

Ejemplar nº6
Diciembre 2005

Boletín SIMANCTEL

Sistema Múltiple de Análisis de los Cultivos por Teledetección

Sistema Integrado de Información Agraria

Servicio de Estudios y Estadísticas



1. Introducción

En el año 1988 la Comisión Europea aprobó la creación del proyecto MARS (Monitoring Agriculture by Remote Sensing), para promover la investigación y aplicación de la teledetección en la obtención de estadísticas agrícolas. Sus principales actividades se centraron en la estimación cuantitativa de la superficie ocupada por los cultivos en una región o país dado, estado del cultivo, predicción de producciones medias por países y estimaciones rápidas de la producción total europea para los cultivos más importantes. Este proyecto propició el desarrollo y la implantación del modelo agro meteorológico CGMS (Crop Growth Model Simulation) que genera en la actualidad predicciones de cosecha para la EU 25 y países satélites. Este proyecto está liderado por el equipo MARS-STAT (<http://agrifish.jrc.it/marsstat/default.htm>) con sede en Ispra (Italia), encuadrado dentro de la denominada Agrifish Unit del Joint Research Centre de la Dirección General de la Comisión.

A partir de la experiencia acumulada por este proyecto y tras analizar las posibilidades reales de implantación en nuestra comunidad, se ha iniciado la adaptación de este tipo de modelo dentro de SIMANCTEL (**Sistema Múltiple de Análisis de los Cultivos por Teledetección**) en SIIA. Lo realmente novedoso reside en el aprovechamiento real y efectivo de la teledetección que, en conjunción con otros orígenes de datos, va a generar nuevas fuentes de información, inexistentes en la actualidad. Como fines prioritarios, SIMANCTEL busca asistir con información técnica en los procesos de toma de decisiones, apoyar la sostenibilidad de nuestra agricultura, así como aportar información en el corto plazo de la realidad agrícola de nuestra región a agricultores y usuarios en general.

Como resultado final, se espera generar un conjunto de predicciones ó expectativas de producción, disponibles desde diferentes modelos derivados de la propia estimación cuantitativa del CGMS, indicadores de vegetación, análisis estadísticos de tendencia, valoraciones de riesgo meteorológico, etc. La fiabilidad de los resultados finales vendrá dada por la confianza de la estimación de cada parámetro que entra en el cálculo y por el proceso de formulación del proceso, que tiene su propia inexactitud por la acumulación de errores en la producción final estimada. A través del análisis dinámico de los distintos escenarios se pretende ejercer un proceso continuo de mejora del conocimiento sobre el sistema.

Ya que el punto de inicio se fundamenta sobre los acontecimientos pasados desde el punto de vista "normal" o de condiciones medias, hay que tener en cuenta la experiencia de los analistas para identificar situaciones en las que la producción puede ser significativamente reducida por debajo del potencial debido al clima y ajustar el proceso de auto-conocimiento antes mencionado.

Entre los principales retos que hemos de afrontar están:

- o Escala: la extrapolación de los resultados de los puntos o enclaves de información y su traslación al ámbito regional puede no ser siempre acertada.
- o Falta de información, por ejemplo, de prácticas de laboreo y cultivo.
- o Falta de precisión del mapa de suelos (determinación de la capacidad de campo, la profundidad del suelo y del sistema radicular) y de la red de estaciones disponibles (huecos geográficos o "agujeros negros" de información).
- o Falta de disponibilidad en tiempo real de los datos meteorológicos.

Se pretende generar las primeras estimaciones lo largo del año 2006. Estas habrán de ser revisadas en tiempo cercano al real y los ajustes a la realidad serán de nuevo revertidos al sistema dentro del proceso de agregación de la información y tener de esta manera en cuenta el sesgo del análisis. Desde esta tribuna, aprovechamos para pedir la participación de todos los implicados para realizar cuantas aportaciones y mejoras estimen oportunas.

Es también reseñable el hecho de que para llegar a constituir el producto final deseado se va a producir gran cantidad de información intermedia que en sí son productos finalistas, como por ejemplo los mapas de variables climáticas.

CONTENIDOS

1. Introducción
2. Algunos apuntes sobre el modelo WOFOST-CGMS
3. La calibración y el proceso de ajuste a las condiciones andaluzas
 - 3.1. Fase meteorológica
 - 3.2. Fase de adaptación edafológica
 - 3.3. Fase de calibración de los cultivos herbáceos
4. El mapa de cultivos con base de ocupación parcelaria y/o recintos
 - 4.1 Análisis de las imágenes satélite en conjunción con los mapas de cultivos
5. Los herbáceos de secano en la campaña 2004/2005 desde SIMANCTEL
 - 5.1. Las heladas
 - 5.2. La precipitación
 - 5.3. Resultados y Análisis

2. Algunos apuntes sobre el modelo WOFOST-CGMS

El CGMS se fundamenta en el modelo WOFOST, de tipo mecanicista, que trata de explicar el crecimiento de un cultivo sobre la base de la conjunción de varios procesos fisiológicos influenciados por las condiciones climatológicas. El actual WOFOST se encuentra en permanente desarrollo y mejora por la empresa holandesa ALTERRA, antigua DLO-Winand Staring Centre.

Para trasponer las clásicas situaciones puntuales generadas por los modelos tradicionales, WOFOST se sirve de CGMS para generar la espacialización y extensificación de datos a nivel regional. En último término, el sistema pretende generar estimaciones de productividad de varios cultivos herbáceos, en tiempo cercano al real. La actual adaptación se está centrando en trigo duro, trigo blando, cebada, girasol, arroz, algodón y maíz aunque no se descarta la introducción de otros cultivos si la dinámica, evolución e importancia de los mismos así lo requiriera.

Para la construcción de un modelo agro meteorológico es necesario dividir el sistema de desarrollo del cultivo en subsistemas, de modo que los diversos procesos involucrados puedan ser modelados independientemente. Los tres subsistemas básicos son la planta (fisiología y morfología del cultivo), el suelo y el clima. En el subsistema planta, la asimilación neta de biomasa depende de la cantidad de luz interceptada y esta a su vez del área foliar y del nivel de radiación incidente. La biomasa generada se reparte entre sus dos usos básicos, mantenimiento de la planta y órganos de reserva. WOFOST estima una serie de variables biológicas que son utilizadas como predictoras del rendimiento, con y sin limitación de agua. En el subsistema suelo se modela el movimiento del agua y la evapotranspiración, y se lleva a cabo un balance hídrico. El clima se caracteriza a través de las variables temperatura máxima y mínima, pluviometría, evapotranspiración, presión de vapor, radiación solar y velocidad del viento.

3. La calibración y el proceso de ajuste a las condiciones andaluzas

El caso belga (Belgian-CGMS) supone la adaptación más cercana del modelo general a una situación particular. Sin embargo, aunque en absoluto es despreciable el ejemplo como referencia, no es menos cierto que este país representa la tercera parte del territorio de Andalucía, con condiciones climatológicas mucho más constantes y menos extremas de las que se pueden encontrar en nuestra región.

Antes de continuar, es importante resaltar que a fin de organizar toda la información desde el punto de vista espacial, el territorio se ha dividido en una malla de cuadrículas de 5 Km x 5 Km (Figura 1), de manera que toda predicción vendrá determinada y referenciada por su número de celdilla. Para cada unidad mínima espacial o celdilla se ha de poseer información de: superficie y cultivo de interés, calendario de cultivos, tipos de suelo, variables meteorológicas e índices correctores de situación generados por teledetección. Este será el nivel mínimo de información a partir del cual se van a construir las estimaciones de cualquiera de los parámetros que se generen. Sin embargo las predicciones de la campaña agrícola se agregarán a nivel de municipio, comarca agrícola y provincia para que de esta manera sean representativas y comparables desde el punto de vista administrativo. Como es fácil de entender, esto supone manejar una ingente cantidad de información que aunque se produzca de forma semiautomática, finalmente ha de ser supervisada por los analistas, ya sea de manera global o particular, para asegurar o al menos conocer las posibles desviaciones que se produzcan respecto de la realidad.

Para lograr alcanzar los resultados esperados en los próximos años, se han definido una serie de etapas que, en la actualidad, se están llevando de manera convergente, ya que están interrelacionadas entre sí. Las actuaciones en marcha se definen como fase de calibración meteorológica, edafológica y de cultivos.

