Cuaternaria definida por Gracia (2009) y se centra en la Laguna de Gallocanta. La laguna está rodeada por las sierras de Santa Cruz-Valdecasa al NE, Sierra Menera al S y Sierra Calderos al SO. Dentro de la zona de estudio, al sur, quedan un conjunto de sierras y altiplanos, el Monte del Coscojar y La Cabezuela, a ambos lados de la Rambla de los Pozuelos (Mapa 1).

La Sierra de Valdecasa está formada por materiales paleozoicos, fundamentalmente pizarra, arenisca y cuarcita. Los Montes del Coscojar y La Cabezuela están formados por material calcáreo del Mesozoico, y alcanzan menor cota topográfica. Están divididos por el abanico fluvial de Bello formado por material detrítico más moderno, del Pleistoceno. Este abanico forma una depresión que drena hacia la laguna y donde aflora material mesozoico de edad Triásica. Al NO de la laguna de Gallocanta afloran materiales triásicos y cretácicos (Mapa 2).

Las vertientes de las elevaciones topográficas drenan hacia la laguna formando conos de deyección o glaciares de mayor o menor extensión según su altitud y proximidad al fondo de la cubeta. Son glaciares de edad Pleistocena y de donde se forman Inceptisoles con un desarrollo limitado en profundidad (Castañeda et al., 2015). En el margen NE de la laguna entre los conos se observa la formación de

vales y zonas de inter-glacis donde se acumulan materiales más finos de grava, arena y arcilla y que dan origen a Mollisoles, suelos más desarrollados y ricos en materia orgánica. Los materiales del fondo de la laguna, generalmente encharcados o inundados, están asociados a la evolución de la laguna durante el Holoceno y muestran evidencias de alternancia de condiciones de inundación y secado (Castañeda et al., 2015).

El clima de la zona es seco, semiárido mesotérmico (Liso y Ascaso, 1969). Según los datos registrados de la estación meteorológica de Tornos (2.5 km al NE de la laguna), entre 1944 y 2012 la precipitación media anual es 487 mm (Luna et al., 2014), aunque es muy irregular variando entre 761 mm en 1959 y 232 en 2001. La temperatura media anual es 11.3°C, las medias mensuales varían entre -2.6°C y 8.2°C en enero, y entre 11.2°C y 29.5°C en julio, con un 25% de días con helada al año.

A partir de los registros de la estación de Tornos se observa que anualmente hay dos periodos secos durante los meses de enero-febrero y julio-agosto, respectivamente. Además se observa un periodo de lluvia en la época del equinoccio de primavera, concretamente los meses de abril y mayo, como se muestra en el climograma (Figura 1). El déficit hídrico en la zona alcanza 605 mm al año (García-Vera y Martínez-Cob, 2004) y se ve incrementado por el frecuente viento de procedencia NO cuya velocidad supera los 80 km /h (Gracia, 1995).

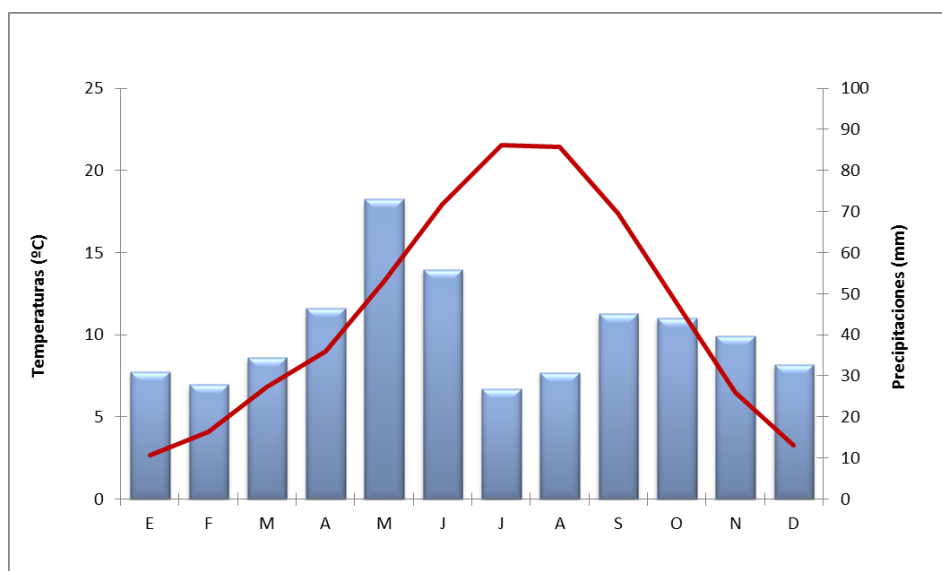


Figura 1. Climograma elaborado con datos de la estación meteorológica de Tornos.

4. LA GESTIÓN DEL TERRITORIO

4.1. Conservación de humedales salinos

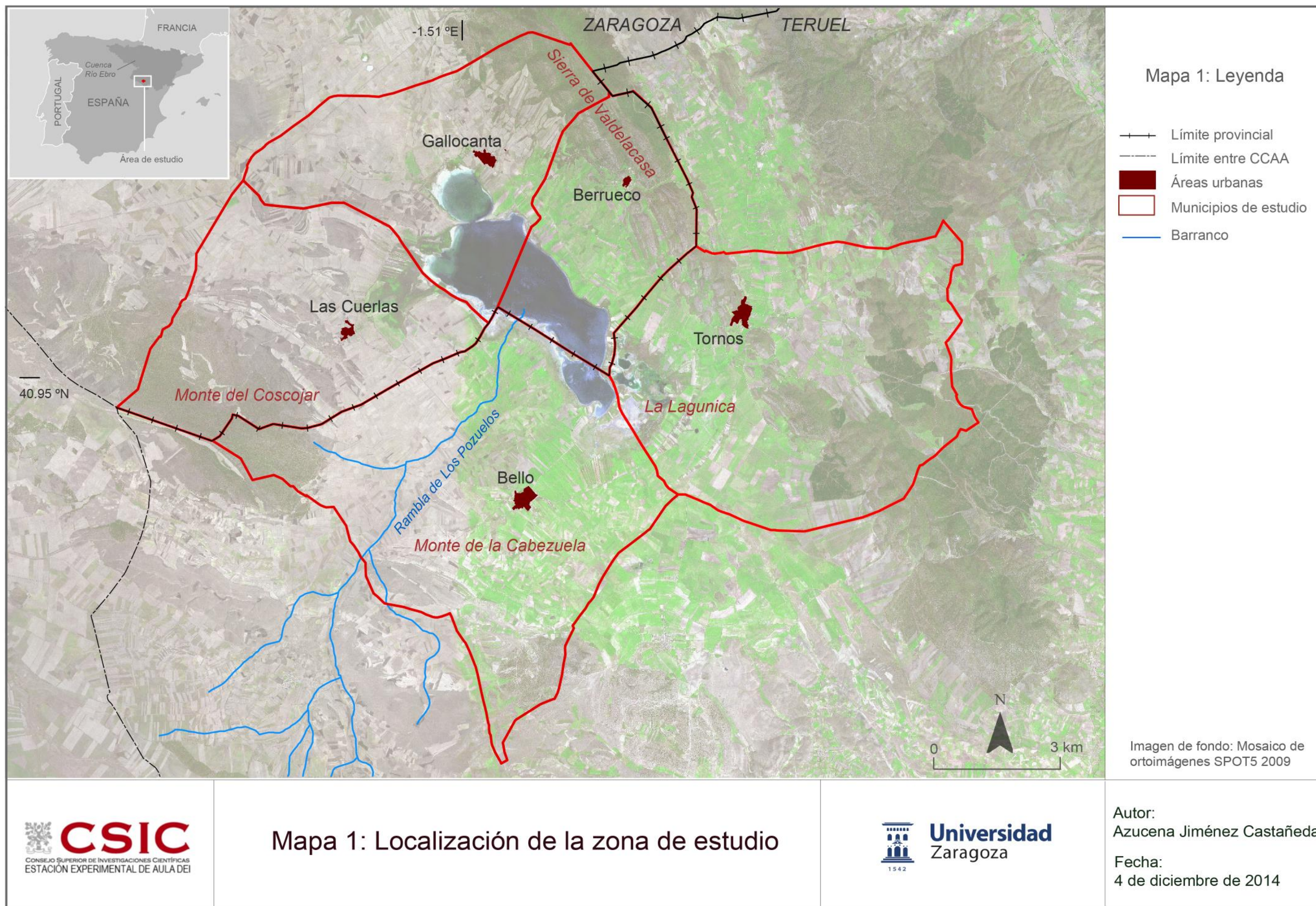
La Laguna de Gallocanta es el mayor y mejor conservado lago salino de Europa occidental, constituyendo un enclave de elevado valor ecológico. Las particularidades ambientales, en especial, su funcionamiento hídrico, caracterizado por la alternancia de periodos de inundación y sequía, han favorecido la preservación de comunidades biológicas adaptadas a condiciones extremas en este entorno, particularmente sequía, radiación y salinidad.

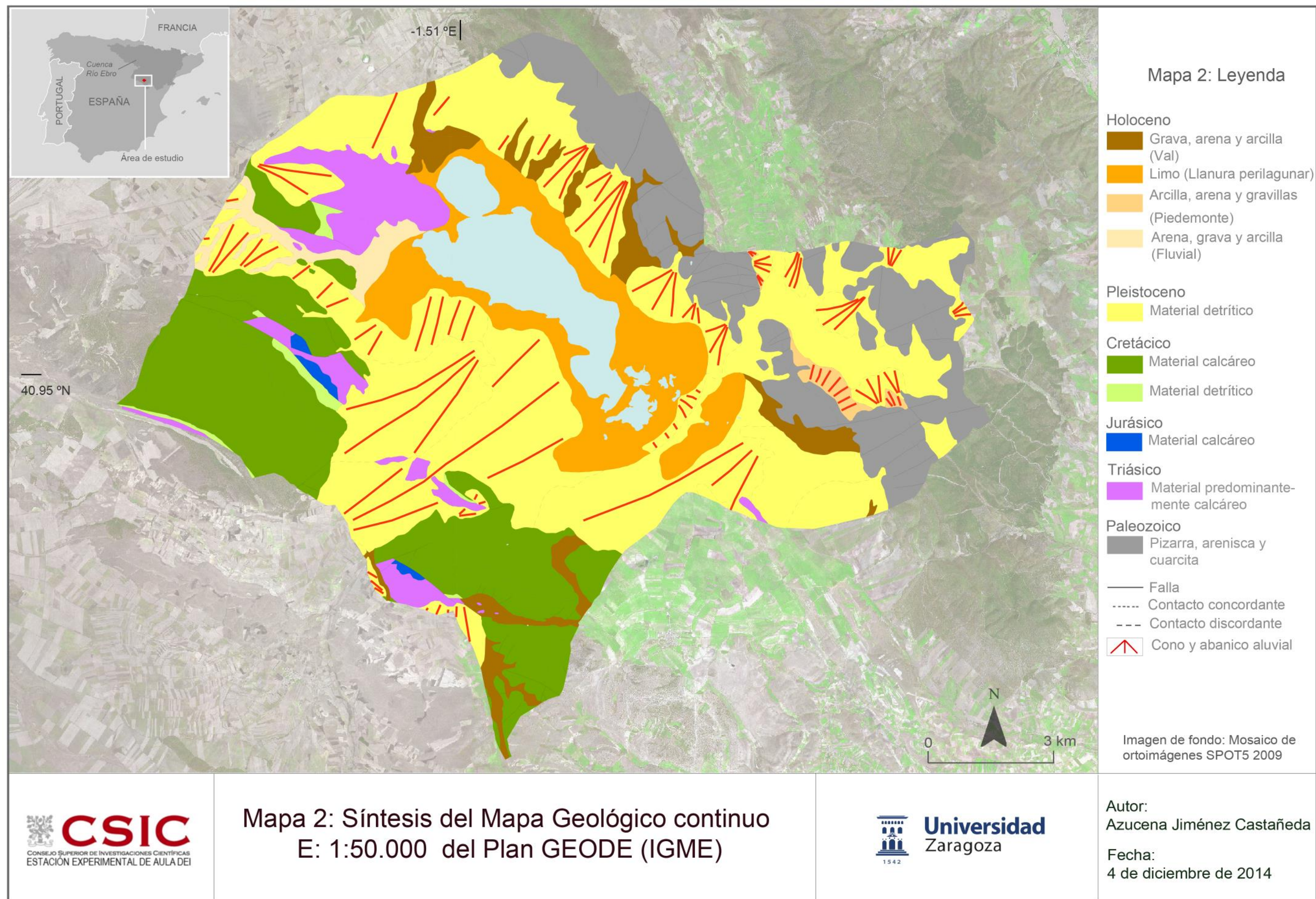
Antes de 1971, la laguna se consideraba un área insalubre, además de improductiva, por lo que se ideó un plan para su desecación. A partir de 1972, el Instituto de Conservación de la Naturaleza (ICONA), el Ministerio de Agricultura, aprobó la constitución de una Zona de Caza Controlada que regulaba las actividades cinegéticas dentro de un área. A finales de los 70 se contempló de nuevo el desecar la laguna, idea que no prosperó debido a las protestas de conservacionistas y el especial al apoyo de un personaje público, Félix Rodríguez de la Fuente.

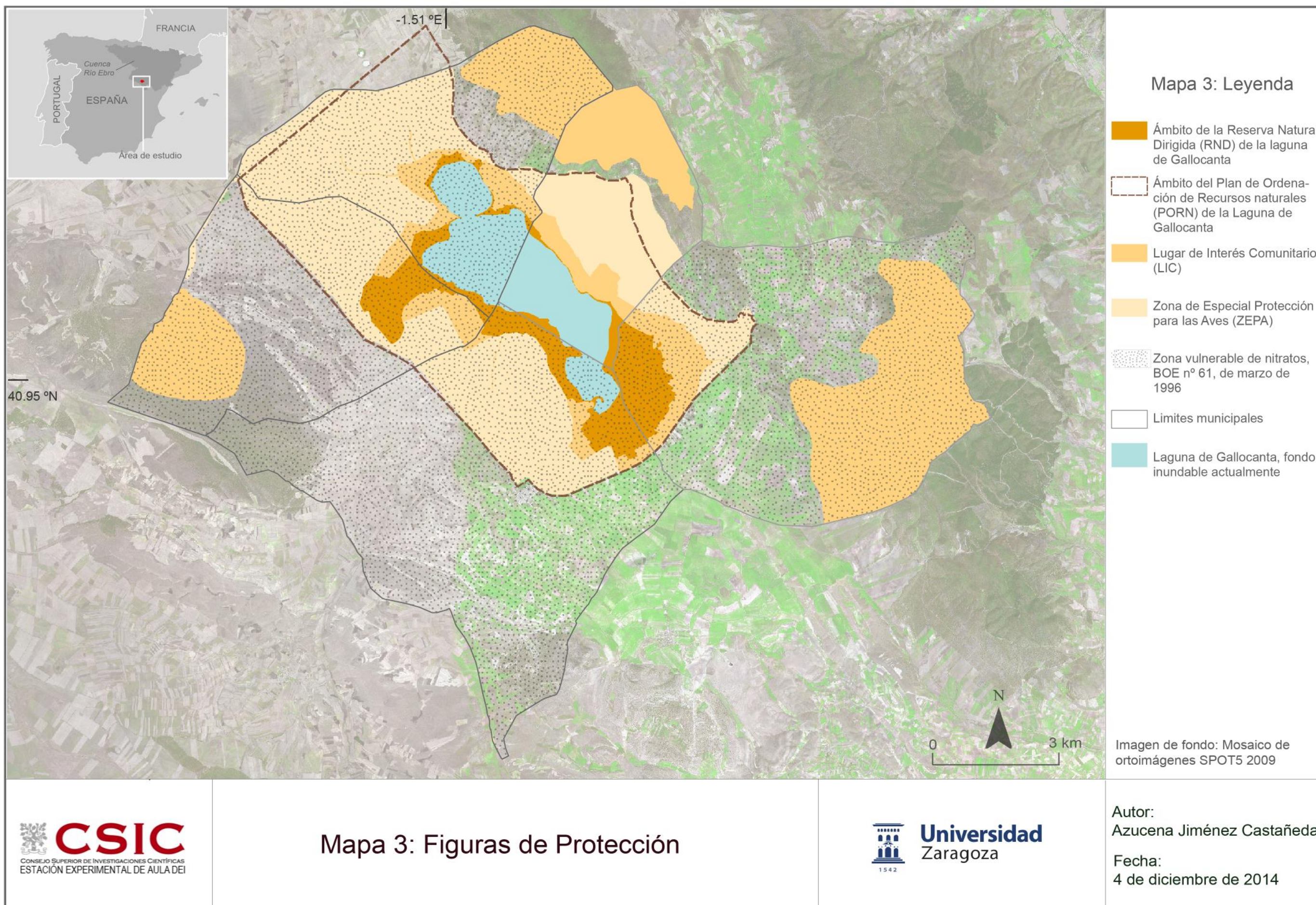
En 1985 la laguna fue declarada Refugio Nacional de Caza (BOA nº 35, de 15/05/85) abarcando una superficie de 6720 ha. Más tarde, en 1987, fue declarada Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA), aplicando la Directiva de Conservación de aves silvestres de la Comunidad Europea (79/409/CEE), en 2001 se amplió su delimitación a 17510 ha. En 1994 pasó a formar parte de la lista internacional de humedales del Convenio Ramsar junto a Chiprana (BOE nº135, de 07/06/94), especialmente como hábitat de aves acuáticas.