3.1. Fase meteorológica

Ya que las condiciones climáticas condicionan el desarrollo de los cultivos, en sus diferentes fases, es absolutamente necesario disponer, con frecuencia diaria y de manera automática, de las variables de mayor interés desde el punto de vista agronómico: Temperatura máxima y mínima, Precipitación, Humedad relativa, Radiación y Velocidad del viento. Esta información agroclimática, a nivel de toda la comunidad autónoma de Andalucía, se puede obtener de tres redes de estaciones meteorológicas, que sirven datos en "tiempo real" para todas las variables necesarias: Instituto Nacional de Meteorología (INM), Red de Alerta e Información Fitosanitaria (RAIF) y Red de Información Agroclimática (RIA). La información procedente del INM va a ser derivada a partir del proyecto CLIMA de la Consejería de Medio Ambiente que aglutina en un único servidor de datos todas las estaciones disponibles en Andalucía. En total y para el futuro, suman 287 observatorios (Tabla 1 y Figura 2), después de analizar sus emplazamientos y de excluir, por ejemplo, observatorios situados en suelo urbano para la variable temperatura, debido al efecto de "isla de calor" que se produce en los grandes núcleos de población.

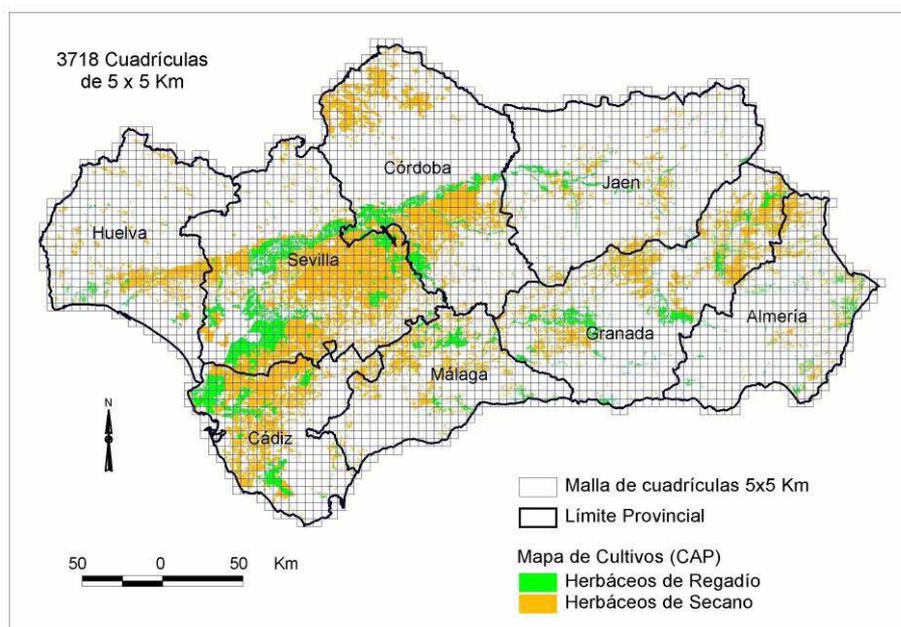


Figura 1. Organización del territorio para su aprovechamiento en SIMANCTEL

Organismo	Red	Nº Estaciones	Variables	Difusión Diaria T.Real
CAP	Red de Información Agroclimática (RIA)	89	Todas	SI
	Red de Alerta e Información Fitosanitaria (RAIF)	80	Todas	SI
INM	Red de Estaciones Completas	74	Precipitación Temperatura Resto Variables (sólo algunas)	NO
	Red de estaciones Automáticas	44	Todas	SI

Tabla 1. Origen de las estaciones para efectos de cálculo de variables

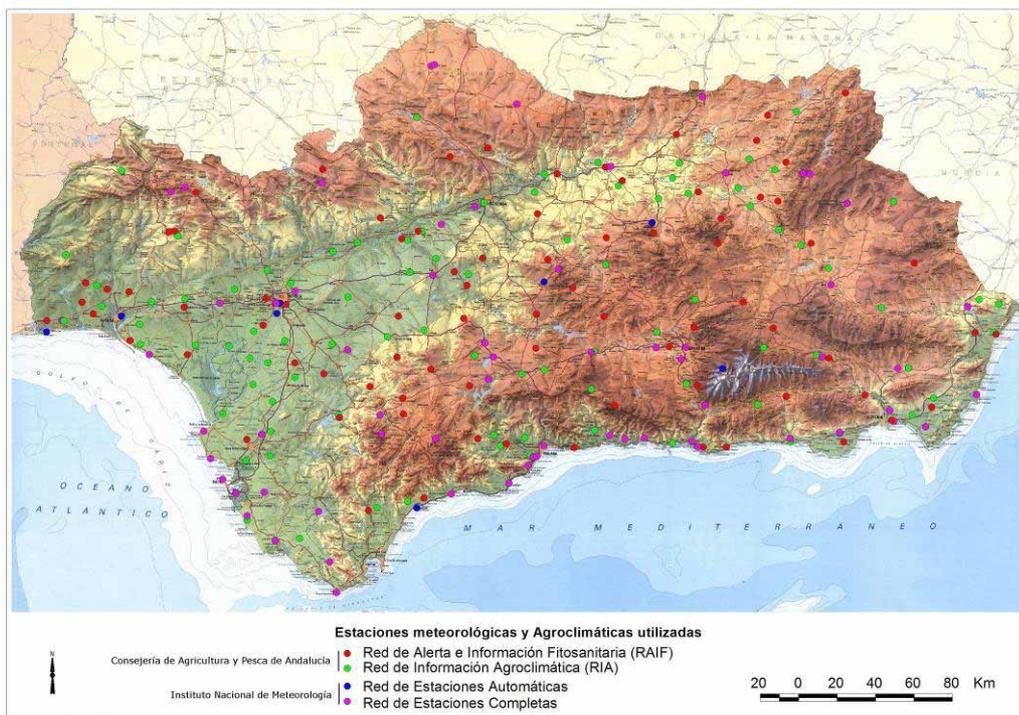


Figura 2. Localización de las estaciones para estimar las variables meteorológicas

No obstante, para recrear las situaciones meteorológicas de los últimos años y calibrar el modelo, se están utilizando datos procedentes de estaciones no automáticas de las que se tienen los datos. Este proceso de adición de datos procedentes de estaciones no automáticas se realizará a posteriori cada año para comprobar también de esta manera la sensibilidad del proceso.

Es importante destacar que los datos meteorológicos que se almacenan en la base de datos final son fiables, depurados de registros erróneos o dudosos, homogeneizados en unidades, ordenados y fácilmente accesibles.

El modelo CGMS espacializa las variables meteorológicas, a partir de los datos puntuales y diarios de cada una de las estaciones. De esta forma se puede estimar el valor de la temperatura o la precipitación, por ejemplo, en un punto donde no haya ninguna estación de medida. Este proceso se denomina espacialización y genera mapas continuos de variables en el área de trabajo a una resolución espacial determinada, en este caso 5x5 Km.

En la metodología implementada en el modelo, la espacialización de variables climáticas hace distinción entre la precipitación, la radiación y el resto de variables.

La precipitación es un fenómeno de comportamiento difícilmente predecible. El modelo no efectúa una gradación de la variable entre dos puntos con valor medido en la realidad, sino que asigna a cada celdilla de 5x5 Km el valor de la estación "más cercana" en términos meteorológicos. Es decir no sólo la cercanía en el plano, sino que la altitud y la distancia a costa sean semejantes a las de la celdilla, y que no existan barreras montañosas entre la celdilla y la estación.

Para la radiación, el programa emplea un método de espacialización desarrollado por Iwan Supit. Cuando no existe

medida de radiación cercana, el valor se obtiene a partir de una serie de estaciones de referencia almacenadas en la base de datos.

Para el resto de las variables (temperatura, viento y humedad) se elige la combinación de hasta 4 estaciones que tienen mayor similitud con la celdilla a estimar (proximidad, similar distancia a costa y altitud, y sin barreras geográficas), y se asigna a la celdilla el valor promedio de la/s estación/es seleccionada/s. En el caso de la temperatura y la humedad, se corrigen con la diferencia de altura, en metros, entre el centro de gravedad de las estaciones y la altura promedio de la celdilla, con un coeficiente de $-0,006$ en la temperatura medida en $^{\circ}\text{C}$ y $-0,00025$ en la humedad, medida como presión de vapor en hPa.