En 2006, se aprobó la lista de Lugares de Importancia Comunitaria de la Región Biogeográfica Mediterránea, por decisión de la Comisión de 19 de julio, conformando así la red de Zonas de Especial Conservación de la Red Natura 2000. En el Decreto 46/2006 se aprueba el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales (PORN) cuyo procedimiento había sido iniciado en el BOA nº 45 de 19 de abril de 1995. Se aplica el PORN a 19.303 ha, e incluye aves y plantas, pero no recoge aspectos geomorfológicos ni edáficos.

La laguna y su orla inmediata se declara Reserva Natural Dirigida (BOE nº 23 de 26 de enero de 2007; Ley 11/2006 de 30 noviembre) y se establece un régimen jurídico para la protección y gestión de la Reserva (1924 ha) y su Zona Periférica de Protección (4553 ha), para proteger los valores naturales como el paisaje y los rasgos geomorfológicos (Mapa 3).







4.2. Uso agrícola

Los cinco municipios del área de estudio suman 18.333 ha. El de mayor superficie es Bello, con un 29% de la superficie total, seguido de Tornos (27%), Las Cuerlas (18%), Gallocanta (16%) y Berrueco (11%).

La población aparece concentrada en pequeños núcleos urbanos con una población censada a 1 de enero de 2013 por el Instituto Aragonés de Estadística (IAEST) de 31 habitantes en Tornos; 41 en Berrueco; 52 en Las Cuerlas; 154 en Gallocanta y 250 en Bello. El resto del territorio aparece despoblado, según refleja la baja densidad de población en 2013 (IAEST). Así, todos los municipios poseen una densidad poblacional muy inferior a la media aragonesa (28 hab/km²), en especial el municipio de Las Cuerlas con 1.6 hab/km²; seguido por Gallocanta con 5.2 hab/km²; Tornos y Bello con 4.8 hab/km²; y Berrueco con 2.1 hab/km². Además es una población muy envejecida, pues los mayores de 65 años supone más del 30 por ciento en todos los municipios. El municipio más envejecido es Las Cuerlas, con un 53.8% de población mayor de 65 años; seguido de Bello, con un 46.4%; Tornos, con un 42.4%; Gallocanta 37% y Berrueco 34.1% (IAEST, 2013)

Tradicionalmente ha sido un área agrícola cerealista de secano, una agricultura extensiva con un parcelario muy fragmentado. Las lindes marcan los límites de las parcelas creando un paisaje en mosaico agrícola (Figura 2). La fragmentación del territorio se originó por el antiguo sistema de herencias que repartía las tierras familiares entre todos los hijos, prioritariamente entre varones. Ello ha reducido el tamaño de las parcelas y, además, ha disgregado por todo el territorio las propiedades de los agricultores. Esta distribución de las propiedades limita la mecanización del campo, encareciendo los costes de producción al estar las propiedades diseminadas y perdiendo tiempo en los desplazamientos.



Figura 2. Paisaje agrícola en mosaico en el entorno de la laguna de Gallocanta

El Sistema de Identificación de Parcelas Agrarias (SIGPAC) se desarrolló en cumplimiento del reglamento 73/2009 de la Comisión Europea con el objetivo de crear un sistema de

identificación único de parcelas acompañado de una cartografía en todos los Estados Miembros de la Unión Europea. Este sistema viene acompañado de una cartografía digital a escala 1:5000, que se basa en la información catastral y en ortofotografías aéreas actualizadas por el Ministerio correspondiente.

Como novedad, la cartografía digital incorpora información del recinto, superficie continua de terreno dentro de una parcela con un mismo uso agrícola. En una parcela pueden identificarse uno o varios recintos en función del cultivo o grupo de cultivos que se den en ella. La Tabla 1 muestra que en la zona de estudio predomina la pequeña explotación, con una superficie media de 1.23 ha. Todos los municipios tienen un elevado número de recintos, generalmente superior a 2000, especialmente Bello. Este municipio es el de mayor extensión de los estudiados y supera los 5000 recintos; además tiene el mayor porcentaje de superficie declarada, el 80% (Tabla 1). La concentración parcelaria prevista para esta zona, sólo se ha terminado en el municipio de Tornos. Aquí, el tamaño medio de la parcela agrícola es 2.1 ha, la mayor de la zona, aunque se mantienen recintos de tamaño inferior a 100 m².

Tabla 1. Superficie por municipio y por recinto agrícola

Municipio		Recinto SIGPAC					Superficie por recinto SIGPAC		
Nombre	Superficie		REC Total Nº	REC declarados			Max.	Min.	Media
	ha	%		Nº	%	ha			
Bello	5243	29	7560	4551	80	4202	123.3	0.008	0.9
Berrueco	1937	11	1664	641	41	786	16.7	0.013	1.2
Gallocanta	2950	16	3266	1556	59	1753	23.5	0.006	1.1
Las Cuerlas	3258	18	3973	1812	69	2253	178.0	0.010	1.2
Tornos	4945	27	4123	1488	64	3188	116.9	0.007	2.1
MEDIA	3667	20	4117	2010	63	2436	91.7	0.009	1.3

El objetivo principal del SIGPAC es gestionar de forma eficiente las ayudas económicas a los agricultores derivadas de la Política Agraria Comunitaria (PAC). Para percibir las es imprescindible la declaración anual de los agricultores (declaración de la PAC), con el uso / cultivo de sus recintos. La declaración de la PAC de 2013 ha permitido elaborar una cartografía de uso agrícola del área de estudio.

Otro objetivo de la PAC es gestionar las medidas agroambientales introducidas en la Unión Europea en 1992 y aplicadas en España por cada Comunidad Autónoma en el Marco Nacional de Desarrollo Rural. Las medidas agroambientales destinadas a la mejora del medio ambiente y el medio rural son imprescindibles en el entorno de la laguna por estar declarada la ZEPA ES0000017 “Cuenca de Gallocanta”. El objetivo de estas medidas agroambientales es hacer compatible la agricultura extensiva de secano y la conservación de zonas húmedas y de las especies de aves migratorias y sus hábitats, incluyendo los cultivos y la laguna. Corresponden a

compromisos contraídos por España mediante la ratificación de los Convenios Internacionales de conservación.

El Gobierno de Aragón contempla seis tipos de medidas agroambientales que afectan a los municipios de estudio. Cinco de ellas las gestiona la Dirección General de Conservación del Medio Natural: Medida 1.3.1: Generación de alimento para la avifauna de los agrosistemas del Área de Influencia Socioeconómica de la Reserva Natural Dirigida de la Laguna de Gallocanta; Medida 1.4: Retirada de tierras con cultivos herbáceos de secano en zonas perilagunares de reservas naturales; Medida 1.5: Protección del arbolado no productivo en la explotación en zonas Red Natura 2000; Medida 1.8.1: Generación de corredores biológicos en la Red Natura 2000; 1.8.2: Generación de corredores biológicos en zonas presencia de fauna. La medida 1.3.1: puede combinarse con las medidas 1.8.1 y 1.8.2. La sexta medida es gestionada por la Dirección General de Producción Agraria: Medida 4.2. Mantenimiento del pastoreo en prados y pastizales.

Para ver la distribución de estas medidas agroambientales se ha elaborado una cartografía temática (Mapa 5) y seguidamente se especifican las particularidades de cada medida.

- *Medida 1.3.1. Generación de alimento para la avifauna de los agrosistemas del Área de Influencia Socioeconómica de la Reserva Natural Dirigida de la Laguna de Gallocanta.* Es la medida que ocupa mayor extensión en los cinco municipios que rodean la laguna, XX%. Pretende aumentar la implantación de la alfalfa, esparceta o girasol en un territorio de tradición de monocultivo de cereal, para favorecer la nidificación y alimentación de la avifauna. A modo general, el cereal de invierno deberá sembrarse coincidiendo con el paso de las grullas (1 octubre y 15 de marzo) y se hacen siembras tardías (20 enero y 15 marzo).



Figura 3. Grullas común (*Grus grus*) en los campos que rodean la laguna Gallocanta.

- *Medida 1.4. Retirada de tierras con cultivos herbáceos de secano en zonas perilagunares de reservas naturales.* Afecta exclusivamente al municipio de Bello. Se aplica a zonas

dentro de la Reserva Natural Dirigida en el ámbito del PORN de la Laguna de Gallocanta. Se consideran parcelas calificadas como tierra arable de secano. La superficie para la que se solicita la ayuda deberá haber estado dedicada a cultivo, barbecho o retirada durante los últimos cinco años. En esas parcelas, no se permiten labores agrícolas ni pastoreo entre julio y septiembre, ambos inclusive.



Figura 4. Parcela en retirada de cultivo, donde aún se aprecian señales del uso agrícola, especialmente la vegetación.



Figura 5. Parcelas en retirada de cultivo colonizada por vegetación natural.

- *Medida 1.5. Protección del arbolado no productivo en la explotación en zonas Red Natura 2000.* Afecta en exclusiva al municipio de Tornos. Consiste en mantener y aumentar el arbolado no productivo entre los campos de labor (pino, sabina, fresno, encina, roble, olmo, almez, almendro, nogal e higuera). Estos árboles son puntos de alimentación y refugio de la fauna.



Figura 6. Ejemplo de arbolado no productivo.

- *Medida 1.8.1. Generación de corredores biológicos entre la Red Natura 2000.* Se aplica en el municipio de Berrueco. Pretende la conectividad entre zonas con vegetación espontánea fomentándola a través de cultivos de alfalfa de secano. La erosión genética por aislamiento de las poblaciones es una causa de extinción de especies en un país desarrollado. La alfalfa, al ser un cultivo plurianual de secano, permite la nidificación y aumenta el éxito de las polladas. Esta medida se puede aplicar en zonas catalogadas como LIC y ZEPA.
- *Medida 1.8.2. Generación de corredores biológicos en zonas presencia de fauna.* Afecta a los recintos colindantes con la zona sur de la laguna, principalmente, en los municipios de Berrueco, Tornos y Bello. Aporta un Plan de trabajos en el corredor biológico que comprenda, para algunas parcelas generadoras de rastrojos de su explotación, un pase de apero 15 días posteriores a la recolección en rastrojos colindantes con un terreno forestal. No pastar, ni dar labores de gestión de la vegetación adventicia, en los meses de abril a mayo. En el caso de alzar la alfalfa, será después del 15 de septiembre. Se incluyen la zona considerada Reserva Natural Dirigida en el PORN de la Laguna de Gallocanta.
- *Medida 4.2. Mantenimiento del pastoreo en prados y pastizales.* Esta medida ganadera se ha aplicado en todos los municipios, en áreas de prados y pastizales. Limita el número de cabezas ganaderas entre mayo y septiembre, ambos inclusive.

5. MATERIALES Y PROGRAMAS EMPLEADOS

5.1 Materiales

5.1.1. Imágenes de satélite

Se han empleado imágenes de los satélites Landsat 5TM y 7ETM+, seleccionadas entre las fechas 1984 y 2011 (Tabla 3). La obtención de imágenes de satélite Landsat es gratuita desde varios servidores web. Las de este trabajo se han obtenido del archivo de acceso libre del servidor *Glovis* (<http://glovis.usgs.gov/>) del USGS (United States Geological Survey). Su nivel es LT1, por lo tanto tienen precisión radiométrica sistemática. Las imágenes están georreferenciadas en el sistema geodésico de referencia WGS84, considerado equivalente al sistema europeo ETRS89 para la gran mayoría de aplicaciones cartográficas (BOE nº 207 de 29 de agosto de 2007). Se les ha aplicado convolución cúbica en su remuestreo a proyección UTM, con un tamaño de píxel de 30 m. Los puntos de control empleados se pueden consultar en uno de los ficheros adjuntos a las escenas suministradas.

Tabla 3. Imágenes de satélite empleadas en este estudio, Landsat 5TM y 7ETM+.

Código de referencia de la imagen	Sensor	Fecha	Pasada (track /frame)
LE71990322000253EDC00	ETM	2000-09-09	199-032
LE71990322001255EDC00	ETM	2001-09-12	199-032
LE71990322002114EDC00	ETM	2002-04-24	199-032
LE71990322003069SGS00	ETM	2003-03-10	199-032
LE72000322001102EDC00	ETM	2001-04-12	200-32
LT51990321984297XXX04	TM	1984-10-23	199-032
LT51990321990249AAA03	TM	1990-09-06	199-032
LT51990322007072MPS01	TM	2007-03-13	199-032
LT51990322010096MPS00	TM	2010-04-06	199-032
LT51990322011099MPS00	TM	2011-04-09	199-032
LT52000321987104XXX02	TM	1987-04-14	200-32
LT52000322003260MTI01	TM	2003-09-17	200-32
LT52000322007271MPS00	TM	2007-09-28	200-32
LT52000322009276MPS00	TM	2009-10-03	200-32
LT52000322010295MPS00	TM	2010-10-22	200-32
LT52000322011282MPS00	TM	2011-10-09	200-32

5.1.2. Datos meteorológicos

Se ha dispuesto de los datos de precipitación de la estación de AEMET Tornos, ubicada en el núcleo urbano del mismo nombre. Es la estación meteorológica cercana a la laguna de Gallocanta, 2.5 km, con la serie de precipitación más completa. Tiene registros de lluvia desde 1944 hasta la actualidad, completados por Luna et al. (2014) empleando correlaciones con diversas estaciones meteorológicas de la zona.

5.1.3. Datos agrícolas

Se ha contado con los datos de la declaración de la PAC (Política Agraria Comunitaria) del año 2013, facilitados por el Gobierno de Aragón. Los datos tabulados de las declaraciones se han asociado a la cobertura vectorial de recintos agrícolas SIGPAC del mismo año. Igualmente, se han solicitado al Gobierno de Aragón la relación de Medidas Agroambientales de aplicación en los recintos agrícolas de los cinco municipios de la zona de estudio.

5.1.4. Información territorial complementaria

Como información territorial de apoyo para la interpretación de las imágenes de satélite, se han recopilado diferentes documentos cartográficos que incluyen mapas de uso del suelo, topográfico y geológico, ortofotografía aérea y modelo digital de elevaciones, además de coberturas vectoriales en formato shapefile. Toda la información se ha analizado y editado en entorno SIG (ArcGIS®), y sus principales características se resumen en la Tabla 4.

Todas las coberturas se han homogeneizado al Sistema Geodésico de referencia ETRS89. La información territorial ráster y vectorial se ha delimitado al ámbito de los cinco municipios que forman parte de la zona de protección de la laguna de Gallocanta: Bello, Berrueco y Tornos de la provincia de Teruel, y Las Cuerlas y Gallocanta de la de Zaragoza.

Tabla 4. Información territorial empleada en entorno SIG (ArcGIS®). R: ráster; V: vectorial.

Documento	Tipo	Fuente
Plan de Ordenación de Recursos Naturales (PORN)	V	Gobierno de Aragón, SITAR. Web: http://sitar.aragon.es/
Lugar de importancia Comunitaria (LIC)	V	
Zona de Especial protección para las Aves (ZEPA)	V	
Términos municipales	V	
Comunidades Autónomas (CCAA)	V	
Red viaria	V	
Recintos agrícolas SIGPAC	V	
Modelo digital de elevaciones MDT05-LIDAR	R	Instituto Geográfico Nacional (IGN), centro nacional de descargas (CNIG). Web: https://www.cnig.es/
Ortofoto PNOA 2006	R	
Hojas 490/ 491/ 464/ 465		
Mapa Geológico continuo SIGEO	V	Instituto Geológico y Minero de España (IGME), sistema de consulta y difusión web de cartografía geológica continua. Web: http://cuarzo.igme.es/sigeco/
Zona vulnerable de nitratos	V	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). Web: http://www.magrama.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/
Imágenes de satélite (ver Tabla 3)	R	United States Geological Service (USGS), Glovis. Web: http://glovis.usgs.gov/

5.2. Programas

Se ha empleado ArcGIS® versión 10.2 como sistema de información geográfica y el módulo Arcpy de ArcGIS® para programar y automatizar tareas en lenguaje de programación Python. Este lenguaje es el sucesor del lenguaje *arcscripting* de la versión 9.3 de ArcGIS. Arcpy da acceso a herramientas de geoprocetamiento y a funciones adicionales que permiten crear flujos de trabajo más o menos complejos.

La ventaja de programar con Python es que es un lenguaje de uso general, potente, interoperable y accesible. Los programas desarrollados en lenguaje de programación Python tienen como objetivo automatizar diversas tareas que generalmente se hacen de forma individual y manual, y para ello interactúa con el sistema operativo. La automatización de las tareas se ha organizado en cuatro programas, siendo imprescindible la ejecución manual de ciertas tareas intermedias.

Al disponer de un tiempo limitado para desarrollar este trabajo, los programas no se han diseñado en forma de caja de herramientas (*toolbox*) para implementar en ArcGIS®, como sería deseable para un nivel de usuario básico. Sin embargo, se ha habilitado la opción de integrar y ejecutar los programas en cadena empleando un archivo *.bat*. Un archivo *.bat* es un archivo de texto sin formato que contiene una serie de instrucciones que permiten el procesamiento por lotes. Las órdenes se ejecutan en grupo y de forma secuencial permitiendo automatizar las tareas. La ventaja principal de este tipo de archivo es que no es necesario abrir la interfaz de ArcGIS®, lo cual agiliza el procesamiento de los datos.

Se ha empleado el programa de tratamiento de imágenes Erdas Imagine® 2014 para determinadas tareas del procesamiento de las imágenes Landsat, concretamente para la búsqueda de los valores mínimos del nivel digital en cada una de las bandas de las imágenes utilizadas.

Para el análisis estadístico se ha empleado el programa Minitab® v.15. Para la edición de mapas y figuras se ha empleado Adobe Illustrator® CS5.

6. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo consta de las siguientes fases:

- 1) Selección de imágenes de satélite;
- 2) Automatización del tratamiento de imágenes de satélite,
- 3) Generación de cartografía temática:
 - Mapas de ocupación del suelo,
 - Mapas de índices espectrales, y
- 4) Análisis de la información generada a partir del tratamiento de las imágenes de satélite.

La segunda fase, “Automatización del tratamiento de las imágenes”, ha requerido la mayor intensidad de trabajo. Las fases 3 y 4 han sido imprescindibles, no sólo para comprobar el correcto funcionamiento de la programación desarrollada en la fase 2 sino también para consolidar la metodología aplicándola al caso concreto de dos índices espectrales. En este sentido, la información generada a partir de las imágenes y su análisis se presentan como caso de estudio, según se describe seguidamente.

6.1. Selección de imágenes de satélite

Se han seleccionado imágenes de satélite con un porcentaje de nubes inferior al 30% y teniendo en cuenta los siguientes factores específicos de la zona: usos del suelo, fenología del cultivo, y variabilidad interanual de las precipitaciones.

6.1.1. Fenología del cultivo

Un criterio importante para la finalidad de este trabajo es definir las épocas del año en las que se quiere tener información satelital. Las imágenes de satélite muestran el estado fenológico de las cubiertas vegetales, las diferencias espectrales de los usos del suelo (laboreo, cultivo, vegetación natural, etc.) y las características de la superficie del terreno, como la humedad.

La zona de estudio se caracteriza por una agricultura cerealista de secano. El cereal de invierno tiene el mayor vigor vegetativo en primavera. Por tanto, se han seleccionado imágenes de primavera (abril y mayo) para obtener el vigor de los cultivos mediante el índice NDVI (Rouse et al., 1973). El NDVI es ampliamente usado para el seguimiento de cultivos porque utiliza las bandas del espectro electromagnético en el intervalo o banda del rojo (R) y del infrarrojo cercano (IRC), donde se concentra alrededor del 90% de la información relacionada con la vegetación. En la Figura 1 se muestra el distinto comportamiento de la vegetación verde en el espectro electromagnético. Presenta un mínimo relativo en la banda R debido a la absorción de la clorofila en esa longitud de onda, y un máximo relativo en la banda IRC que es como consecuencia de la dispersión múltiple de la radiación en el mesófilo de la hoja. El suelo desnudo tiene un comportamiento mucho más uniforme que el de la vegetación (Chuvieco, 2010), aunque presenta una tendencia ascendente desde el visible al infrarrojo, pero mucho más suave que la vegetación.

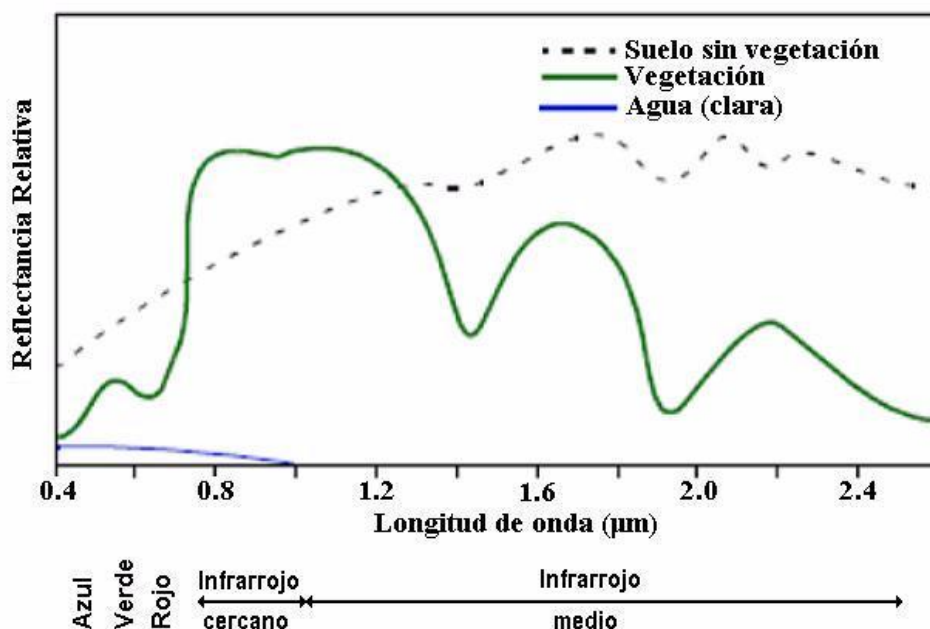


Figura 7. Esquema de las firmas espectrales de la vegetación, suelo y agua.

En otoño, las tierras labradas están preparadas para la siembra y los suelos están desnudos aunque con laboreos sujetos al calendario de la PAC. En este contexto, se han empleado imágenes de otoño (septiembre y octubre) para identificar y analizar la variabilidad de la superficie del suelo. Para ello se ha aplicado la transformación Tasseled Cap (Kauth y Thomas, 1976; Crist y Cicone, 1984). Esta transformación proporciona tres nuevas variables (brillo, verdor y humedad) a partir de la combinación lineal de las bandas originales. En este trabajo se ha analizado la variable humedad por considerarse la más apropiada para estudiar la distribución de zonas húmedas en el paisaje, en el entorno agrícola de la laguna.

6.1.2. Años secos y húmedos

A partir de la serie de precipitación de la estación de Tornos, los años comprendidos entre 1984 y 2006 se han clasificado en normales, secos y húmedos según los siguientes criterios:

- Normales: lluvia anual igual a la media calculada entre 1944 y 2013 (487.8 mm) \pm una desviación estándar (107.2 mm).
- Secos: lluvia anual inferior a la media calculada entre 1944 y 2013 menos una desviación estándar Umbral de año seco: 380.5 mm.
- Húmedos: lluvia anual superior a la media calculada entre 1944 y 2013 más una desviación estándar, Umbral de año húmedo: 595 mm.

En la Tabla 5 se muestra la clasificación de las imágenes que se ha obtenido según estos criterios. Por otro lado, a falta de datos de campo simultáneos a las imágenes, es necesario conocer en la medida de lo posible el estado del terreno para interpretar la respuesta espectral de las diferentes cubiertas en cada fecha. Para ello se han recopilado las lluvias previas a las fechas de adquisición de las imágenes para periodos de 5 y 15 días, según se recoge en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de los años en el periodo 1984 a 2011 y lluvia acumulada los 5 (P5) y 15 (P15) días previos a la fecha de adquisición de la imagen seleccionada.

Año	Tipo	P15	P5	Primavera Marzo	Abril	P15	P5	Otoño Septiembre	Octubre
1984	Normal					7.6	7.6		23/10/1984
1985	Seco								
1986	Húmedo								
1987	Húmedo	20.3	0.9		14/04/1987				
1988	Húmedo								
1989	Húmedo								
1990	Normal					5.2	0	06/09/1990	
1991	Húmedo								
1992	Normal								
1993	Normal								
1994	Seco								
1995	Seco								
1996	Normal								
1997	Normal								
1998	Seco								
1999	Normal								
2000	Normal								
2001	Seco	0.5	0		12/04/2001				
2002	Normal	42.4	0.5		24/04/2002				
2003	Normal	24.8	2.3	10/03/2007		36.3	0	17/09/2003	
2004	Normal								
2005	Seco								
2006	Normal								
2007	Normal	1.2	0	13/03/2007		5.3	0	28/09/2007	
2008	Húmedo								
2009	Normal					15.8	14.5		03/10/2009
2010	Normal				06/04/2010	24.3	0		22/10/2010
2011	Normal				09/04/2011	2.3	0		09/10/2011

6.2. Tratamiento de imágenes Landsat

El enfoque de estudio multitemporal precisa disponer de una gran cantidad de imágenes en un amplio periodo de tiempo. Esto suscita la necesidad de automatizar procesos que manualmente son complejos y lentos. El programa ha sido diseñado, para que pueda operar con imágenes Landsat 5TM, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8, todas ellas disponibles en el servidor Glovis del USGS.

El programa de tratamiento se ha estructurado en tres subprogramas: 1) pretratamiento (PTRA), 2) homogeneización (HOMO) y 3) generación de índices (GENIN). Cada subprograma comprende diversas rutinas que corresponden a procesos de tratamiento estandarizados según se muestra en el esquema de metodología de la Figura 8.

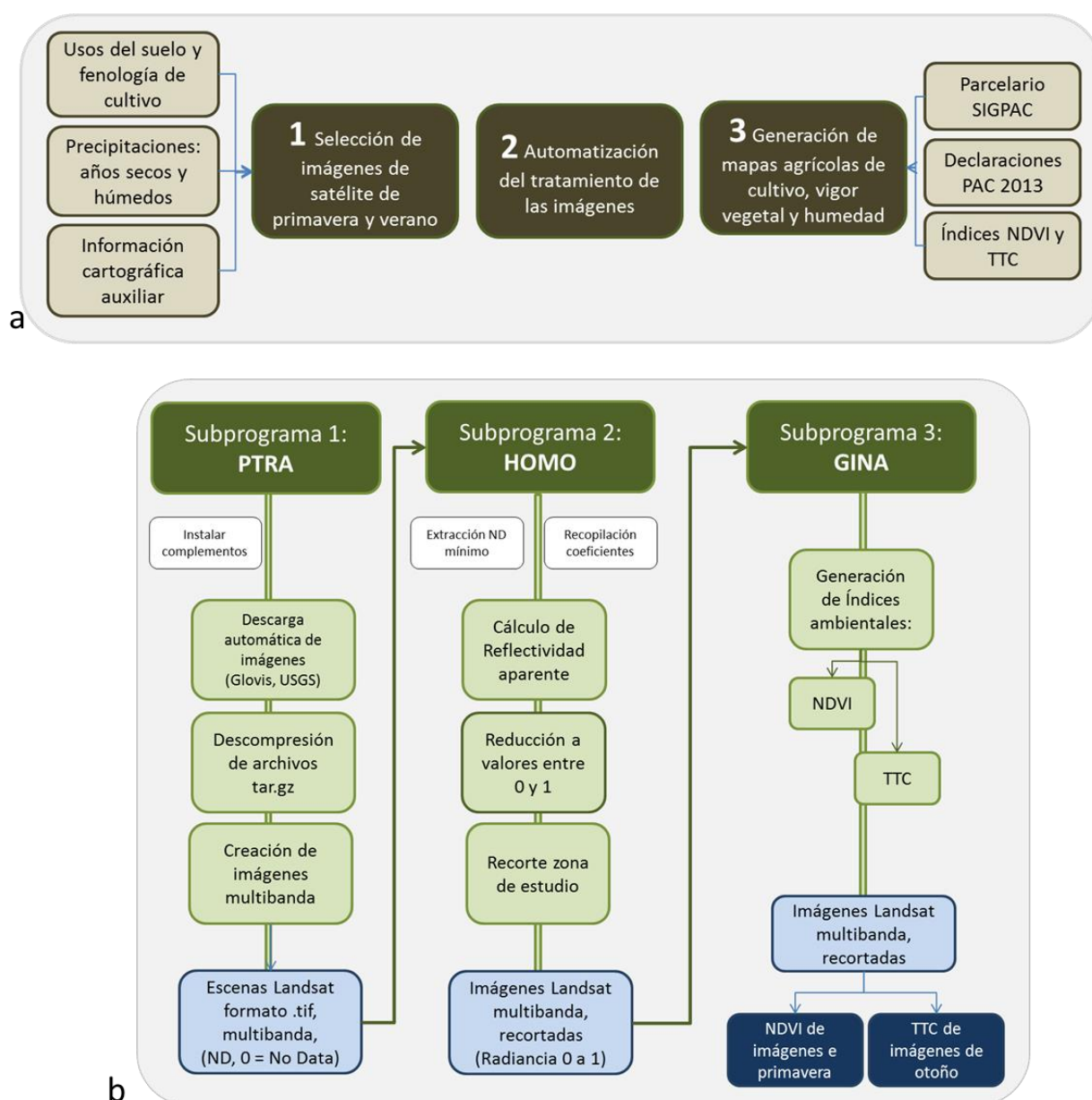


Figura 8. Esquema de la metodología empleada para el desarrollo del TFM: a) esquema general; b) esquema específico de la programación.

6.2.1 Subprograma 1: Pretratamiento (PTRA)

Esta fase comprende la descarga automática de los archivos de imágenes seleccionadas, descompresión de archivos originales suministrados en formato comprimido y generación de un archivo multibanda (*layer stack*) por fecha.

- Descarga automática¹

Para descargar imágenes de forma automática se necesita emular la sesión. Para ello se ha empleado el paquete *Pycurl* que identifica objetos por su dirección URL. Este paquete no está incorporado en ArcGIS por lo que se ha instalado dentro de su carpeta Python.

Además se requiere un complemento del explorador que monitoree el tráfico HTTP. Con dicho complemento se obtendrán las cookies, tecnología web para el seguimiento de sesiones. Las cookies siguen protocolos HTTP que incluyen mecanismos como el *digest access authentication*, que permite acceder a una web sólo cuando el usuario ha facilitado el nombre y contraseña de usuario correctos. Normalmente, las sesiones expiran tras un periodo de inactividad determinado.

Los parámetros introducidos para descargar las imágenes han sido los siguientes:

- ✓ Path/Row: 200/32 y 199/32.
- ✓ Porcentaje de nubes: 0% -30%
- ✓ Sensores: Landsat 5TM y Landsat 7ETM+
- ✓ Años: 1984-2012
- ✓ Meses: septiembre, octubre, abril y mayo.

La lista de imágenes a descargar se ha introducido en el texto del programa, con los nombres que suministra el servidor Glovis.

- Descompresión de archivos

Las imágenes del servidor Glovis son archivos comprimidos en formato *.tar.gz*². Es necesario descomprimir estos archivos para acceder al contenido. Con los paquetes *tarfile* y *zipfile*, se ofrecen varias posibilidades, una de ellas es la descompresión de archivos.

A continuación se define una nueva variable llamada *files* que contiene el nombre de los archivos *.tar.gz*. Para contener esta información es necesario importar la función *os*, paquete que implementa funciones útiles en los nombres de ruta. Así se define que las carpetas con los archivos descomprimidos conserven el nombre del archivo comprimido sin la extensión *.tar.gz*. Además se indica que si la carpeta descomprimida está creada se omita esta acción.

Como resultado se tiene una serie de carpetas con archivos *.tif* correspondientes a las bandas de los sensores y 2 archivos *.txt* correspondientes a los metadatos y a los puntos de control empleados para georreferenciar la imagen, respectivamente.

¹ Se requiere registro previo en el servidor Glovis.

² El formato *.tar* es típico de Linux, y el *.gz* indica que se está utilizado el mayor factor de compresión posible.

- Imagen multibanda

Para facilitar el trabajo se ha creído conveniente crear imágenes multibanda seleccionando las bandas del espectro consideradas útiles para este análisis. En primer lugar se ha identificado el tipo de sensor mediante el prefijo de las imágenes, es decir LC5, LT7 y LC8. A continuación se ha creado un listado con las bandas de interés. Para los sensores TM y ETM+, se elabora un único listado porque sus bandas son equivalentes, la única diferencia es que el sensor ETM+ incluye una banda más que TM, la pancromática, que no se emplea en este trabajo. Igual sucede con la banda del térmico presente en ambos sensores. El listado para TM y ETM+, incluirá las bandas 1, 2, 3 del visible y 4, 5, 7 del infrarrojo.

El sensor OLI de Landsat 8 presenta claras divergencias con los anteriores de la familia Landsat, con 11 bandas en distintas longitudes de onda, algunas de ellas coincidentes y otras nuevas. Por ello se introduce un listado exclusivo para el sensor OLI que incluya las bandas del visible 2, 3 y 4; y del infrarrojo y del SWIR 5, 6 y 7 (Tabla 6).

A continuación se ha especificado la herramienta de análisis espacial de ArcGIS que crea las imágenes multibanda, *Staking layers*, que precisa establecer el producto y sus extensiones porque trabaja en una secuencia de comandos independiente a ArcGIS (*arcpy.CheckOutExtension ('Spatial')*).

Las imágenes de los sensores TM y ETM+ están codificadas en 8 bits, por lo que los niveles digitales se varían entre 0 y 255. Por otro lado, el valor 0 originalmente está reservado para valores no registrados, es decir, fuera de la imagen. Por ello se ha discretizado la variable 0 por *No data*, imprescindible para la posterior corrección radiométrica de la imagen, donde los valores 0 pasarían a tener un valor introduciendo errores en los resultados. Esta operación se ha definido simultáneamente a la generación de la imagen multibanda.

Como resultado se tienen las imágenes multibanda, en formato .tif, que conservan el nombre de la carpeta en la que se encuentran, cuyas bandas son renombradas en 1, 2, 3, 4, 5 y 6, y cuyos valores no registrados aparecen designados como No Data.

Tabla 6. Características básicas de los sensores empleados y bandas seleccionadas (en gris).

Satélite	Sensor	Resolución espacial (m)	Ancho de banda espectral (μm)		Resolución Radiométrica (Bits)
Landsat 5	Thematic Mapper (TM)	30	Banda 1: Azul	0.45-0.52	8
			Banda 2: Verde	0.52-0.60	
			Banda 3: Rojo	0.63-0.69	
			Banda 4: Infrarrojo cercano (IRC)	0.76-0.90	
			Banda 5: Infrarrojo medio (IRM)	1.55-1.75	
			Banda 7: IRM	2.08-2.35	
		120	Banda 6: Infrarrojo térmico (IRT)	10.4-12.5	
Landsat 7	Enhanced Thematic Mapper (ETM+)	15	Banda 8: Pancromática (PAN)	0.52-0.90	
		30	Banda 1: Azul	0.45-0.52	
			Banda 2: Verde	0.53-0.61	
			Banda 3: Rojo	0.63-0.69	
			Banda 4: Infrarrojo cercano (IRC)	0.78-0.90	
			Banda 5: Infrarrojo medio (IRM)	1.55-1.75	
			Banda 7: Infrarrojo térmico próximo (IRTP)	2.09-2.35	
		60	Banda 6: IRT lejano	10.4-12.5	
Landsat 8	OLI	30	Banda 1: costera/aerosoles	0.43-0.45	16
			Banda 2: Azul	0.45-0.51	
			Banda 3: Verde	0.53-0.59	
			Banda 4: Rojo	0.64-0.67	
			Banda 5: Infrarrojo cercano (IRC)	0.85-0.88	
			Banda 6: SWIR 1	1.57-1.63	
			Banda 7: SWIR 2	2.11-1.29	
			Banda 9: Cirros	1.36-1.38	
		15	Banda 8: Pan	0.50-0.68	
	TIRS	100	Banda 10: IRT 1	10.60-11.19	
			Banda 11: IRT 2	11.50-12.51	

6.2.2. Subprograma 2: homogeneización (HOMO)

Este programa se ha diseñado para el tratamiento de Landsat 5TM y 7ETM+. Aunque algunos trabajos hacen referencia a los coeficientes de calibración a emplear con las imágenes de Landsat 8 (Vanhellemont y Ruddick, 2014), se ha tomado como fuente de información fiable la que proporciona el USGS en su página web. Sin embargo, no se dispone de toda la información necesaria para obtener la reflectividad aparente de la superficie. Por ello las imágenes de este sensor no se han incluido a partir de esta fase de tratamiento, pues se ha considerado que el tipo de corrección radiométrica aplicable a las imágenes Landsat 8 con los datos actualmente disponibles no es exactamente comparable a las de los otros sensores.

El subprograma 2 consta de tres partes con el siguiente cometido: 1) preparar la información necesaria para la corrección radiométrica de las imágenes en una tabla virtual, 2) ejecutar la corrección radiométrica, y 3) recortar las imágenes y eliminar archivos innecesarios por cuestiones prácticas.

- Preparación de la información requerida para la corrección radiométrica

La corrección radiométrica de la imagen consiste en un conjunto de técnicas que modifican los niveles digitales (ND) originales para acercarlos a los que se tendrían en caso una percepción ideal (Chuvieco, 2010). Se efectúa a través de modelos matemáticos que ligán el valor ND registrado con los valores reales del objeto sobre el terreno.

La mayor parte de la información necesaria para llevar a cabo la corrección radiométrica se ha extraído de los ficheros de cabecera de las imágenes (Tabla 7). Otros coeficientes se han obtenido de la bibliografía (Chander et al., 2009), a excepción del objeto oscuro que se ha identificado manualmente mediante criterio experto. Estos coeficientes se han almacenado en un archivo externo que será incorporado a la tabla virtual creada con los metadatos.

Tabla 7. Fuente y datos empleados para la corrección radiométrica de las imágenes

Fuente	Dato
Metadatos imagen (USGS)	Radiancia mínima de cada banda
	Radiancia máxima de cada banda
	Nivel digital mínimo 0
	Nivel digital máximo 255
	Fecha de adquisición
	Ángulo de elevación solar
	Tipo de sensor
Bibliografía (Chander et. al, 2009)	Irradiancia solar en el techo de la atmósfera
	Flujo incidente
Usuario	Objeto oscuro

- Cálculo de la reflectividad aparente en la superficie terrestre, ρ_T

La conversión de los ND almacenados en una imagen original en la variable física reflectividad resulta de gran utilidad en la interpretación de imágenes, pues permite que la información multitemporal sea comparable entre sí y entre distintos sensores. La reflectividad aparente en superficie expresa la relación entre la energía incidente y la energía reflejada. Su valor varía

entre 0 (superficie perfectamente absorbente) y 1 (superficie perfectamente reflectora). La reflectividad de una cubierta depende de las características intrínsecas de la propia cubierta así como de las condiciones de observación y la longitud de onda. Es aparente porque asume dos principios que se cumplen en condiciones ideales:

- ✓ La superficie observada es plana (inferior al 5% de pendiente).
- ✓ Las cubiertas tienen un comportamiento especular.

Para conocer la reflectividad de una superficie es preciso relacionar la energía reflejada y la incidente. La programación de este proceso incluye dos pasos principales: 1) el cálculo de la energía reflejada; y 2) el cálculo de la energía incidente. Según la siguiente ecuación que relaciona la energía reflejada (numerador) y la energía incidente (denominador) (Chuvieco, 2010):

$$\rho_T = \frac{(L_\lambda - L_a) d \pi}{E_{o\lambda} \cos\theta_{sol} \tau_1 \tau_o} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde ρ_T es la reflectividad aparente a nivel terrestre; L_λ es la radiancia espectral; L_a es la dispersión atmosférica; d es el factor corrector tierra-sol; π es el ángulo sólido del hemisferio proyectado; $E_{o\lambda}$ es la irradiancia solar en el techo de la atmósfera; $\cos\theta_{sol}$ es el coseno del ángulo cenital solar; τ_1 es la transmisividad del flujo incidente; τ_o es la transmisividad del flujo ascendente.

El cálculo de la energía reflejada $(L_\lambda - L_a) d^2\pi$ conlleva el cálculo de los siguientes factores:

- 1º) El efecto de la dispersión atmosférica.

Previamente al cálculo de L_λ , se ha estimado la contribución de la atmosfera a la radiancia de cada banda de la imagen en términos de valor digital (ND) con el método de corrección del histograma por sus valores mínimos (Chávez, 1996). Requiere zonas con fuerte absortividad, que deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a 0, y estima el espesor óptico de los aerosoles. No se ha aplicado a las bandas del infrarrojo porque se ha observado que produce un efecto de “sobreexposición”.

Este procedimiento es manual y el éxito del proceso depende del criterio experto del usuario. Se ha aplicado a toda la escena de las imágenes multibanda creadas en el Programa 1 utilizando Erdas IMAGINE 2014. Las imágenes se han visualizado en una única banda, en modo de escala de grises (*Gray Scale*) cuyos valores se asignan por igual a los tres canales de color a través de una única tabla.

El ND mínimo de las escenas se ha identificado empleado el histograma (Tabla 8). Los ND mínimos se han archivado junto a información auxiliar: nombre de la imagen multibanda, fecha de adquisición y número de la banda. Por último se ha definido la nueva imagen resultado de restar el ND mínimo en cada banda.

Tabla 8. Valores digitales mínimos obtenidos para las bandas de cada imagen

Nombre de la imagen	Fecha	Banda					
		1	2	3	4	5	7
LT51990321984297XXX04	23/10/1984	39	13	9	9	0	0
LT51990321990249AAA03	06/09/1990	55	19	14	12	0	0
LE71990322000253EDC00	09/09/2000	53	35	28	11	0	0
LE72000322001102EDC00	12/04/2001	55	39	31	12	0	0
LT52000322003260MTI01	17/09/2003	44	19	14	9	0	0
LT51990322007072MPS01	13/03/2007	43	18	13	9	0	0
LT52000322009276MPS00	03/10/2009	43	17	14	11	0	0
LT52000322010295MPS00	22/10/2010	36	14	10	9	0	0
LT51990322011099MPS00	09/04/2011	51	21	17	12	0	0
LT52000322011282MPS00	09/10/2011	39	15	12	8	0	0
LE71990322002114EDC00	24/04/2002	58	38	33	13	0	0
LT51990322010096MPS00	06/04/2010	57	25	23	21	0	0
LT51990322011099MPS00	14/04/1987	54	22	16	11	0	0
LT52000322007271MPS00	28/09/2007	42	16	14	10	0	0

Conversión de los ND a valores de radiancia espectral (L_λ). Es la energía vatios, W recogida por el sensor por m^2 , ángulo sólido (en estéreo radianes) y longitud de onda (λ , en micrómetros) (Chuvieco, 2010) es decir, tiene en las siguientes unidades de medida:

$$Wm^{-2}Sr^{-1}\mu m^{-1}$$

La relación entre los niveles digitales y la radiancia se ha establecido con los coeficientes de calibración de cada sensor para cada longitud de onda (λ). Se han tenido en cuenta las siguientes particularidades:

- ✓ Landsat 5TM tiene unos coeficientes de calibración para el periodo comprendido entre el 1 de marzo de 1984 y 4 de mayo de 2003; y otros coeficientes a partir del 5 de mayo de 2003 (Anejo 3).
- ✓ Landsat 7ETM tiene diferentes coeficientes para calibrar en High Pass (HH) y en Low Pass (LL) (Anejo 3).

La radiancia espectral para Landast TM y ETM+ se ha calculado según la expresión (Chander et al., 2009):

$$L_\lambda = \left(\frac{LMAX_\lambda - LMIN_\lambda}{Q_{Calmax} - Q_{Calmin}} \right) (Q_{Cal} - Q_{Calmin}) + LMIN_\lambda \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde $LMAX_\lambda$ y $LMIN_\lambda$ son la radiancia máxima y mínima de cada banda, respectivamente; Q_{Calmax} y Q_{Calmin} son los ND máximos y mínimos, respectivamente; Q_{Cal} es el ND de cada pixel de la imagen.

- 2º) El factor corrector Tierra-Sol (d)

Medido en unidades astronómicas, depende del día del año (día juliano) de la fecha de adquisición de la imagen. Se ha empleado ArcPy de ArcGIS para obtener las incógnitas de la siguiente ecuación:

$$d = (1 + 0.01674(\text{Sen}(2\pi(J - 93.5)/J_m)))^2$$

Ecuación 3

Donde J es el día juliano; J_m es el número de días del año; y la constante 0.01647 corresponde a la excentricidad de la órbita terrestre cuyo seno se expresa en radianes

- 3º) El ángulo sólido del hemisferio proyectado (π), que es una constante equivalente al valor del número Pi.

Por otro lado, el cálculo de la energía incidente $E_{o\lambda} \cos\theta_{sol} \tau_1 \tau_o$ que aparece en el denominador de la ec. 1 conlleva el cómputo de la irradiancia solar, $E_{o\lambda}$, el ángulo cenital solar, $\cos\theta_{sol}$, y las transmisividades incidente, τ_o , y reflejada, τ_1 .

- 4º) La irradiancia solar en el techo de la atmósfera $E_{o\lambda}$

Se ha obtenido de Chander et al. (2009) para las bandas TM y ETM+(Tabla 9).

Tabla 9. Irradiancia solar en el techo de la atmósfera obtenidos de Chander et al. (2009).

Sensor	Banda					
	1	2	3	4	5	6
TM	1983	1796	1536	1031	220.0	83.44
ETM+	1997	1812	1533	1039	230.8	84.90

- 5º) El coseno del ángulo cenital solar ($\cos\theta_{sol}$)

Se ha calculado como el complementario del ángulo de elevación solar, disponible en el fichero de cabecera de las imágenes y es el mismo para todas las bandas. Se mide en radianes.

$$\cos\theta_{sol} = \cos((90 - \text{'Sun Elevation angle'}) \cdot 0.01745)$$

Ecuación 4

- 6º) La transmisividad de los flujos incidente y reflejado

No se han considerado previamente, en el método de corrección radiométrica basado en el objeto oscuro (Chávez, 1988). Se han empleado los valores recomendados por el Plan Nacional de Teledetección para los sensores TM y ETM+ (<http://www.ign.es/PNT/presentacion.html>), para condiciones atmosféricas despejadas (Tabla 10).

Tabla 10. Transmisividad del flujo incidente.

Sensor	Banda					
	1	2	3	4	5	7
TM/ETM+	0.70	0.78	0.85	0.91	0.95	0.97

La transmisividad del flujo reflejado dado que Landsat es un satélite de observación cenital y su ángulo de observación satelital también lo es, por lo que se ha considerado que $\cos\theta_{sat} = 1$.

Como resultado se tiene una serie de 14 imágenes corregidas radiométricamente, comparables, y cuyos valores digitales varían entre 0 y 1.

Los posible valores inferiores y superiores a este intervalo se han corregido definiendo dos expresiones condicionales que hacen que los valores inferiores a 0 tomen valor 0, y los valores superiores a 1 tomen valor 1.

Se han recortado las imágenes al área de estudio mediante la herramienta *clip* aplicada a cada banda. Tras el recorte (Figura 9) se han creado nuevas imágenes multibanda. Finalmente, todas las imágenes creadas en los pasos intermedios y que no estén contenidas en una imagen multibanda se han eliminado por cuestiones prácticas.

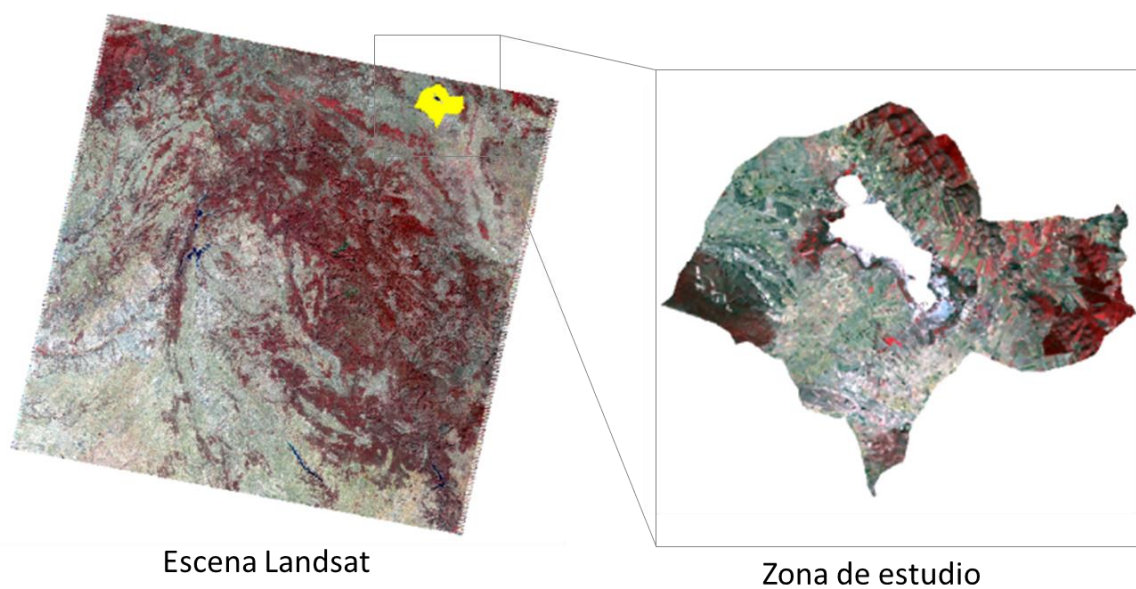


Figura 9. Recorte de la escena completa y obtención de la zona de estudio

6.2.3. Subprograma 3: Generación de Índices Ambientales (**GINA**)

Este subprograma ha sido diseñado para trabajar con imágenes Landsat 5TM y 7ETM+. En una primera fase se ha recopilado la información referida a los coeficientes de la **transformación Tasseled Cap, TTC** (Anejo 4), que se han incorporado al programa a través de un archivo externo. La transformación TTC permite obtener nuevas bandas por combinación lineal de las originales, con el objeto de realzar algunos rasgos de interés en la escena. Ofrece unos componentes de significado físico preciso e independientemente del tipo de imagen según las siguientes ecuaciones:

$$\text{Brillo} = \sum_{k=1}^6 C_{kb} * P_k \quad \text{Verdor} = \sum_{k=1}^6 C_{kv} * P_k \quad \text{Humedad} = \sum_{k=1}^6 C_{kh} * P_k$$

Donde C_{kb} , C_{kv} y C_{kh} son los coeficientes de transformación TTC de brillo (b), verdor (v) y humedad (h) para cada banda k; y P_k son los valores de reflectividad para cada banda k.

Con estas nuevas bandas, la transformación TTC pone en evidencia el comportamiento espectral de la vegetación y el suelo creando nuevos ejes mejor ajustados a ese espacio físico. El brillo (Brightness) refleja los cambios en la reflectividad total de la escena. El verdor (Greenness) indica el contraste entre las bandas del visible y el IRC y destaca la intervención de la banda 4, la ponderación negativa de las bandas del visible y la anulación mutua de las dos en el IRM. La humedad (Wetness) se relaciona con el contenido de agua en la vegetación y en el suelo, y se identifica por el contraste entre el SWIR, donde se manifiesta con mayor claridad la absorción del agua, y el resto de las bandas.

En una segunda fase se ha definido cuales son las bandas de interés de las escenas para realizar el cálculo del **Índice de Vegetación Normalizada, NDVI**. El NDVI se fundamenta en la normalización de los valores digitales contenidos en las bandas roja e infrarroja, y mide el vigor vegetal dentro de cada píxel. Sus valores oscilan entre -1 y 1.

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad \rightarrow \quad \text{Landsat 5TM y 7ETM+} = \frac{4 - 3}{4 + 3}$$

Como resultado se tiene una nueva carpeta en la que exclusivamente se almacenan las imágenes resultantes de los índices NDVI y TTC. Los resultados serán renombrados incorporando la fecha de adquisición y el índice correspondiente.

6.3. Generación de cartografía temática

A partir de los documentos cartográficos especificados en el apartado 4.1, se ha elaborado una cartografía temática necesaria para la interpretación de las imágenes de satélite y ceñida al área de estudio.