3.2. Fase de adaptación edafológica

Tan importante como disponer de una buena y densificada red de estaciones es conseguir que el mapa de suelos contenga la información suficiente para simular de manera acorde el desarrollo del cultivo en relación con el sustrato sobre el que se asienta. Para conseguir este nuevo mapa se necesita la mayor cantidad posible de perfiles georreferenciados, conteniendo características texturales e hidráulicas de los mismos. Aún cuando se tiene una primera versión, se espera que a lo largo del año 2006 se puedan incorporar nuevos perfiles que ayuden a aumentar la precisión del mapa. Para la elaboración del mapa, en su primera aproximación, se están utilizando técnicas avanzadas de interpolación espacial que combinan algoritmos de lógica difusa, geoestadística, redes neuronales y funciones de pedotransferencia.

3.3. Fase de calibración de los cultivos herbáceos

Esta fase comprende la realización de un calendario de cultivos, la generación y organización de los rendimientos oficiales a nivel de municipio y comarca agrícola y la propia calibración de los cultivos implicados (trigo duro, trigo blando, cebada, girasol, arroz, algodón y maíz) usando el modelo WOFOST. Hay que tener en cuenta que el actual modelo mantiene la información y bases de datos de los centros de investigación que la Unión estableció como referencia tipo para los cultivos mencionados por lo que la calibración pretende hacerlos específicos para nuestras condiciones. Para tal fin, se ha firmado un acuerdo de colaboración con el Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC de Córdoba que persigue conseguir esta adaptación.

Asimismo también es necesario disponer de un calendario lo más ajustado posible a la realidad de cada año agrícola. La fecha de siembra es, por ejemplo, un dato muy importante y de gran interés ya que diferencias de +/- 15 días pueden repercutir en estimaciones de producción completamente diferentes en función de la climatología reinante. Aunque ya se posee un calendario tipo (Figura 3), no es menos cierto que existen diferencias cada año que pueden modificar los resultados finales. De ahí, la importancia de obtener estos datos. Para la calibración de los años anteriores se está utilizando información de las siembras realizadas por la Red Andaluza de Experimentación Agraria (RAEA) e información auxiliar generada en la gestión de las fincas de titularidad pública gestionadas por la E.P. DAP.

PROVINCIAS OCCIDENTALES												
% SIEMBRA mes												
	EN	FB	MZ	AB	MY	JN	JL	AG	SP	OC	NV	DIC
TRIGO	6									9	53	32
CEBADA pienso	1								4	48	31	16
CEBADA CERVECERA	9									3	25	63
AVENA	5								1	27	33	34
ARROZ					40	60						
MAIZ			31	26	15	8	20					
SORGO			5	40	26	16	13					
REMOLACHA AZC. Verano	2								1	28	47	22
ALGODÓN			7	83	10							
GIRASOL		4	80	15	1							
SOJA			2	26	49	23						
TABACO				50	50							

PROVINCIAS ORIENTALES												
% SIEMBRA mes												
	EN	FB	MZ	AB	MY	JN	JL	AG	SP	OC	NV	DIC
TRIGO										11	61	28
CEBADA pienso	8									15	44	33
CEBADA CERVECERA	11									4	33	52
AVENA										38	57	5
MAIZ			12	27	31	26	4					
SORGO			4	2	13	62	19					
REMOLACHA AZC. Invierno		65	35									
REMOLACHA AZC. Verano	3	24	23							45	5	
ALGODÓN			10	70	20							
GIRASOL		3	43	54								
SOJA				35	65							
TABACO					51	49						

% RECOLECCIÓN mes												
	EN	FB	MZ	AB	MY	JN	JL	AG	SP	OC	NV	DIC
					9	68	20	3				
				15	42	39	4					
				63	36	1						
				4	76	15	5					
								20	70	10		
						27	11	23	35	4		
						6	29	8	36	20	1	
					9	41	42	8				
								9	45	43	3	
						3	74	23				
							9	28	48	12	3	
								50	50			

% RECOLECCIÓN mes												
	EN	FB	MZ	AB	MY	JN	JL	AG	SP	OC	NV	DIC
					2	29	54	15				
					6	30	37	27				
					5	41	49	5				
						70	28	2				
						1	2	45	36	16		
								22	65	13		
									30	50	20	
							29	24	10	37		
								10	70	20		
								38	62			
								12	76	12		
								50	50			

Nota: Cada porcentaje expresa la probabilidad de ocurrencia de la siembra o la recolección

Figura 3. Calendario aproximado para los principales cultivos en Andalucía

En la campaña 2004/2005 se ha puesto en marcha la constitución de una red de observación agrícola en base a parcelas de control, que obtiene observaciones in situ (fenología, altura del cultivo, % de cubierta del suelo, estado general del cultivo). Las condiciones medioambientales (suelo y clima) varían considerablemente en el espacio y en el tiempo, por lo que sus interacciones con la genética y la fisiología de la planta deben ser observadas en sitios específicos e instantes determinados con el fin de calibrar el modelo.

Asimismo, a partir de esta campaña se espera añadir los datos procedentes de un conjunto de encuestas a agricultores colaboradores para recoger información de prácticas agrícolas relativas a la siembra (fecha y dosis), abonado (tipo, dosis y fechas), fechas de recolección, rendimientos obtenidos, etc. Los datos generados a partir de esta red servirán para:

- o Obtener parámetros biológicos que ayuden a la interpretación y el análisis de las imágenes de los satélites.
- o Comprobar la calibración y ajuste de predicciones del modelo y/o sistema.

Otra fuente importante de datos son los procedentes del proyecto nacional "Encuesta sobre superficies y rendimientos". Con el fin de integrarla de manera cercana al tiempo real en modo y forma con el resto de la información del Sistema, se van a

realizar mejoras en la sistemática de recogida, informatización y envío de la información generada por la Consejería.

Asimismo se está elaborando, a partir de la información del proyecto de marco de área y de las estadísticas oficiales, los rendimientos por municipio y comarca agrícola (los oficiales están referidos a nivel provincial), para determinar desde 1992 la posible línea de mejora tecnológica de los cultivos para un mismo sitio a través del tiempo y en conjunción con la meteorología, es decir, el uso de la tendencia temporal que incluya el cambio en las prácticas agrícolas que afectan a la producción. Hay que tener en cuenta que la mayoría de los modelos de simulación de crecimiento no incluyen este supuesto ya que consideran las condiciones de crecimiento como "normales". La forma de la tendencia se ha vinculado a una función cuadrática del tipo $Y = a + bT + c \cdot T^2$. Para ilustrar lo complicado que puede resultar estimar una tendencia o generar una estimación incluímos el rendimiento del girasol a nivel provincial entre los años 1999 al 2005 según las estadísticas oficiales provistas por el Servicio de Estudios y Estadísticas (Figura 4). El girasol, a pesar de tener un sistema radicular profundo y ser capaz de extraer agua del suelo a profundidades donde otras especies cultivadas no pueden acceder, no deja de estar también muy influenciado por las condiciones climatológicas de cada año.

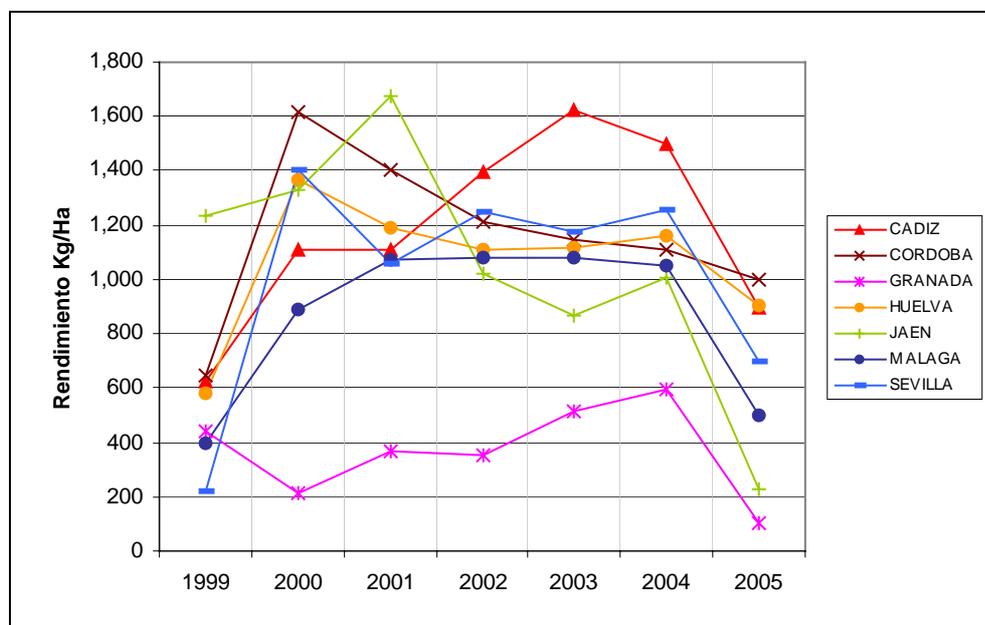


Figura 4. Rendimientos a nivel de provincia del cultivo del Girasol, desde 1999 hasta 2005
Fuente: Serv. Estudios y Estadísticas (CAP)

Para rebajar la escala de trabajo y poder enlazar las predicciones con un nivel administrativo conocido, los rendimientos se han de confeccionar a nivel de municipio (Figura 5), aún cuando el ámbito preferido sea el determinado por las comarcas agrarias (Figura 6). También se van a generar a nivel de provincia con el fin de poder comparar los resultados del modelo con las estadísticas oficiales. Nuestro objetivo es generar las predicciones tan rápido y preciso como sea posible y a la vez de manera independiente de cualquier fuente externa a SIMANCTEL de manera que se pueda comprobar la fiabilidad final.

4. El mapa de cultivos con base de ocupación parcelaria y/o recintos

Hasta el momento las estadísticas agrarias en base a teledetección se realizaban a partir del mapa oficial de la Consejería de Agricultura y Pesca (Mapa de usos y aprovechamientos). Este mapa tiene el problema de no considerar la dimensión tiempo y por lo tanto de no ajustarse a las variaciones anuales en los cambios de cultivo. Por lo tanto es un mapa no actualizable, de tipo "foto fija", que se queda anticuado conforme pasan los años.

Para solucionar este problema, que condicionaba en gran medida la calidad de las estadísticas obtenidas por teledetección, se ha reconstruido la localización de los herbáceos en Andalucía desde la campaña 97/98, de manera que se han generado nuevos mapas que representan la ocupación parcelaria de cultivos y grupos de cultivo con relación a las declaraciones PAC. De esta manera, es obvio que se obtiene una mayor precisión en la localización de las zonas cultivadas pudiendo descender al nivel de recinto SIGPAC a partir del año 2005 y en los anteriores años a nivel de parcela catastral. De esta forma, la dimensión tiempo adquiere gran importancia no sólo para las situaciones pretéritas sino que en el futuro se podrán obtener parámetros agrícolas de manera progresiva, en tiempo cercano al real, conforme las declaraciones de cultivos se incorporen a la cadena de proceso de datos.

Para constituir el mapa sólo se han escogido las parcelas y recintos donde existe un único cultivo herbáceo ya que, si bien se reduce algo el número de parcelas a considerar, se obtiene una mayor fiabilidad y representatividad en las estadísticas, que es el objetivo fundamental que se persigue. En el caso de SIGPAC y el uso de recintos, existe obviamente una mayor proporción de polígonos que sólo tienen un único tipo de cultivo y una mayor

superficie total a considerar para la extracción de estadísticas agrarias (Figuras 7 y 8). Cada recinto tiene además asociado un porcentaje de ocupación sobre la base de la superficie validada y a la superficie real del recinto SIGPAC.

No sólo se han constituido mapas de cultivos para su uso detallado en el caso de que la resolución del sensor, el tamaño de la parcela y la ocupación parcelaria lo aconsejen, sino que se han generado mapas de grupos de cultivos de tres clases fundamentales, herbáceos de secano, herbáceos de regadío y huerta. La Figura 9 representa el mapa de cultivos y grupos de cultivos del término municipal de Carmona.

4.1 Análisis de las imágenes satélite en conjunción con los mapas de cultivos

Los mapas de cultivos (o de grupos en su caso) y de porcentaje de ocupación se utilizan como base de referencia para generar las estadísticas en base a teledetección. Cada escala territorial de análisis llevará asociado un tipo de procedimiento, a saber:

- **Escala municipal:** se trabaja con imágenes NOAA y MODIS y fundamentalmente para grupos de cultivo (Figura 10), ya que el tamaño de píxel que proporciona cada sensor (1000 y 250 metros, respectivamente) nos impide llegar a distinguir entre cultivos. Con MODIS también es posible extraer estadísticas a nivel de polígono catastral y para algunos cultivos extensivos en zonas de ocupación alta como puede ser el caso del arroz o del trigo duro.
- **Escala parcela/recinto:** con este nivel de detalle se está trabajando con imágenes del sensor Thematic Mapper de LANDSAT, ya que sus 30 metros de resolución nos permiten llegar hasta estos niveles de detalle (Figura 11). En este caso, se pueden agregar datos a otros niveles territoriales como polígono, término municipal y provincia, además de a nivel de recinto y parcela, de los cuales, los tres primeros niveles siempre van a estar disponibles y los dos últimos lo estarán en función del tamaño mínimo admisible que permite la observación con este sensor (>0.3 Ha).

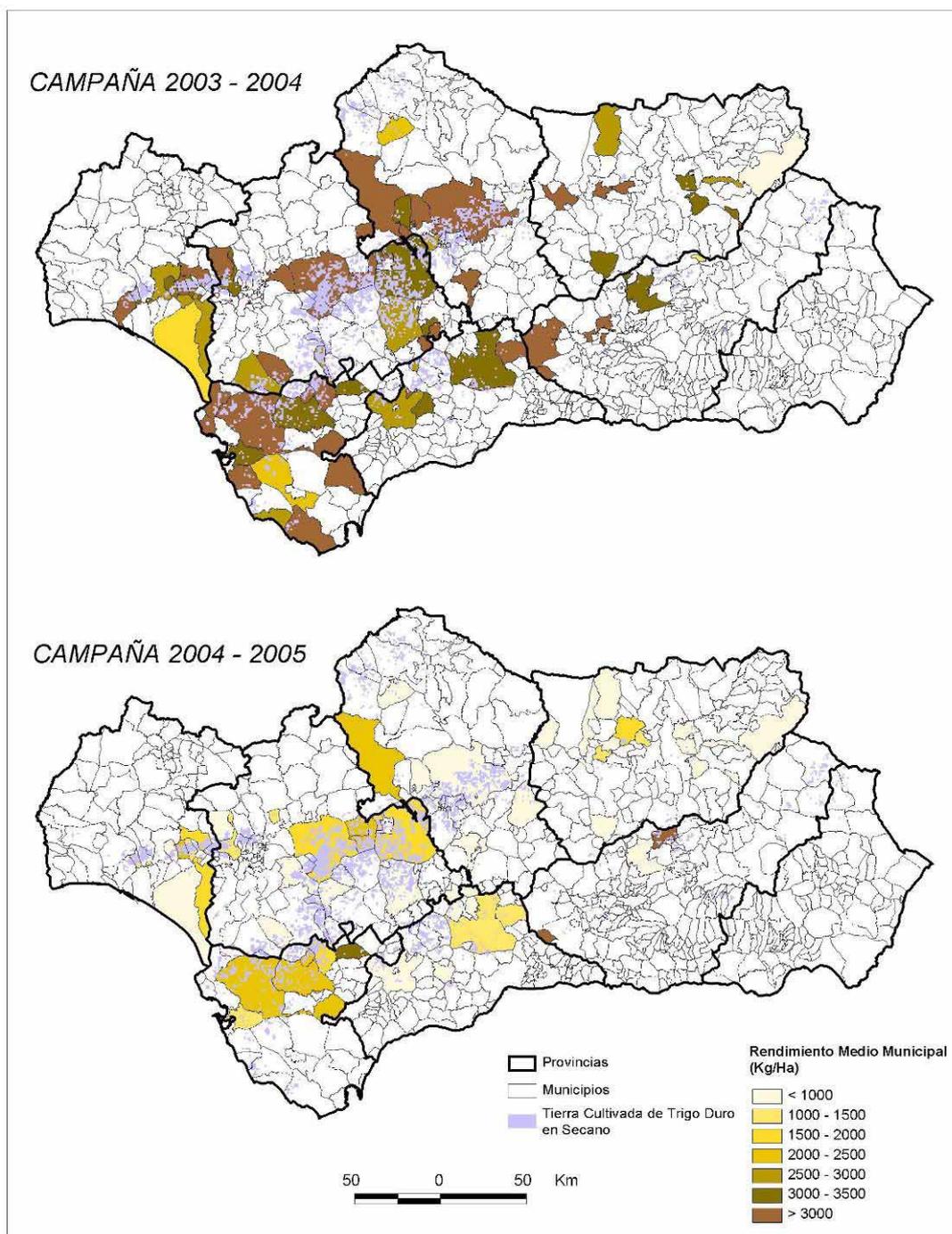


Figura 5. Rendimiento medio municipal del trigo duro de secano a partir de datos de los segmentos muestreados por la CAP de la *Encuesta sobre superficies y rendimientos* de las dos últimas campañas