La cartografía generada se ha almacenado en un fichero *geodatabase* específico de ArcGIS que permite el almacenamiento físico de información geográfica, con una capacidad de almacenamiento ilimitada. Admite datos de tipo ráster, vectorial y tablas, entre otros. La información se ha organizado por temas mediante una serie de *datasets* que pueden contener información ráster o vectorial.

6.3.1. Mapas agrícolas

A partir del parcelario agrícola SIGPAC y las declaraciones de los agricultores se ha elaborado un mapa de uso del suelo para la zona de estudio. Para unir los datos geográficos del parcelario con los datos tabulados de las declaraciones y las medidas agroambientales aplicadas en la zona se ha creado un identificador común que consta de los identificativos de la provincia (PROV), municipio (MUN), polígono (POL), parcela (PAR) y recinto (REC).

Se han obtenido así dos mapas de información agrícola de 2013 a escala de recinto SIGPAC: el mapa de producto declarado y el de medidas agroambientales.

El mapa de producto declarado se ha reclasificado en categorías (Tabla 11) adaptadas a la zona de estudio y que simplifican la interpretación visual del territorio en las imágenes de satélite. Con la información temática generada, se han estimado las superficies ocupadas por cada producto declarado por municipio.

El mapa de medidas agroambientales permite identificar los recintos afectados, las medidas aplicadas en la zona, y relacionarlo con las áreas protegidas desde el punto de vista de la legislación ambiental. Para los casos en que un mismo recinto agrícola está sujeto a más de una medida, se creó una columna adicional que permitiese cartografiar esta información.

6.3.2. Mapas de vigor vegetal y de humedad

Se han obtenido dos tipos de mapas municipales a partir de imágenes Landsat de fechas seleccionadas: 1) mapas de verdor vegetal resultantes de calcular los índices de vegetación (NDVI) de imágenes de primavera y 2) mapas de humedad obtenidos de la banda correspondiente de la transformación Tasseled Cup (Crist y Cione, 1984; Huang et al 2002) en imágenes de otoño.

Se han extraído los valores estadísticos generales y simultáneamente se han visualizado los histogramas de las imágenes. De esta forma se asegura que los intervalos no enmascaren aspectos que puedan ser de interés.

Tabla 11. Reclasificación de los productos declarados en 2013 en los cinco municipios de estudio.

Producto declarado	Uso reclasificado
Girasol	Cultivo de verano
Maíz	
Trigo blando	Cereal de invierno
Trigo duro	
Avena	
Cebada	
Centeno	
Triticale	
Lenteja	Herbáceo
Guisante	
Otros cultivos herbáceos	
Almendra	Leñoso
Olivo	
Forestal no maderable	Forestal
Forestal maderable	
Tierra agrícola forestal	
Alfalfa	Forraje
Guisante forrajero	
Forrajes	
Esparceta	
Barbecho tradicional	Barbecho, No cultivado
No cultivo	
Hortaliza	Hortícola
Pasto permanente	Pasto

7. RESULTADOS

7.1. Ocupación del suelo: producto declarado SIGPAC 2013

El conjunto de los cinco municipios de estudio totalizan una superficie de 18.334 ha (Tabla 1). Ordenados de mayor a menor según el porcentaje de superficie que ocupan son: Bello (29%), Tornos (27%), Las Cuerlas (18%), Gallocanta (16%) y Berrueco (11%).

La superficie declarada en el área de estudio es un 66% de la superficie total, 12.182 ha, y varía entre el 80% en Bello y el 41% en Berrueco. Esta superficie presenta la distribución de cultivos que se muestra en la Figura 10 y en el Mapa 4. El cereal de invierno ocupa la mayor superficie dentro del conjunto de los municipios, el 46% (Figura 10). Cultivos y usos minoritarios son: pastos (7%), barbecho (6%) y cultivo de verano (5%). El resto de productos declarados ocupa una superficie inferior al 1%: herbáceo (0.4%), forestal (0.3%), hortícola (0.1%) y leñosos (0.03%).

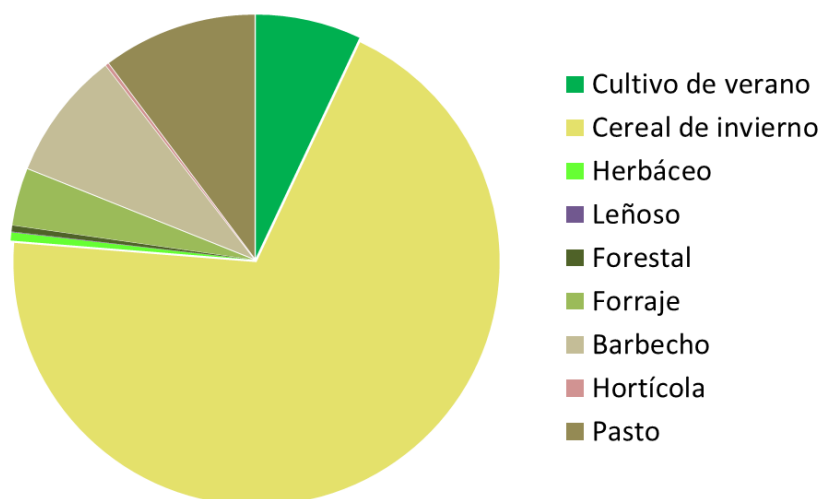


Figura 10. Porcentaje de los productos agrícolas declarados en el conjunto de los municipios (SIGPAC 2013)

En **Bello**, el cultivo que mayor superficie ocupa es el cereal de invierno (Tabla 9). Representa el 80% de la superficie declarada y se extiende por el 59% de la superficie del municipio (Mapa 4 y Figura 11). Le sigue el pasto que, con un 11.3%, se localiza tanto en la llanura perilagunar próxima a la zona inundada como en el Monte de La Cabezuela, en suelos calcáreos del Jurásico y Cretácico. El barbecho (7%) se concentra en el Jurásico que aflora sobre el abanico de Bello; el forraje (3%) se localiza junto a los pastos y aparece disperso en pequeñas parcelas por todo el municipio; el cultivo de verano (3%) tiende a concentrarse en pequeñas parcelas situadas en el centro del abanico de Bello y en el borde del Cretácico calcáreo. Herbáceos, leñosos y hortícolas suponen menos del 2% y están próximos al núcleo urbano.

El municipio de **Tornos** representa el 27% de la superficie total de estudio. Predomina el cereal de invierno, que representa el 68% de la superficie declarada (44% del municipio) y se extiende por todo el municipio; el cultivo de verano se da en una proporción significativa (13%), disperso en parcelas de cierto tamaño. La superficie dedicada al pasto es algo menor que en Bello (8%); una parte del mismo se localiza colindante con la llanura perilagunar y otra parte se extiende en suelos sobre el Paleozoico. El barbecho (6%) se concentra próximo al Paleozoico de la Sierra de

Valdelacasa y también al entorno de la Lagunica. El forraje (6%) se da disperso por todo el municipio. Herbáceos y leñosos representan menos del 1%.

El cultivo mayoritario en el término municipal de **Las Cuerlas** sigue siendo el cereal de invierno, aunque con el porcentaje más bajo de todos los municipios, pues representa sólo el 55% del producto declarado (Tabla 12) y el 38% de la superficie municipal (Figura 11). Se extiende en suelos desarrollados sobre material detrítico Cretácico y Pleistoceno, y sobre suelos más recientes, en relleno fluvial Holoceno (arena, grava y arcilla). El pasto representa un porcentaje significativo en este municipio, con un 21% de superficie declarada y un 14% del municipio. Se concentra en zonas calcáreas del Cretácico aflorantes en el Monte del Coscojar. El barbecho también es frecuente, con un 16.4%, y se concentra en los limos de la llanura perilagunar junto al cultivo de verano (3%), y también en parcelas de escasas dimensiones por todo el término municipal. El forraje y los cultivos herbáceos son escasos (2%); el primero se da en pequeñas parcelas por todo el término y el segundo, en pequeñas superficies sobre el material detrítico de los conos aluviales. La superficie forestal (2%) se concentra en el Monte del Coscojar. El cultivo leñoso es una superficie extremadamente pequeña (<1%) en este municipio.

Tabla 12. Porcentaje de cultivo por municipio respecto al total declarado en cada municipio

Producto	Gallocanta	Berrueco	Tornos	Bello	Las Cuerlas
Cultivo de verano	12.3	5.3	12.5	3.2	2.8
Cereal de invierno	74.3	81.9	67.6	73.9	54.7
Herbáceo	0.0	0.0	0.1	0.6	1.8
Leñoso	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Forestal	0.6	0.3	0.0	0.0	1.6
Forraje	3.2	5.6	5.8	3.2	1.9
Barbecho	6.6	6.4	6.2	7.3	16.4
Hortícola	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0
Pasto	3.0	0.6	7.7	11.3	20.9

En **Gallocanta** el cereal de invierno representa un porcentaje similar al de Bello, el 74%, y ocupa el 44% del territorio (Figura 11). El cultivo de verano también es significativo (12%) y tiende a concentrarse próximo a las vales, donde se guarda humedad. La superficie en barbecho (7%) es similar a la de los otros municipios de la margen norte de la laguna, y se concentra en los conos de deyección próximos a la laguna. El forraje (3%) también se da próximo a la laguna, junto los campos en barbecho, mientras que el pasto (3%) sólo se extiende en la sierra de Valdecasa. La superficie de forestal y leñosos representa menos del 1%, y está diseminada por todo el término. No aparece superficie declarada como herbáceos ni hortalizas.

El cereal de invierno representa el 82% del producto declarado en **Berrueco**, el porcentaje más elevado de la zona, aunque ocupa sólo el 33% de la superficie municipal, el más bajo de los cinco municipios. El barbecho (6%) aparece disperso entre la superficie no declarada. El forraje (6%) se da en la parte proximal de los conos de deyección y donde comienza la llanura perilagunar. El cultivo de verano (5%) aparece diseminado a lo largo del término. Pastos, forestal y hortícola representan menos del 1% de la superficie declarada dentro del municipio. No aparece superficie declarada como herbáceos ni leñosos.

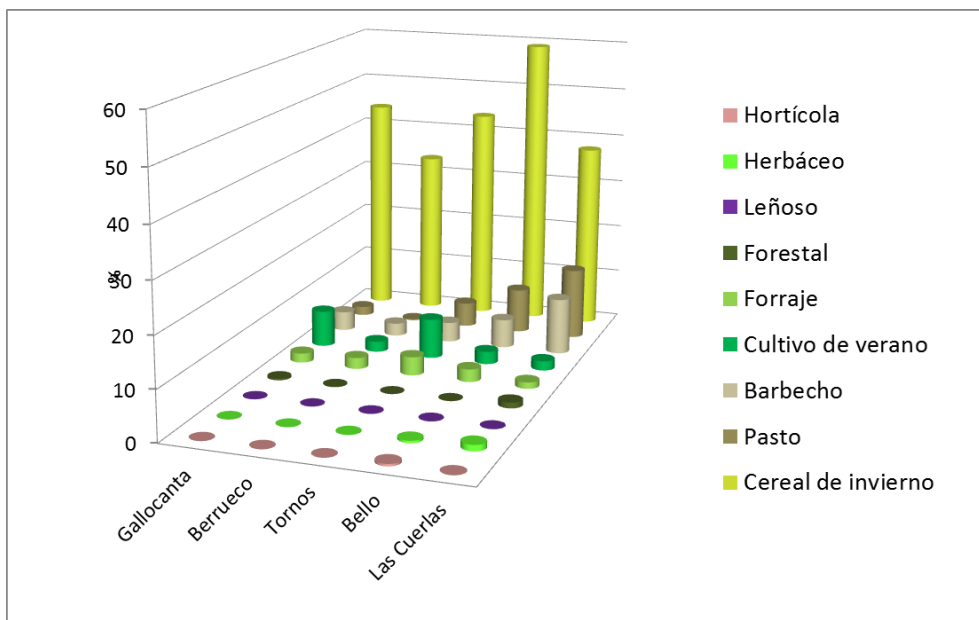


Figura 11. Porcentaje de cultivos por municipio respecto a la superficie municipal

7.2. Ocupación del cultivo dentro de la Reserva Natural Dirigida de la laguna de Gallocanta

El 12.3% de la superficie total de estudio pertenece a la Reserva Natural Dirigida (RND) de la Laguna de Gallocanta (Mapa 3), que se extiende por la llanura perilagunar de limos recientes del Holoceno (Mapa 2). Todos los municipios tienen un porcentaje de su superficie incluido en la RND, destacando Berrueco con el 28% y Gallocanta con el 22%. En menor proporción, participan en la RND los municipios de Bello (8%), Tornos (7%) y Las Cuerlas (7%).

La Reserva, aunque es una zona protegida, incluye un 4% de superficie agrícola que se declara para recibir ayudas de la PAC. En dicha superficie, la diversificación del cultivo es mayor que fuera de la Reserva, aunque se mantiene el predominio del cereal de invierno (Figura 12). Éste representa el 33% del producto declarado, una superficie similar a la del pasto, que representa el 30%. El barbecho también es significativo, ocupando el 21% de superficie declarada. El forraje y el cultivo de verano constituyen el 8% (Figura 12). El resto de la superficie de la RND no se declara porque corresponde a zonas inundadas por la laguna, praderas de halófitos y especies adaptadas a inundación intermitente o a suelos saturados o con nivel freático cercano a la superficie.

La Tabla 13 muestra los porcentajes de cada producto en la RND respecto de la superficie declarada por municipio. Hay dos municipios donde no predomina el cereal. En Bello predomina el pasto, con un 76% de la superficie declarada, mientras que en Las Cuerlas predomina el barbecho en un 64% de la superficie. El forraje también alcanza mayor importancia dentro de la Reserva, con el porcentaje máximo, 15%, en el municipio de Tornos. En Las Cuerlas, el cultivo de verano llega a superar ligeramente el porcentaje del cereal de invierno, con un 19% y 17%, respectivamente.

En la Reserva, los municipios con mayor dedicación al cereal de invierno son Gallocanta, Berrueco y Tornos, con porcentajes del 88%, 71%, y 63%, respectivamente. Bello destaca por su elevada superficie de pastos, el 76% de superficie declarada. Las Cuerlas, sin embargo, ha dedicado en 2013 un 64% al barbecho, y menores superficies al cereal de invierno (17%) y a cultivos de verano (19%).

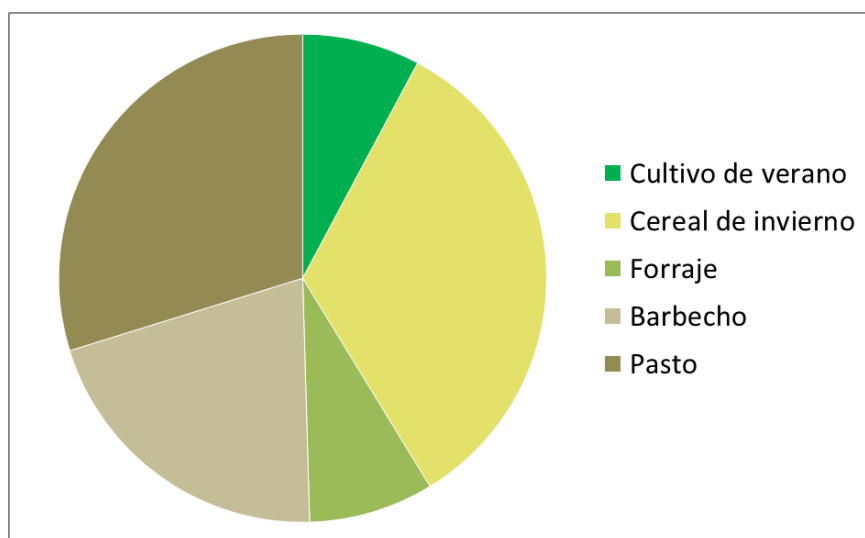


Figura 12. Porcentaje de los cultivos declarados dentro de la Reserva Natural Dirigida de la laguna de Gallocanta

Tabla 13. Porcentaje de cultivo por municipio respecto al declarado dentro de la Reserva Natural Dirigida

Producto declarado dentro de la RND	Gallocanta	Berrueco	Tornos	Bello	Las Cuerlas
Cultivo de verano	5.3	4.1	12.3	0.2	19.1
Cereal de invierno	88.0	71.0	62.7	8.6	16.6
Forraje	3.2	9.8	15.4	10.0	0.1
Barbecho	3.5	12.2	8.7	5.3	63.8
Pasto	0.0	2.9	1.0	75.9	0.3

7.3 Las medidas agroambientales

La distribución de las medidas agroambientales se muestra en el Mapa 5. Las medidas agroambientales se aplican en el 84% de la superficie declarada de la PAC. La medida que se aplica en más superficie es M1.3.1., con un 77%. La medida M4.2. se aplica tan sólo en un 5% de la superficie declarada; M1.4 afecta al 1%; y la suma de las medidas M1.5., M1.8.1., M1.8.2. es inferior al 1%.

El 90% de la superficie del municipio de Bello, tiene algún tipo de medida agroambiental. La M1.3.1. es la más frecuente en todos los municipios y es compatible con la aplicación de otras ayudas agroambientales. En Bello se combina con la M1.8.2., en parcelas ubicadas dentro de la Reserva, contabilizándose una superficie de 19 ha con dos medidas. Dentro de la RND un 8% de la superficie se acoge a M1.4. Fuera y dentro de la RND se aplica la medida M4.2.