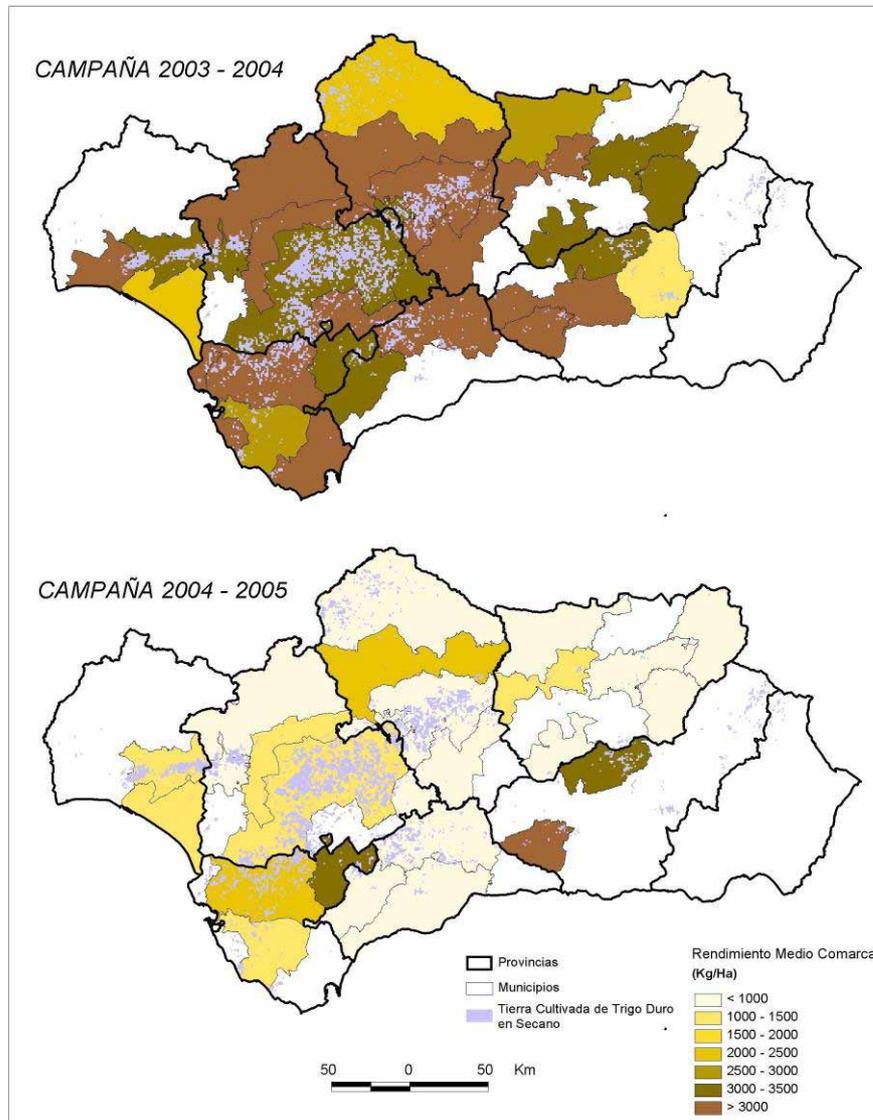


Figura 6. Rendimiento medio comarcal del trigo duro a nivel de comarca partir de datos de los segmentos muestreados por la CAP de la *Encuesta sobre superficies y rendimientos* de las dos últimas campañas

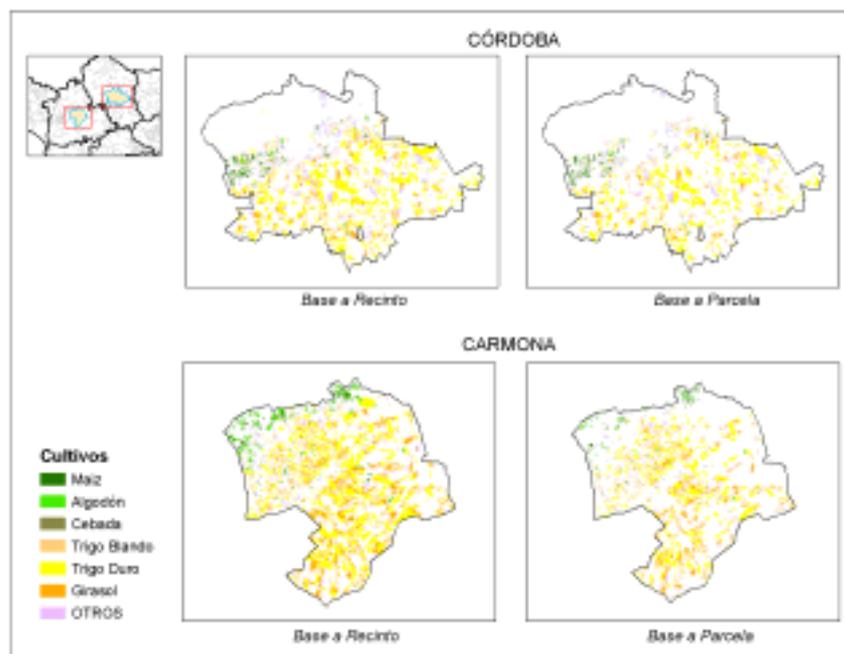


Figura 7. Distribución de polígonos con un único cultivo según parcelas de catastro y SIGPAC

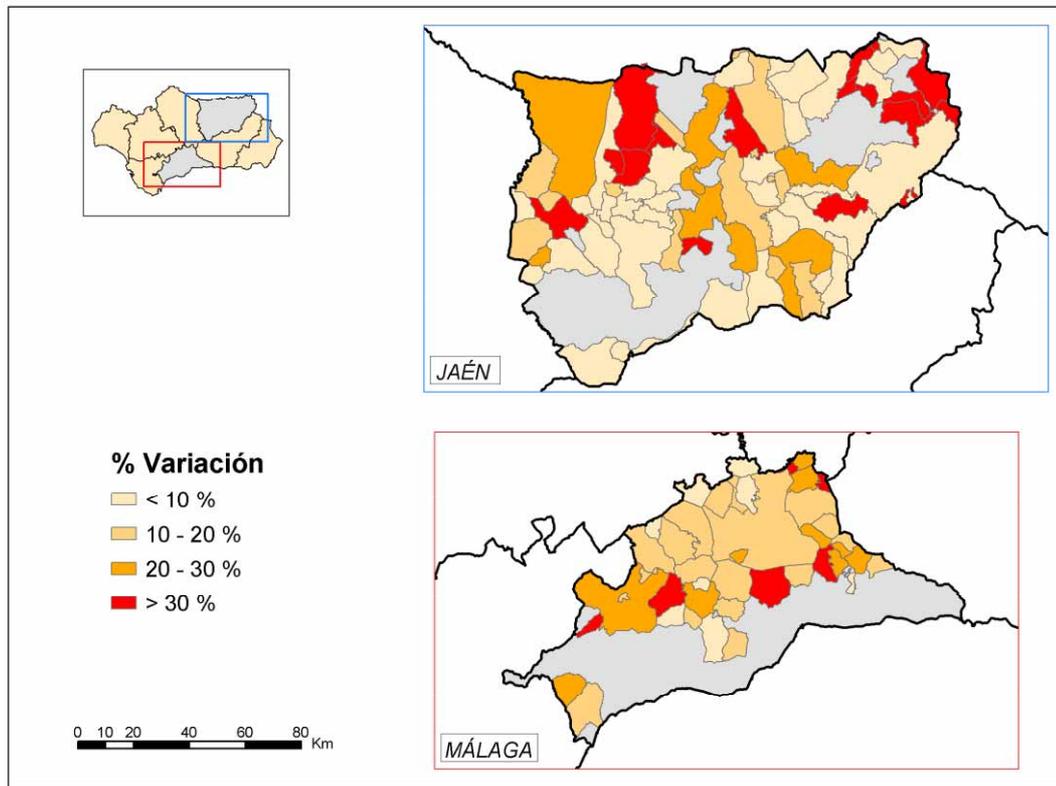


Figura 8. Variación de la superficie considerada entre catastro (parcela) vs SIGPAC (recinto)

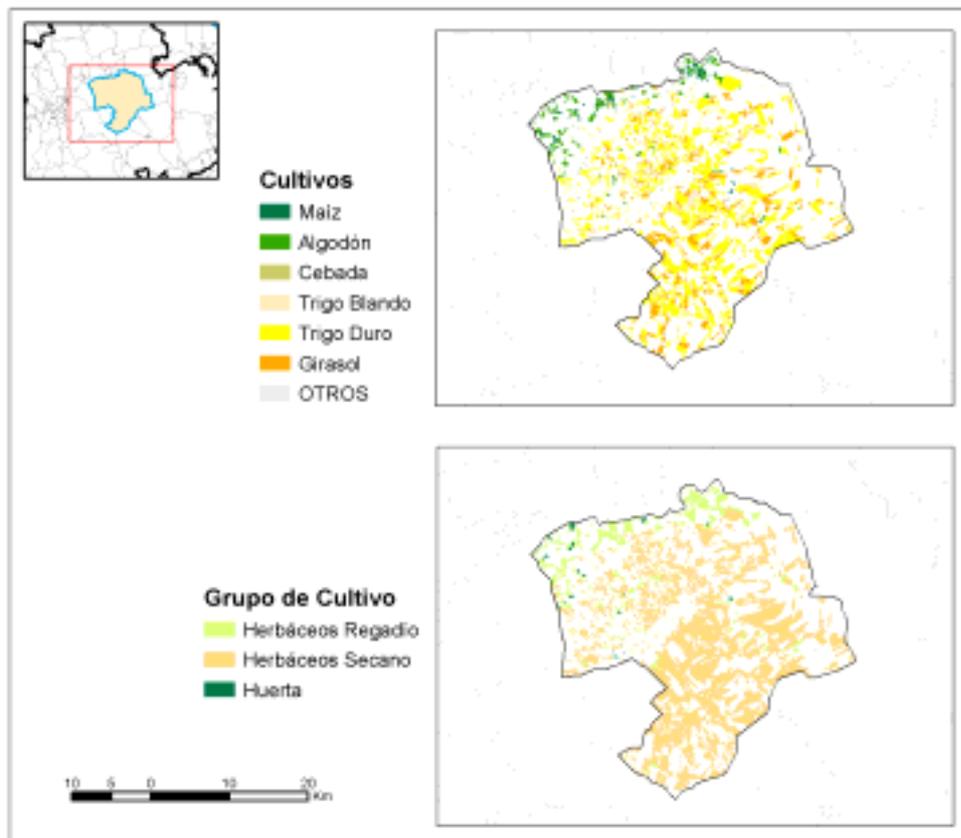


Figura 9. Especialización de las declaraciones SIGPAC 2005 para Carmona

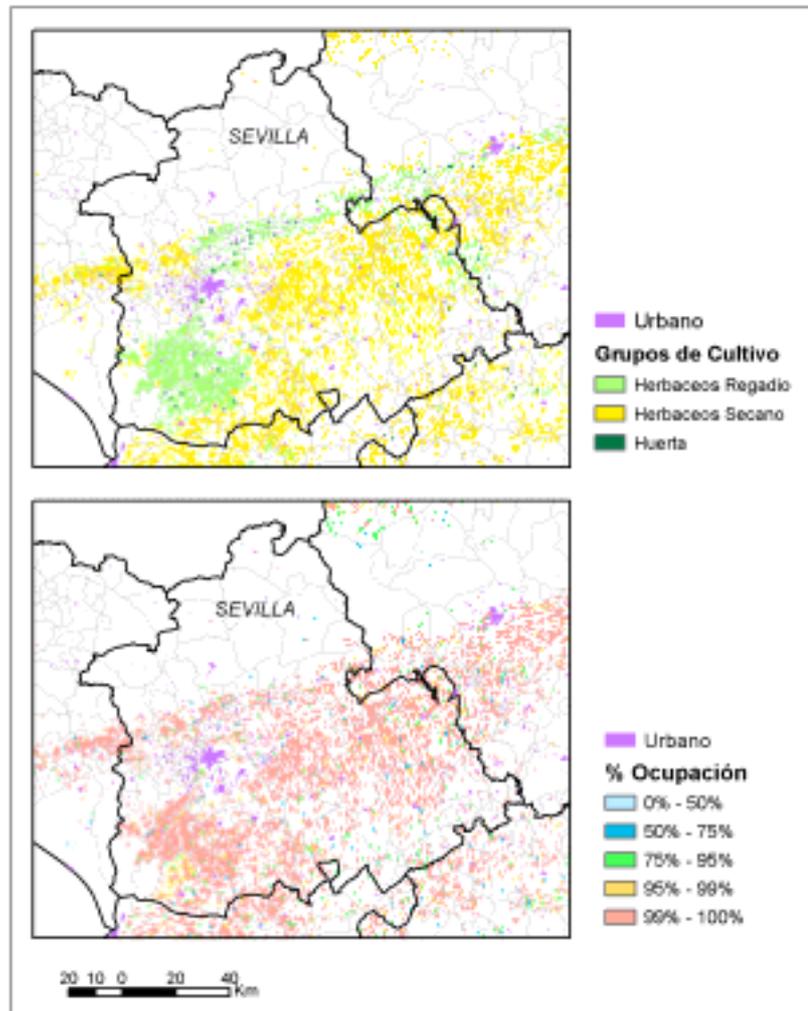


Figura 10. Distribución y % de ocupación de 3 tipos de grupos de cultivo de la provincia de Sevilla

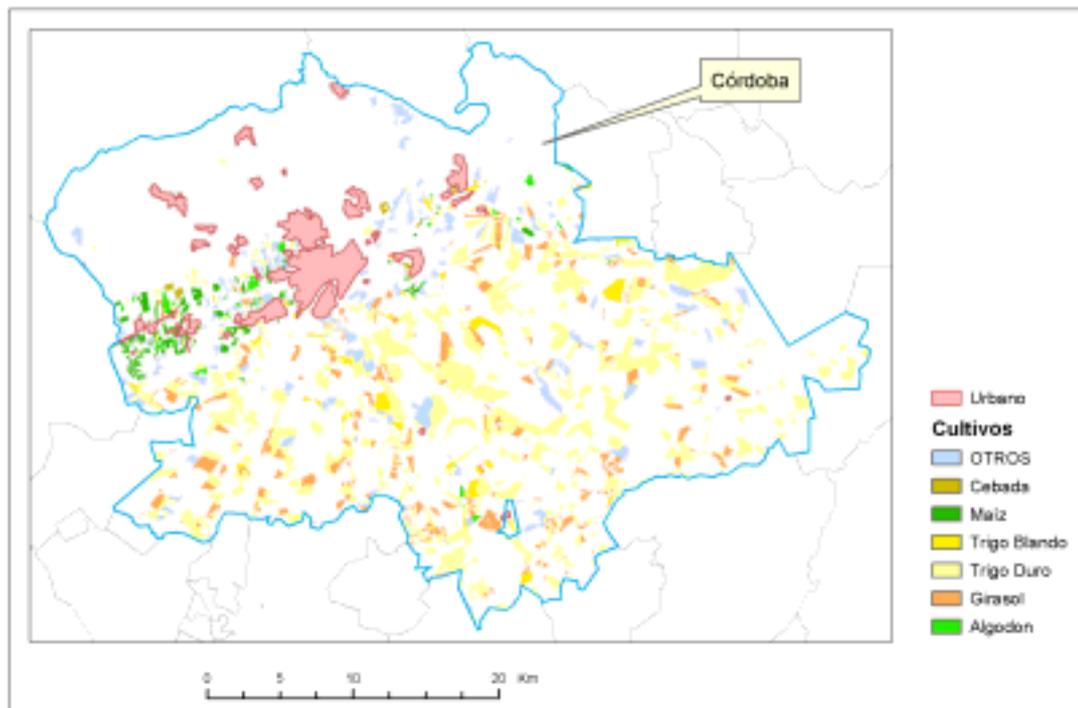


Figura 11. Distribución de los cultivos del municipio de Córdoba a 10 metros de resolución

5. Los herbáceos de secano en la campaña 2004/2005 desde SIMANCTEL

5.1. Las heladas

Durante la campaña 2004-2005, las heladas invernales han afectado a una buena parte de la superficie cultivable en Andalucía, con mayor incidencia en Andalucía Oriental.

Para poner de relevancia lo acontecido el pasado invierno, se ha obtenido el número de días de helada ($< 0^{\circ}\text{C}$) para el trimestre comprendido entre Diciembre de 2004 y Febrero de 2005, en base a una consulta realizada a la base de datos climatológicos que alimenta el modelo de cultivos CGMS.