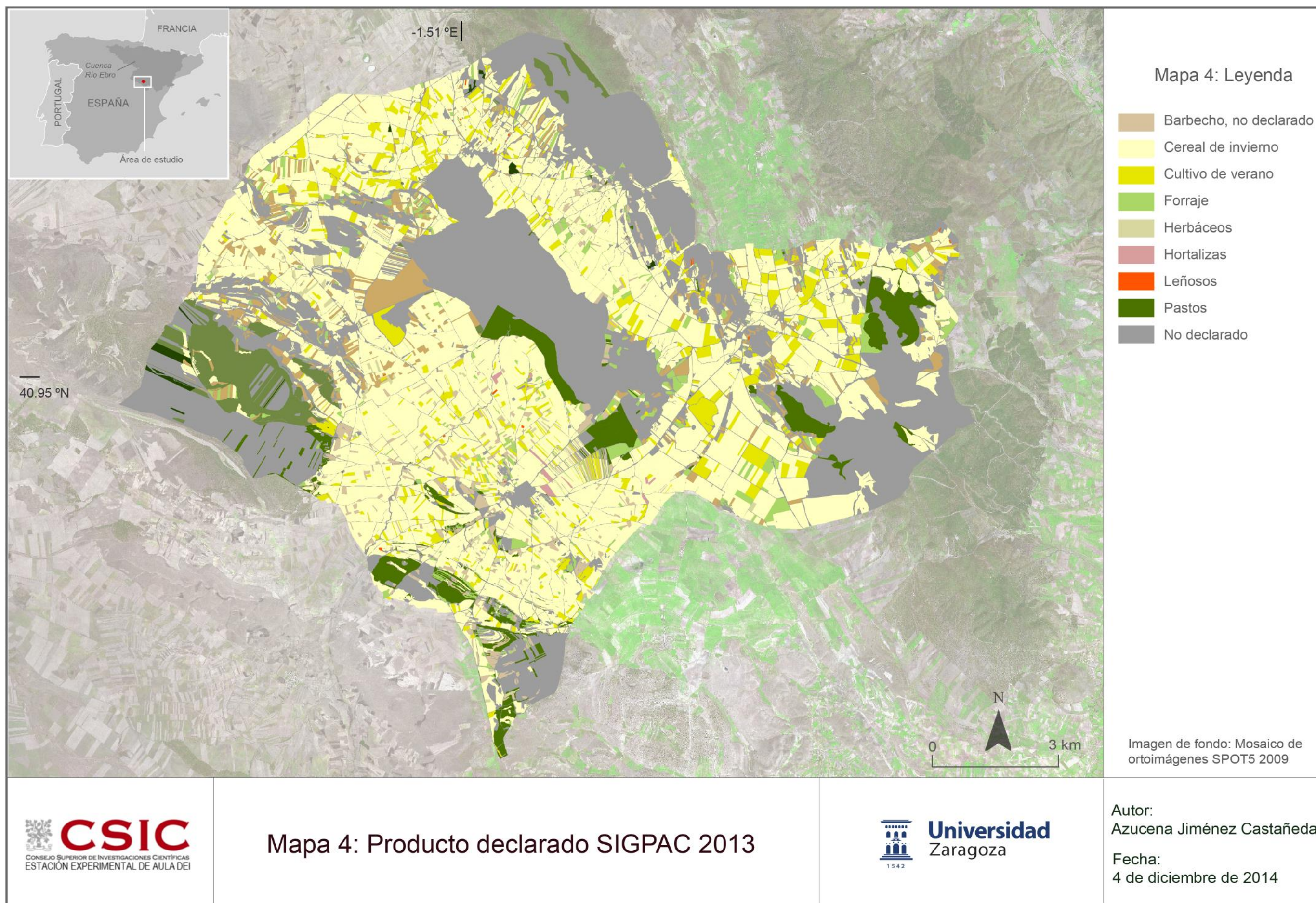
La mayor superficie afectada por la medida M1.3.1. se encuentra en Berrueco, con un 93% de la superficie declarada. Simultáneamente está afectada por la medida M1.8.2 en el ámbito de la Reserva. Una superficie inferior al 0.5% fuera de la RND se acoge a la medida M1.8.1.

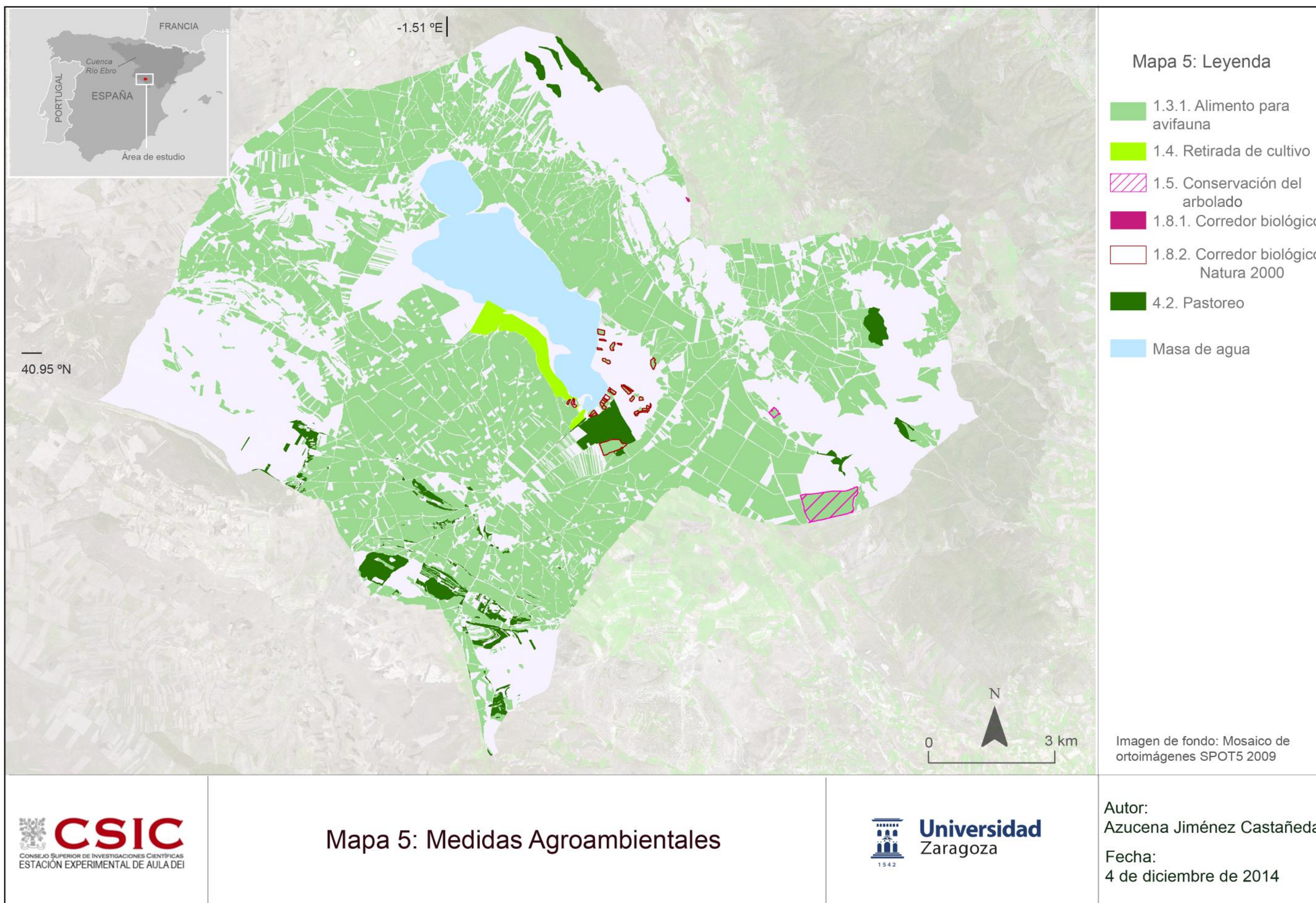
El municipio de Gallocanta es el único afectado en exclusiva por la medida M1.3.1., que se aplica al 86% de la superficie declarada, y al 96% de la declarada dentro de la RND.

La superficie declarada con algún tipo de medida agroambiental para el municipio de Las Cuerlas, es del 65%; de los cuales el 56% corresponde a la M1.3.1. siendo ésta la única medida

que se encuentra dentro de la RND; la superficie restante se acoge a la M4.2., en el Monte del Coscojar.

En el municipio de Tornos predomina la medida M1.3.1. en un 82% de la superficie, y se aplica simultáneamente con las medidas M1.5. fuera de la RND (78 ha) y M1.8.2. dentro de la RND (13 ha). Las medidas M4.2. y M1.8.2., próximas a la Sierra de Valdecasa, suponen el 2% de la superficie declarada.





8. Análisis de la información extraída de las imágenes

Se ha comprobado el funcionamiento del programa semiautomático de tratamiento de imágenes Landsat con una aplicación al estudio de la variabilidad del índice de vegetación conjuntamente al análisis de la composición RGB 432.

Se dispone de seis imágenes Landsat de primavera entre los años 1987 y 2011, cinco de abril y una de marzo. La combinación RGB 432 de estas imágenes de primavera destaca la componente vegetal de la imagen, pues pondera el contraste de la respuesta espectral de la vegetación sobre el resto de los elementos de la superficie de estudio (Anejo 5).

En rojo destaca el cereal de invierno, con mayor o menor intensidad dependiendo del estado de desarrollo del cultivo. El rojo intenso indica mayor desarrollo o mayor densidad de cultivo. Los diferentes tipos de vegetación y de cereal (centeno, cebada, trigo) tienen diferente ciclo fenológico y tipo de respuesta espectral. Así, sobre la Sierra de Valdecasa y las proximidades de la laguna se observan tonos rojos de diferente intensidad. La Sierra de Valdecasa, más o menos cubierta por carrasca, muestra una clara respuesta espectral inferior a la del cultivo.

Las orillas de la laguna, donde se dan juncas y praderas de halófitos, dan tonos azulados por el bajo verdor de la vegetación. Ello es consecuencia de la estructura de la hoja, de la baja densidad de la cobertura vegetal, y del ciclo fenológico de estas plantas, más tardío. En ocasiones, las eflorescencias salinas influyen en la respuesta espectral de la vegetación, aunque en las fechas analizadas es poco probable dado que no hubo lluvias recientes y el viento frecuentemente elimina las sales en superficie.

La imagen de marzo pertenece a un año pluviométricamente normal. Está tomada en la primera quincena, momento en el que el cereal aún no está en pleno desarrollo (Anejo 5). Sin embargo, se observa vigor en el cereal de los municipios de la margen norte de la laguna, por estar ubicados en vertiente sur y con más humedad por la proximidad y elevación de la sierra de Valdelacasa.

Las imágenes de abril muestran una vegetación más vigorosa (Anejo 5), especialmente las fechas de fin de mes porque se acercan al máximo desarrollo del cereal de invierno que en la zona se suele dar en mayo. Se observa mayor vigor en el cereal de los municipios de la margen norte de la laguna (Gallocanta, Berrueco y Tornos). En la margen sur, el máximo vigor se concentra entre los abanicos, a lo largo de la Rambla de Los Pozuelos.

8.1. Diferencias de NDVI entre municipios y entre fechas

De todas las fechas de primavera disponibles se ha analizado el NDVI de las correspondientes a la primera quincena de mayo de los años 2001 y 2010. El año 2001 es seco y no se han producido precipitaciones los días anteriores a la adquisición de la imagen. El año 2010 es pluviométricamente normal y se han registrado 13.1 mm y 24.6 mm los cinco y quince días previos a la toma de la imagen, respectivamente (Tabla 5).

La Figura 15 muestra los valores de NDVI por municipio en 2001. No se observan diferencias significativas de NDVI entre los cinco municipios. La mediana es ligeramente superior a 0.5 en todos los municipios excepto en Las Cuerlas. Este municipio tiene una mediana de NDVI ligeramente inferior a 0.5 y presenta algunos valores extremos positivos. Bello presentan mayor dispersión de los valores de NDVI lo que puede corresponder a una mayor variabilidad de tipos de cubierta (Mapa 4). Berrueco y Gallocanta presentan un considerable conjunto de valores extremos muy bajos, cercanos a 0. Estos municipios incluyen una superficie importante de monte cuya vegetación produce valores bajos de NDVI.

El elevado valor medio del NDVI confirma que el cereal de invierno se encuentra en un buen estado de desarrollo. Además, la ausencia de precipitaciones los días previos a las imágenes facilita la interpretación del NDVI.

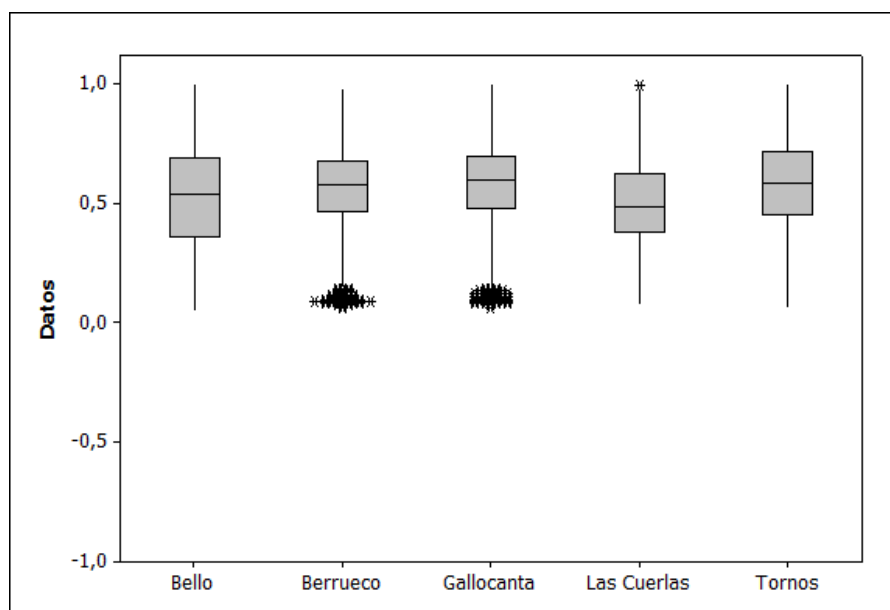


Figura 13. Diagrama de cajas con los valores de NDVI obtenidos para cada municipio en 2001. El límite inferior de cada una de las cajas muestra el 25%, la línea dentro de las cajas es la mediana, y la línea superior el cuartil 75%. Las cajas muestran el conjunto principal de los datos, y los asteriscos los valores atípicos.

La Figura 14 muestra los valores de NDVI por municipio en 2010, con valores medios inferiores a los del año 2001 y con mayor diferencia entre municipios. Berrueco, Gallocanta y Tornos presentan mayor dispersión de NDVI. Berrueco y Gallocanta presentan gran similitud en la distribución de valores aunque son ligeramente más elevados en Berrueco; ambos municipios destacan por sus escasos valores extremos positivos, relacionables con cultivos de alto vigor y muy diferentes del NDVI de la zona forestal en la Sierra de Valdelacasa, que forma parte de ambos municipios.

Bello y Las Cuerlas, en la margen sur de la laguna, presentan una distribución similar con gran cantidad de datos extremos positivos. En Bello, estos altos valores de NDVI se dan en cultivos bien desarrollados próximos a la Rambla de los Pozuelos y en la zona de los lagunazos; Las Cuerlas presenta alto NDVI en el pastizal del Monte del Coscojar.

Tornos destaca por su gran volumen de valores extremos positivos y negativos. Los altos valores de NDVI corresponden al cereal bien desarrollado, mientras que los mínimos están relacionados con praderas de halófitos de escaso recubrimiento y áreas inundadas próximas a la laguna.

En general, el menor valor del NDVI en esta fecha podría relacionarse con un menor desarrollo del cultivo, pero también podría estar influenciado por la lluvia caída los días previos a la imagen en 2010.

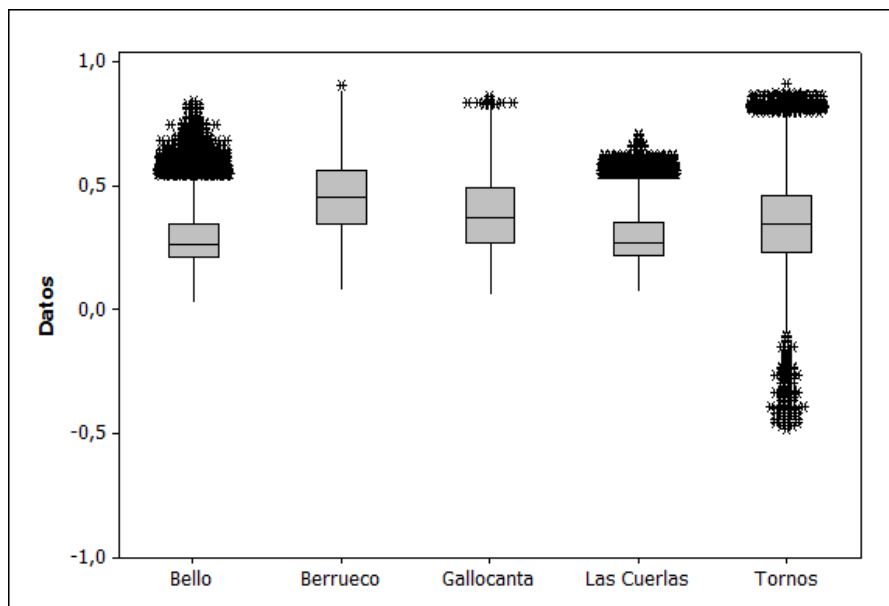


Figura 14. Diagrama de cajas con los valores de NDVI obtenidos para cada municipio en 2010. El límite inferior de cada una de las cajas muestra el 25%, la línea dentro de las cajas es la mediana, y la línea superior el cuartil 75%. Las cajas muestran el conjunto principal de los datos, y los asteriscos los valores atípicos.