Con los datos espacializados se obtiene el mapa de la *Figura 12*, en el cual se han remarcado seis municipios para estudiar la evolución de la temperatura mínima a nivel de estación meteorológica (*Tabla 2*). En el mapa se aprecia que el número de días de helada aumenta considerablemente en las zonas topográficamente más elevadas, como es el caso por ejemplo de Andalucía Oriental. No obstante, en algunos municipios de gran importancia agrícola del valle del Guadalquivir, como son Carmona, Écija y Córdoba, también hay una incidencia importante de las heladas en invierno.

Las *Figuras 13 y 14* comparan la evolución temporal de la temperatura mínima en el trimestre Dic. 2004 – Feb. 2005 para dos conjuntos de estaciones, uno en Andalucía Occidental y otro en Andalucía Oriental

Lo primero que se observa al comparar las gráficas es la similar tendencia que siguen las líneas de temperatura mínima diaria de las seis estaciones, aunque las tres estaciones de Andalucía Oriental tienen, en general, valores más bajos que las seleccionadas para la zona Occidental. El primer periodo con temperaturas inferiores a 0°C comienza en la tercera decena de diciembre, y aunque en Andalucía Occidental apenas se prolonga un par de días, en Andalucía Oriental se mantiene durante casi toda la decena. En la segunda semana de enero vuelve a producirse un episodio de heladas importante en la Campiña, de unos cinco días de duración, pero de casi diez días en el este de Andalucía. El periodo más prolongado de temperaturas mínimas por debajo de 0°C se da entre la última semana de enero y la primera de febrero, con casi dos semanas de mínimas continuadas por debajo de 0°C , rozando los -10°C . En las estaciones seleccionadas de Andalucía Occidental el último episodio importante de heladas se produce en la tercera semana de febrero con mínimas por debajo de -5°C .

Zona	Municipio	Provincia	Estación	Red
Occidental	Carmona	Sevilla	RIA4119	RIA
	Córdoba	Córdoba	RIA1406	
	Écija	Sevilla	RIA4109	
Oriental	Huelma	Jaén	RAIFJA009	RAIF
	Chirivel	Almería	RAIFAL008	
	Santa Fe	Granada	RAIFGR008	

Tabla 2. Estaciones seleccionadas para el estudio puntual de las heladas en el período dic-2004 a feb-2005, mostrado en las figuras 13 y 14

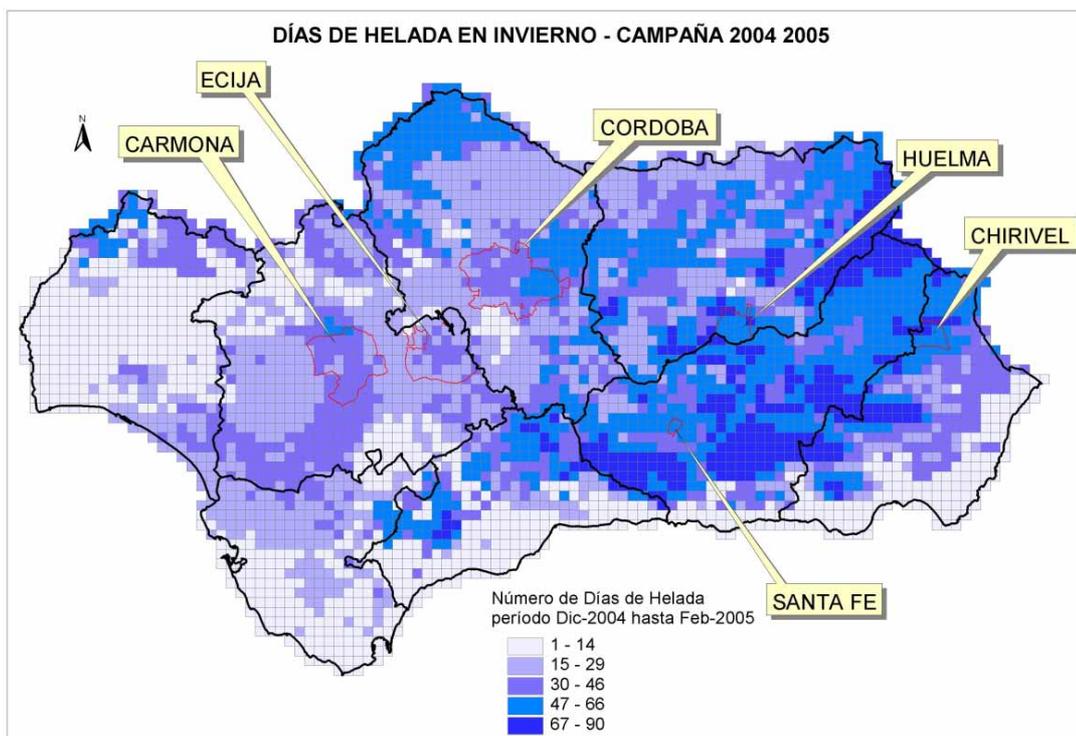


Figura 12. Días de helada en invierno para la campaña 2004-2005

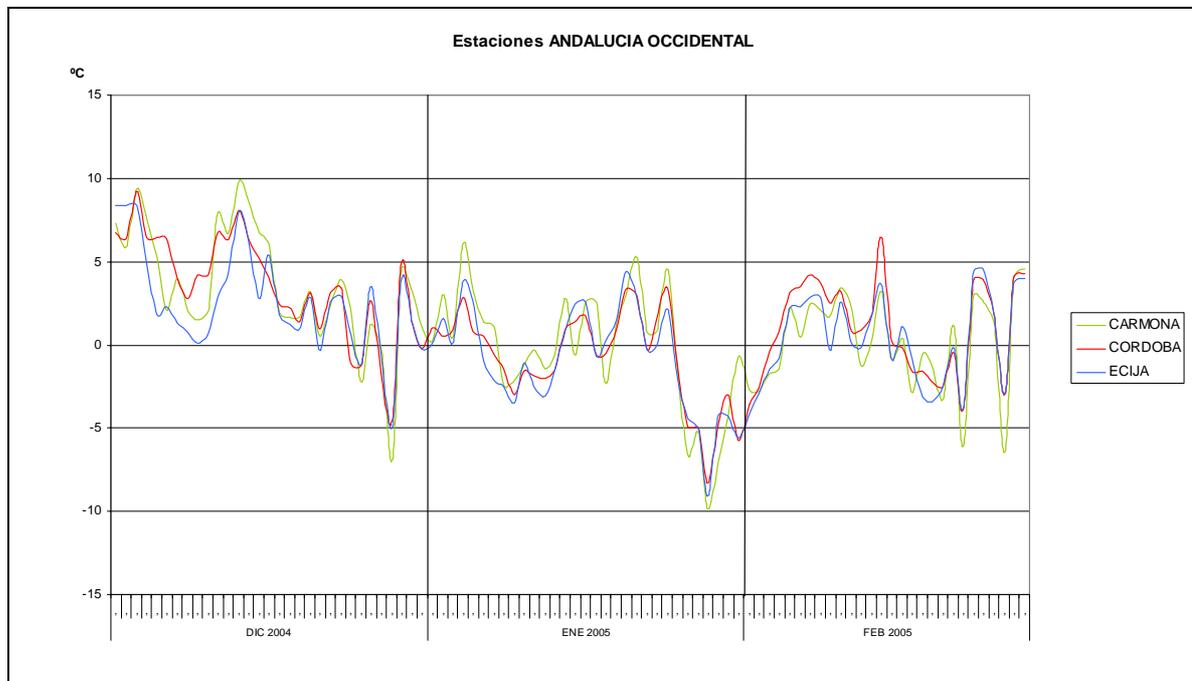


Figura 13. Temperaturas mínimas diarias en las estaciones seleccionadas de Andalucía Occidental, período dic-2004 a feb-2005