El NDVI de las seis imágenes de primavera se ha reclasificado en 5 clases de vigor vegetal/densidad de recubrimiento. La clasificación se ha establecido manualmente dadas las distribuciones generalmente bimodales observadas en los histogramas de los histogramas. Se han aplicado los mismos umbrales entre clases a todas las fechas para que las imágenes clasificadas resultantes fueran comparables.

En el Figura 15 se presenta como ejemplo los NDVI de los municipios de Tornos y de Gallocanta en las diferentes fechas analizadas. La frecuente acumulación de valores externos negativos en Tornos corresponde a zonas inundadas o encharcadas. Se observan diferencias en el vigor de la vegetación entre fechas y también entre municipios.

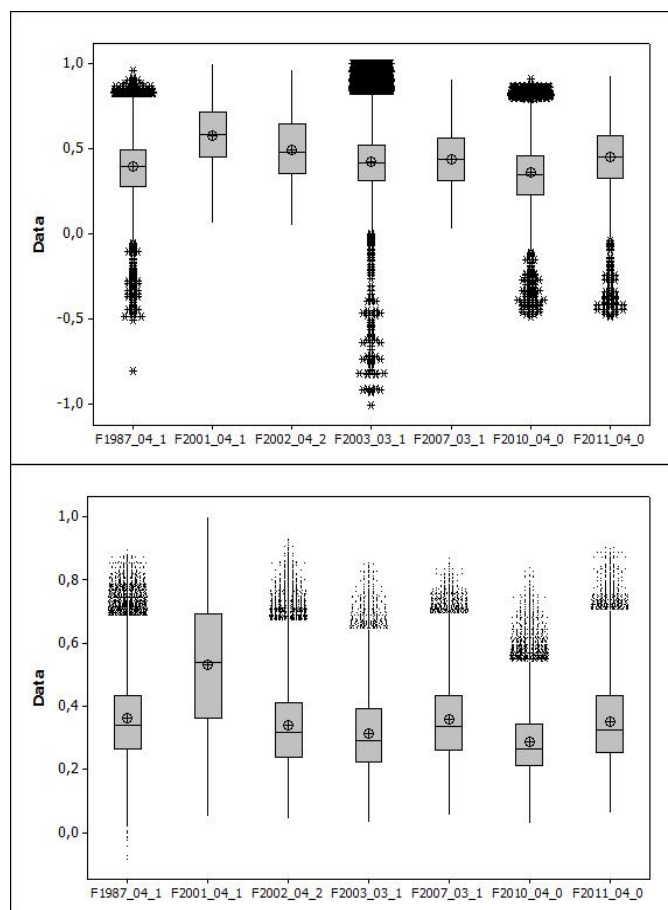


Figura 15. NDVI en el municipio de Tornos (arriba) y Gallocanta (abajo) en las fechas de primavera analizadas.

En los mapas del anejo 6 también se observan claras diferencias de NDVI entre fechas, especialmente entre los municipios de la margen norte de la laguna, al pie de la sierra (Gallocanta, Berrueco y Tornos) y los de la margen sur que se extienden en los abanicos aluviales (Bello y Las Cuerlas) .

8.2. Diferencias de la variable Humedad de TTC entre fechas y municipios

Se dispone de siete imágenes de reflectividad de otoño entre los años 1984 y 2011, cuatro de ellas adquiridas en octubre y tres en septiembre. Análogamente al método de clasificación del NDVI, la variable Humedad se ha clasificado en cuatro categorías para identificar la distribución espacial de este índice, su evolución temporal, y relacionarlo con las características del territorio.

Como soporte de análisis se ha examinado la combinación RGB 543 para resaltar las características del suelo (Anejo 7) La vegetación aparece en tono verde, más intenso cuanto más vigoroso o denso. La tonalidad violácea aparece en los suelos, desnudos en otoño, con tonos más oscuros cuanto mayor sea la humedad porque disminuye su respuesta espectral.

En la Figura 1 se muestran las estadísticas de la variable Humedad de los años 1984 y 2009, ambas adquiridas en octubre, la primera a finales y la segunda a comienzos de mes. El año 1984 es normal desde el punto de vista de las lluvias, y la precipitación previa a la fecha de adquisición es mínima. La mediana se sitúa en el valor 0.1. El año 2009 se clasifica como normal (Tabla 5) aunque se han registrado 14 mm los cinco días previos a la toma de la imagen. Apenas se registran valores negativos en los municipios.

Apenas se observan diferencias entre municipios para una misma fecha. Sí se observan diferencias entre fechas, con presencia de valores extremos negativos en 1984, fecha en la que se espera que el terreno esté más seco. No se dispone de datos de campo para valorar estas diferencias, pues son varios los factores que pueden influir en la respuesta espectral de la superficie del suelo y, por ende, en el valor de este índice (por ejemplo: humedad del suelo y de la vegetación, rugosidad, textura, etc.).

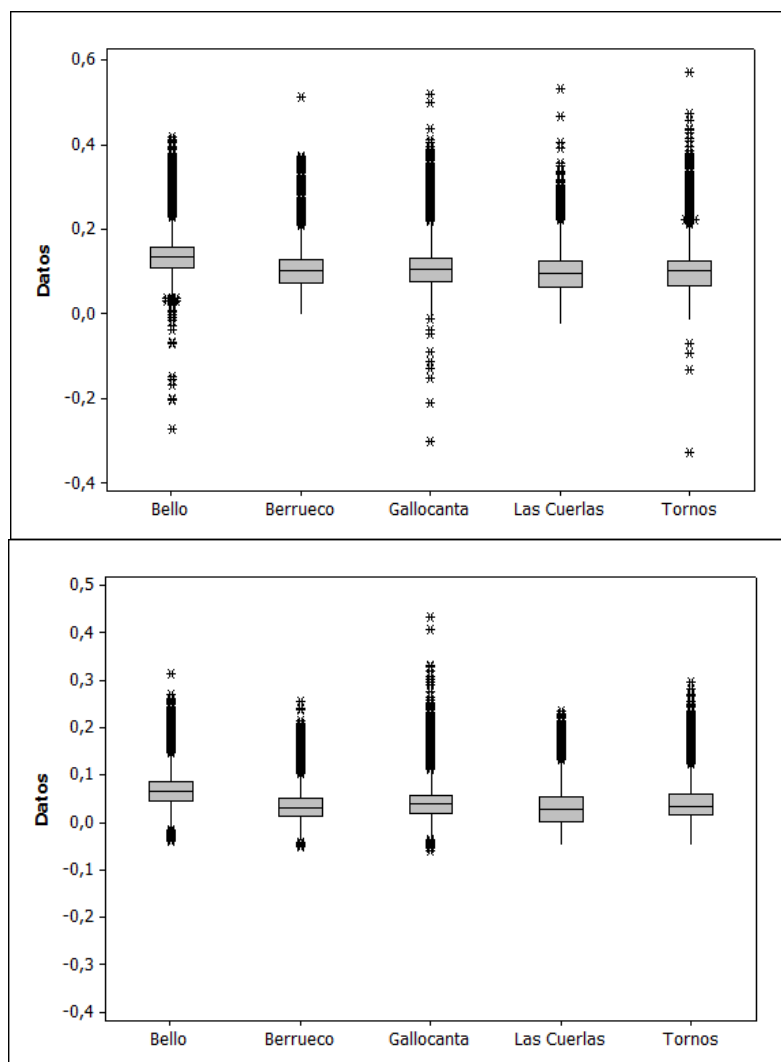


Figura 16. Variable Humedad obtenida para cada municipio a partir de la transformación Tasseled Cap de octubre de 1984 (arriba) y octubre de 2009 (abajo).

En el anejo 8 se muestran los mapas de la variable Humedad reclasificada en cuatro categorías, para las 6 fechas de otoño.

9. Conclusiones

La metodología presentada en este trabajo es útil para cartografiar el uso agrícola y caracterizar su variabilidad mediante índices extraídos de imágenes de satélite. La automatización del procesamiento de series de imágenes ha sido ventajosa en el estudio de la Laguna de Gallocanta y su entorno agrícola.

El programa desarrollado para el tratamiento de imágenes Landsat ha permitido agilizar una parte importante de trabajo, imprescindible en teledetección aplicada al seguimiento del territorio mediante series de imágenes. El desarrollo de funcionalidades programables en un entorno SIG común como ArcGIS, promueve la difusión de herramientas aplicadas y su posible mejora a través de la respuesta de los usuarios.

La integración de datos del terreno con datos de satélite ha resultado imprescindible para la interpretación de las imágenes y es clave para una adecuada gestión del territorio.

La metodología propuesta, basada en el empleo del NDVI y la variable Humedad de TTC proporciona una base consistente para el seguimiento del cultivo en el ámbito de protección del humedal y puede aplicarse en el entorno agrícola de otros humedales protegidos de Aragón, como Chiprana, Monegros y Sariñena, tanto en zonas de secano como en regadío.

Sería interesante completar el estudio con imágenes y datos de campo simultáneos, así como explorar las posibilidades que ofrecen la incorporación de otras fechas o sensores.

10. BIBLIOGRAFÍA

Referencias citadas

- Castañeda, C., Herrero, J. (2009). Teledetección de cambios en la Laguna de Gallocanta. Pp 105-128. En M.A. Casterad y C. Castañeda (eds.) La Laguna de Gallocanta: medio natural, conservación y teledetección. Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural, 2ª época, Tomo VII, 2009. 146 pp. ISBN: 978-84-936677-4-0.
- Castañeda, C., Gracia, F.J., Luna, E., Rodríguez-Ochoa, R. 2015. Edaphic and geomorphic evidences of water level fluctuations in Gallocanta Lake, NE Spain. *Geoderma* 239–240, 265–279.
- García-Vera, M.A., Martínez-Cob, A., 2004. Evolución del contenido de humedad y de la tasa de evaporación en humedales: aplicación a la Laguna de Gallocanta. 2004-PH-14-I, Zaragoza, Spain. Disponible en: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/2976/1/InformeGallocanta2004-DEF.pdf>.
- Chander, G., Markham, B. (2003) Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (11), Accesible en: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/pdfs/L5TMLUTIEEE2003.pdf>
- Chander, G., Markham, B. L., Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113, 893-903.
- Chavez, P.S. Jr. (1996). Image-based atmospheric corrections-revisited and revised. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62 (9), 1025-1036.
- Chuvieco, E. (2010) Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Tercera Ed. Revisada, Barcelona. Editorial Ariel. ISBN 978-84-344-3498-1. 528 pp.
- Crist, P., Cicone, R.C. 1984. A physically based transformation of Thematic Mapper data-The TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, GE-22, 256-263.
- Gracia, F.J., 1995. Shoreline forms and deposits in Gallocanta Lake (NE Spain). *Geomorphology* 11, 323–335.
- Gracia, F.J. (2009) Geología y geomorfología de la Laguna de Gallocanta. Cádiz, Dpto. de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz. *Revistamemorias Real Sociedad Española de Historia Natural* 2º época, Tomo VII. ISBN: 978-84-936677-4-0. Páginas: 61-78.
- Gracia, F.J., 2014. Gallocanta Saline Lake, Iberian Chain. En: Gutiérrez, F., Gutiérrez, M. (Eds.), *Landscapes and Landforms of SpainWorld Geomorphological Landscapes*. Springer Science + Business Media, Dordrecht, pp. 137–144.

- Huang, C., Wylie, B., Yang, L., Homer, C., Zylstra, G. (2002). Derivation of a Tasseled Cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. *International Journal of Remote Sensing* 23, 1741-1748
- Kauth, R.J., Thomas, G.S. (1976). The tasseled Cap -- A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University of West Lafayette, Indiana, pp. 4B-41 to 4B-51.
- Liso, M., Ascaso, A., 1969. Introducción al estudio de la evaporación y clasificación climática de la cuenca del Ebro. *Anal. de la Estación Experimental de Aula Dei*, 10.
- Luna, E., Latorre, B., Castañeda, C. 2014. Rainfall and the presence of water in Gallocanta Lake. *Proceedings of the IX European Wetland Congress, Wetlands Biodiversity and Services: Tools for Socio-Ecological Development*, pp. 164.
- Pérez, E., 2014. Recordando Gallocanta, 1972–1984. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural, Sección Biología*, 108, 107–123 (<http://historia.bio.ucm.es/rsehn/index.php?d=publicaciones&num=34&w=242&ft=1>).
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, 309-317.

Otro material consultado

▪ Medio ambiente y geología y cultivos

Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España. NIPO: 770-10-151-X. Consultado en: <http://www.magrama.gob.es/es/agricultura/publicaciones/publicaciones-fertilizantes.aspx>

Estándares cartográficos y de manejo de Información gráfica para mapas geológicos departamentales y planchas esc 1:100.000. Versión 1.1. (2001) Instituto de investigación e información geocientífica, minero-ambiental y nuclear. Subdirección de reconocimientos geocientíficos. Consultado en: <http://www.sgc.gov.co/getattachment/c8f99f4b-a47d-454a-9b2e-b75fe00641fa/Estandares-cartograficos-mapas-geologicos---depart.aspx>

Pérez, F., Orozco, M.T., Gozález, M.I. (2012) Modelo de datos de la cartografía geológica MAGNA en formato digital. Versión 3.0. Madrid. Instituto Geológico y Minero de España. Infraestructura Geocientífica y servicios, sistemas de información geocientífica. Consultado en: http://info.igme.es/cartografia/magna50/IT_2012_01.pdf

▪ Material didáctico

Pérez-Cabello, F. (2014) Material didáctico de la asignatura: *4.2. Tratamiento digital de imágenes de satélite*. Máster en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del territorio: SIG y Teledetección, Universidad de Zaragoza.

Rodrigues, M. (2014) Material didáctico de la asignatura: 3.6. *Arcpy_Python*. Máster en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del territorio: SIG y Teledetección, Universidad de Zaragoza.

Rodrigues, M. (2013) Material didáctico de la asignatura: 3.6. *Python_ArcPy*. Máster en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del territorio: SIG y Teledetección, Universidad de Zaragoza.

Rodrigues, M. (2013) Material didáctico de la asignatura: 3.5.R. Máster en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del territorio: SIG y Teledetección, Universidad de Zaragoza.

▪ **Legislación:**

BOA núm. 22 de 22 de Febrero de 2006. Decreto 42/2006 de 7 de Febrero, Gobierno de Aragón, por el que se aprueba definitivamente el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de la Laguna de Gallocanta. Consultado en: http://noticias.juridicas.com/base_datos/CCAA/ar-d42-2006.html

BOE-A-2007-15822. Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España. Consultar en: <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-15822>

▪ **Trabajos Fin de Máster**

Eito, O. (2013) *Análisis de las posibilidades que ofrecen Landsat y DEIMOS para optimizar el manejo del riego en parcelas*. Trabajo fin de master. Zaragoza, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza.

Sangines, D.E. (2013) *Metodología de evaluación de la isla de calor urbana y su utilización para identificar problemáticas energéticas y de planificación urbana*. Tesis doctoral. Zaragoza, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza.

Palomo, M. (2012) *Modelización del cálculo de Indicadores Ambientales, a partir de sensores ópticos de alta resolución temporal a bordo de satélite*. Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad politécnica de Madrid.

▪ **Páginas web**

ESRI: *ArcGIS Resouce Center, Deskopt 10*. Disponible en: <http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/> [acceso 20 de octubre de 2014]

NASA: *Science Data Users Handbook, Landsat 7*. http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_prod/prog_sect11_3.html [acceso 20 de octubre de 2014]

USGS: *Frequently Asked Questions about the Landsat Missions*. http://landsat.usgs.gov/descriptions_for_the_levels_of_processing.php.

<http://www.seo.org/2012/04/13/conoce-las-medidas-agroambientales/>

11. Anejos

Anejo 1. Sobre las medidas agroambientales de la Laguna de Gallocanta

	Medida	
1. Fomento de la biodiversidad	1.1.	Mantenimiento del rastrojo
	1.2.	Cultivo de la esparceta para el mantenimiento de la fauna esteparia
	1.3.1.	Generación de alimento para la avifauna de los agrosistemas del Área de Influencia Socioeconómica de la Reserva Natural Dirigida de la Laguna de Gallocanta
	1.3.2.	Generación de alimento para la avifauna de los agrosistemas de las Zonas de Gallocanta fuera del PORN
	1.3.3.	Generación de alimento para la avifauna de los agrosistemas en otras zonas Red Natura 2000
	1.4.	Retirada de tierras de cultivos herbáceos de secano en zonas perilagunares de Reservas Naturales
	1.5.	Protección de arbolado no productivo en la explotación en zonas Red Natura 2000
	1.6.	Conservación y creación de márgenes en la explotación en zonas de Red Natura 2000
	1.8.1.	Generación de corredores biológicos entre la Red Natura 2000.
	1.8.2.	Generación de corredores biológicos en zonas presencia de fauna
	1.8.3.	Generación de corredores biológicos entre algunas zonas de la Red Natura 2000 de Zaragoza con alta presencia de aves esteparias
	1.9.1.	Compatibilización de la agricultura con la alta presencia de mamíferos silvestres
	1.9.2.	Compatibilización de la agricultura con la media presencia de mamíferos silvestres.
	1.10.	Pastoreo de equino extensivo de aptitud cárnica y asnal en Red Natura 2000.
2. Producción integrada	2.1.	Producción integrada en herbáceos de secano.
	2.2.	Producción integrada en herbáceos de regadío.
	2.3.	Producción integrada en arroz.
	2.5.	Producción integrada en frutales de regadío.
	2.6.	Producción integrada en hortícolas al aire libre.
3. Agricultura ecológica	3.1.	Agricultura ecológica en herbáceos de secano.
	3.2.	Agricultura ecológica en herbáceos de regadío.
	3.3.	Agricultura ecológica en arroz.
	3.4.	Agricultura ecológica en frutales de regadío.
	3.5.	Agricultura ecológica en hortícolas al aire libre.
	3.6.	Agricultura ecológica en frutos secos y frutales de secano.
	3.7.	Agricultura ecológica en olivar.
	3.8.	Agricultura ecológica en viñedo para vinificación.
	3.9.	Agricultura ecológica en cultivos de viñedo de zonas semiáridas y pendiente pronunciada.
4. Extensificación de la producción agraria	4.1.	Mantenimiento del pastoreo de rastrojeras.
	4.2.	Mantenimiento del pastoreo en prados y pastizales
	4.3.	Mantenimiento de prados de siega en zonas de montaña
	4.4.	Mantenimiento de razas autóctonas españolas de protección en zonas de biodiversidad frágil
	4.5.	Mantenimiento de la apicultura para la mejora de la polinización en zonas de biodiversidad frágil

Anejo 2. Datos complementarios de las imágenes Landsat empleadas

Nombre_imagen	Sensor	Fecha	Sun elevation	Sun azimiut	% Nub es	Pasada
LE71990322000253EDC00	ETM	2000-09-09	49.78313807	145.39730047	9	199-032
LE71990322001255EDC00	ETM	2001-09-12	48.69879680	145.64804405	2	199-032
LE71990322002114EDC00	ETM	2002-04-24	56.27271500	138.17279033	2	199-032
LE71990322003069SGS00	ETM	2003-03-10	39.76942171	146.19658034	0	199-032
LE72000322001102EDC00	ETM	2001-04-12	52.58393707	141.24887655	0	200-32
LT51990321984297XXX04	TM	1984-10-23	33.73372429	151.96122972	0	199-032
LT51990321990249AAA03	TM	1990-09-06	46.99143819	133.93291284	0	199-032
LT51990322007072MPS01	TM	2007-03-13	41.52926277	147.55723784	0	199-032
LT51990322010096MPS00	TM	2010-04-06	50.47261802	142.72898630	21	199-032
LT51990322011099MPS00	TM	2011-04-09	51.34325818	141.83478940	0	199-032
LT52000321987104XXX02	TM	1987-04-14	49.51704060	131.93994699	0	200-32
LT52000322003260MTI01	TM	2003-09-17	46.13723085	143.75347754	0	200-32
LT52000322007271MPS00	TM	2007-09-28	44.15037895	152.46579092	0	200-32
LT52000322009276MPS00	TM	2009-10-03	42.03884837	153.11033581	0	200-32
LT52000322010295MPS00	TM	2010-10-22	35.74714193	157.26850776	17	200-32
LT52000322011282MPS00	TM	2011-10-09	40.03366960	153.98765906	0	200-32

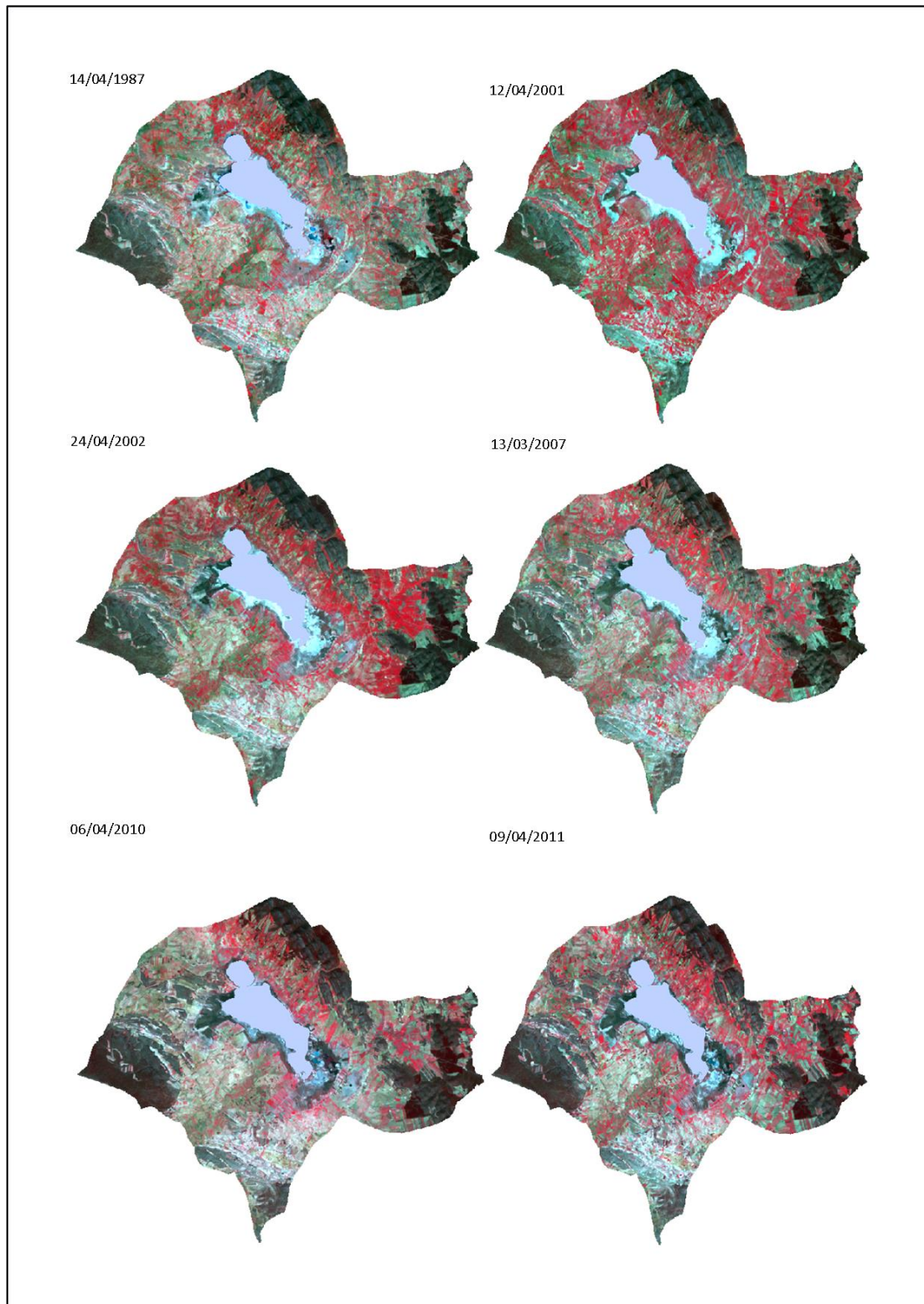
Anejo 3. Coeficientes de calibración para Landsat 5TM y 7ETM+ según Chander, et al. (2009)

	Landsat 5 (1 de marzo de 1984 a 4 de mayo de 2003))				Landsat 5 (después del 5 de mayo de 2003					
	$LMAX_{\lambda}$	$LMIN_{\lambda}$	$G_{Rescale}$	$B_{rescale}$	$LMAX_{\lambda}$	$LMIN_{\lambda}$	$G_{Rescale}$	$B_{rescale}$	Q_{Calmax}	Q_{Calmin}
1	152.1	-1.52	0.671339	-1.52	193	-1.52	0.762824	-1.52	255	1
2	296.81	-2.84	1.175100	-2.84	365	-2.84	1.442510	-2.84		
3	204.3	-1.17	0.805765	-1.17	264	-1.17	1.039880	-1.17		
4	206.2	-1.51	0.814549	-1.51	221	-1.51	0.872588	-1.51		
5	27.19	-0.37	0.108078	-0.37	30.2	-0.37	0.119882	-0.37		
6	15.303	1.2378	0.055158	1.2378	15.303	1.2378	0.055158	1.2378		
7	14.38	-0.15	0.056980	-0.15	16.5	-0.15	0.065294	-0.15		
	Landsat 7 Low gain				Landsat 7 high gain					
	$LMAX_{\lambda}$	$LMIN_{\lambda}$	$G_{Rescale}$	$B_{rescale}$	$LMAX_{\lambda}$	$LMIN_{\lambda}$	$G_{Rescale}$	$B_{rescale}$		
1	293.7	-6.2	1.180709	-7.38	191.6	-6.2	0.778740	-6.98		
2	300.9	-6.4	1.209843	-7.61	196.5	-6.4	0.798819	-7.20		
3	234.4	-5.0	0.942520	-5.94	152.9	-5.0	0.621654	-5.62		
4	241.1	-5.1	0.969291	-6.07	157.4	-5.1	0.639764	-5.74		
5	47.57	-1.0	0.191220	-1.19	31.06	-1.0	0.126220	-1.13		
6	17.04	0.0	0.067087	-0.07	12.65	3.2	0.037205	3.16		
7	16.54	-0.35	0.066496	-0.42	10.80	-0.35	0.043898	-0.39		
	243.1	-4.7	0.975591	-5.68	158.3	-4.7	0.641732	-5.34		

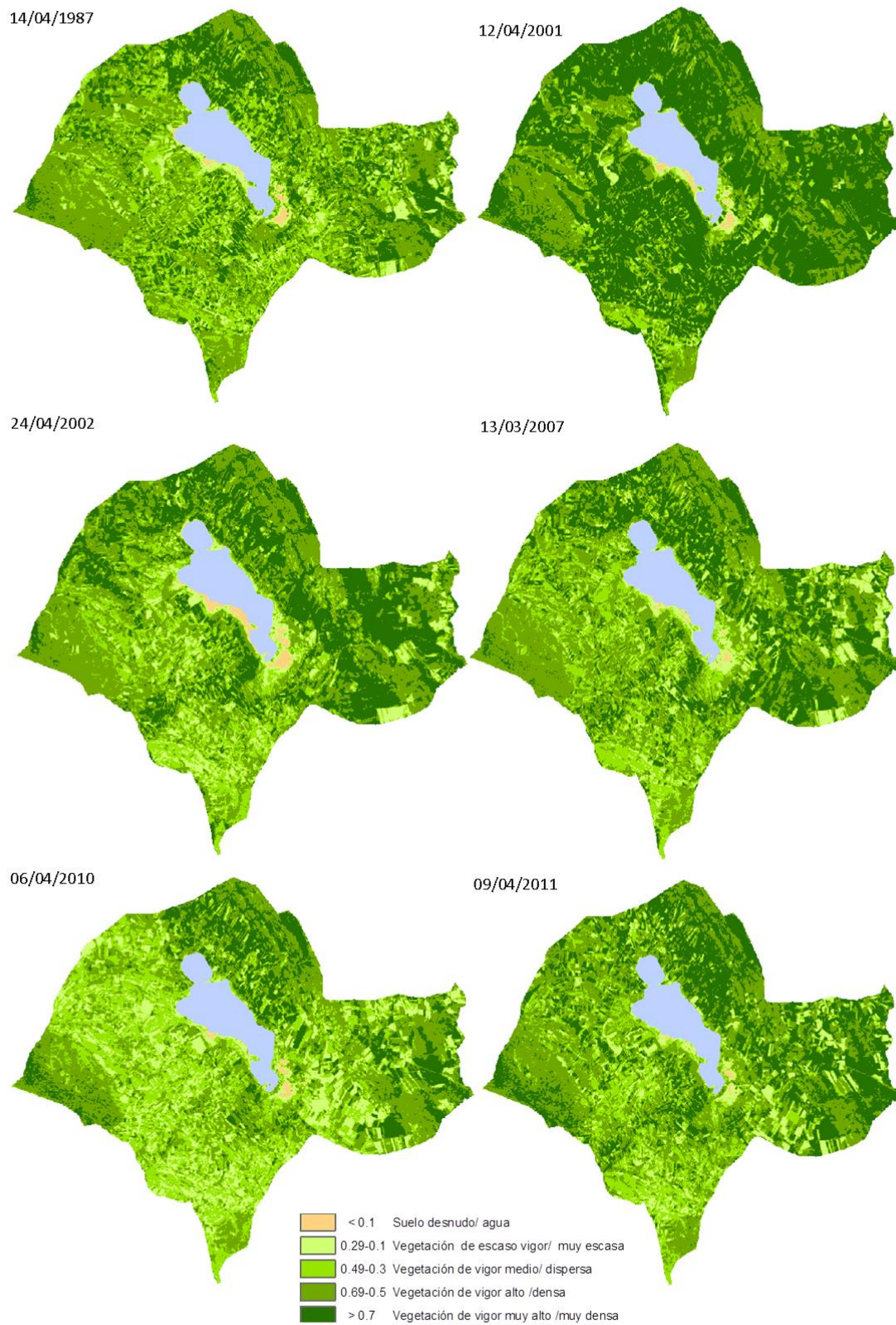
Anejo 4. Coeficientes Tasseled Cap

Sensor		Banda1	Banda2	Banda3	Banda4	Banda5	Banda7
Landast 5 TM	Brillo	0.2909	0.2493	0.4806	0.5568	0.4438	0.1706
	Verdor	-0.2728	-0.2174	-0.5508	0.7220	0.0733	-0.1648
	Humedad	0.1446	0.1761	0.3322	0.3396	-0.6210	0.4186
Landast ETM+	Brillo	0.3561	0.3972	0.3904	0.6966	0.2286	0.1596
	Verdor	-0.3344	-0.3544	-0.4556	0.6966	-0.0242	-0.2630
	Humedad	0.2626	0.2141	0.0926	0.0656	-0.7629	-0.5388

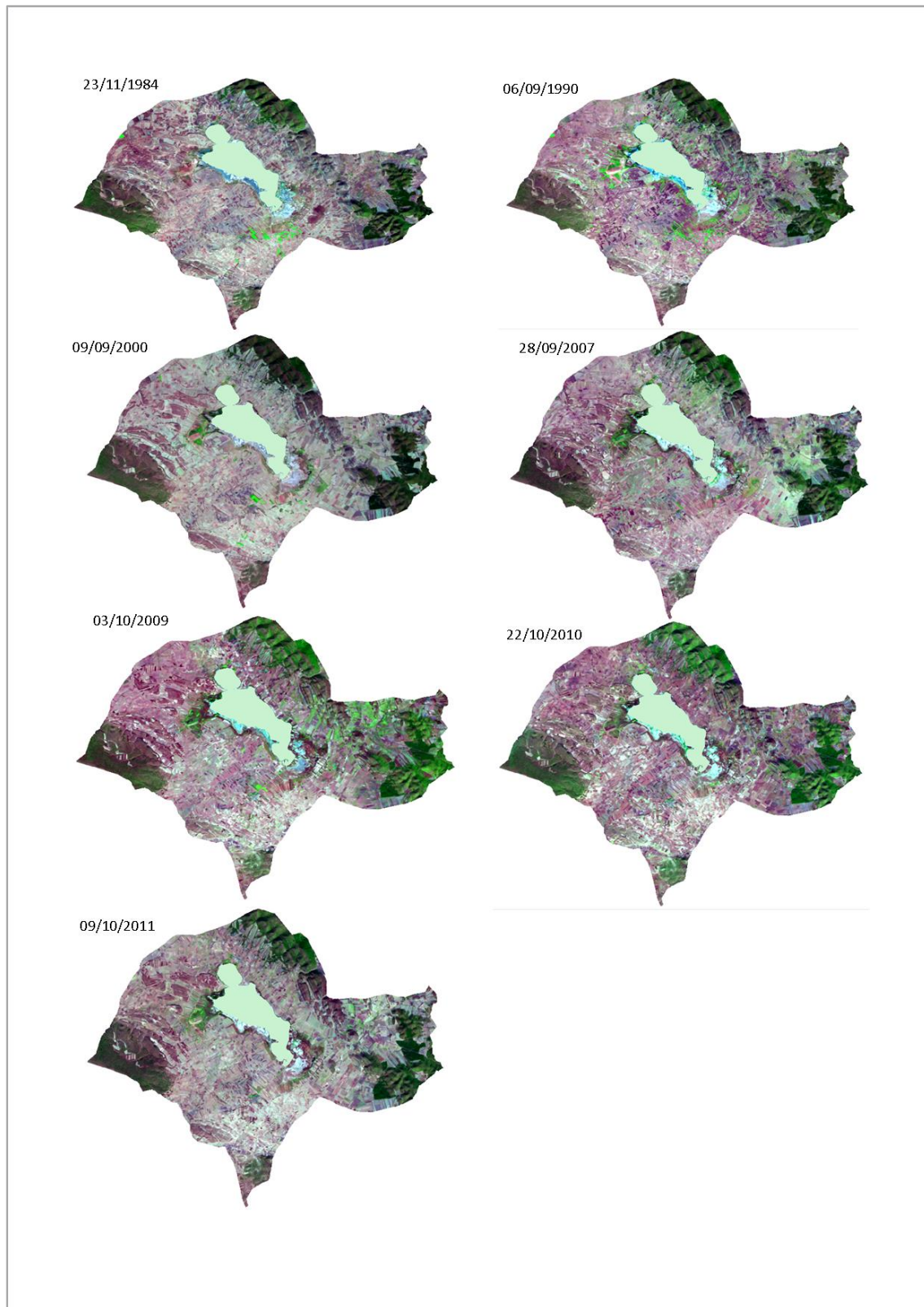
Anejo 5. Imágenes de primavera de la zona de estudio, en falso color RGB 453



Anejo 6. NDVI de la zona de estudio obtenido para seis fechas de primavera y reclasificado en 5 categorías.



Anejo 7. Imágenes de otoño de la zona de estudio, en falso color RGB 543



Anejo 8. Variable Humedad de la zona de estudio obtenida para las fechas de otoño y reclasificada en 4 categorías