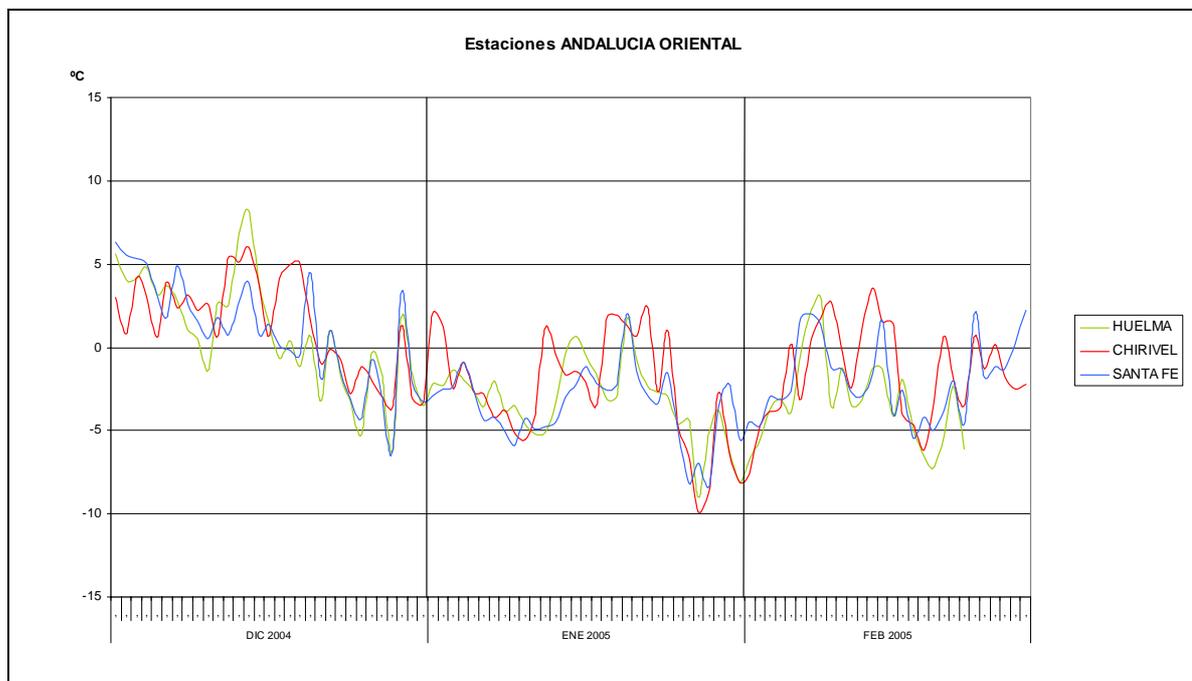


Figura 14. Temperaturas mínimas diarias en las estaciones seleccionadas de Andalucía Oriental, período dic-2004 a feb-2005

5.2. La precipitación

A escala regional, la precipitación ocurrida durante la pasada campaña ha sido notablemente inferior a la acontecida en las cuatro anteriores campañas, definiéndose como una campaña marcada climatológicamente por la escasez de precipitación.

A partir de la base de datos meteorológicos, preparada para alimentar el modelo de cultivos CGMS, se han generado mapas con la precipitación total acumulada por trimestre desde octubre del 2004, según el año hidrológico-agronómico (Tabla 3).

En términos generales, la lluvia caída durante el primer y segundo trimestre de la campaña 2004/2005 ha sido muy inferior a la que se recogió para las mismas fechas en campañas anteriores (2000-2004), con una desviación de entre 100 y 400 mm menos que la media del período 2000-2004.

En el tercer trimestre la diferencia absoluta de precipitación ha sido menos acusada debido a la menor cantidad de agua que suele recogerse en Andalucía. No obstante éste trimestre ha traído desviaciones positivas de la precipitación sobre todo por el norte y noroeste de Andalucía, así como en la Sierra de Grazalema.

Aunque se puede afirmar que la sequía ha sido generalizada para toda la CC.AA, ésta ha sido más acusada en Andalucía Occidental, sobre todo en el valle del Guadalquivir. En cambio en el sureste de Almería, caracterizado por escasas precipitaciones, las precipitaciones han estado incluso ligeramente por encima de la media en el segundo trimestre. La campaña anterior (2003-2004), al contrario, se caracterizó por ser un año muy húmedo, con cuantiosos aportes de precipitación en los tres trimestres. Estas elevadas precipitaciones se dieron justamente en las zonas donde más acusada ha sido la sequía en la campaña 2004-2005.

Campaña Agrícola	Trimestre	Meses	Año
2004/2005	1er Trimestre	OCTUBRE	2004
		NOVIEMBRE	
		DICIEMBRE	
	2º Trimestre	ENERO	2005
		FEBRERO	
		MARZO	
3er Trimestre	ABRIL	2005	
	MAYO		
	JUNIO		

Tabla 3. Trimestres considerados según año hidrológico y la campaña agrícola

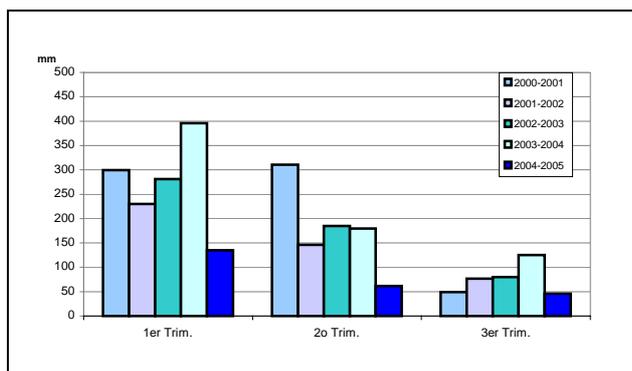


Figura 15. Precipitación trimestral total media en la provincia de Sevilla en los cinco últimos años hidrológicos

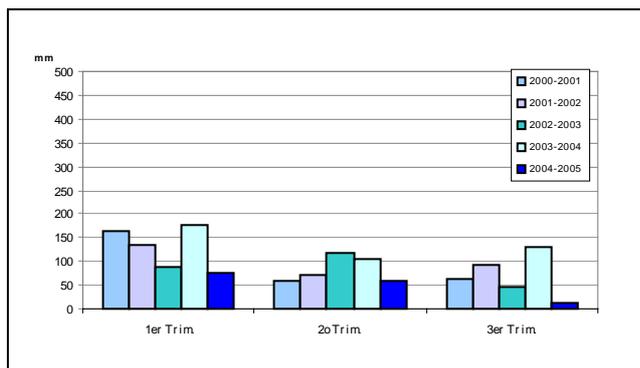


Figura 16. Precipitación trimestral total media en la provincia de Almería en los cinco últimos años hidrológicos

Las Figuras 15 y 16 ilustran la situación acontecida para las provincias de Sevilla y Almería. Como puede apreciarse, la precipitación de la campaña 2004-2005 es notablemente inferior a la precedente, en todos los trimestres, y generalmente por debajo de la media de las cuatro campañas anteriores.

El gran déficit de precipitación se concentra sobre todo en el primer trimestre (Oct-Dic 2004). La escasez de lluvias en el habitualmente lluvioso otoño, afectó sobre manera a la nascencia de los cultivos de invierno lo que repercutió en el posterior desarrollo de las plantas. Durante el invierno (Ene-Mar 2005), las precipitaciones fueron incluso notablemente inferiores a la media por lo que la situación se agravó aún más. De nuevo, mientras que el trimestre Abril-Junio de la campaña anterior (2003-2004) fue muy abundante en precipitaciones, en la pasada campaña no se mejoraron las escasas precipitaciones de los trimestres previos, marcando la mínima de los tres trimestres.

Los mapas de precipitación trimestral acumulada han sido obtenidos a partir de datos puntuales de las estaciones meteorológicas. En los lugares donde no existe información puntual de la variable precipitación, su valor ha sido estimado mediante técnicas de interpolación. De esta forma es posible observar la distribución geográfica del fenómeno de la sequía en esta campaña y en otras anteriores. Asimismo también es interesante observar la evolución temporal de la precipitación

obtenida de forma puntual en una estación meteorológica. Esto nos permite comprobar la veracidad de los mapas obtenidos por interpolación.

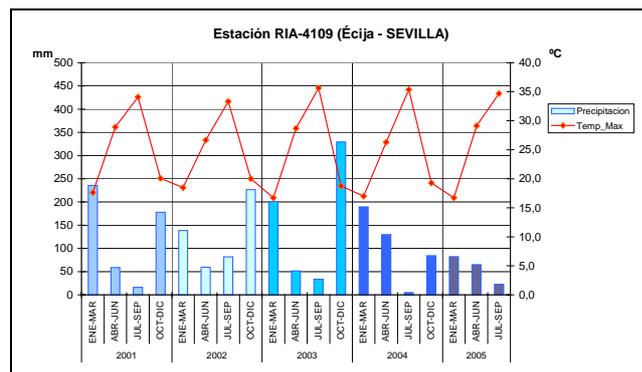


Figura 17. Evolución trimestral de las precipitaciones totales y media de temperaturas máximas en RIA4109 (Écija)

La Figura 17 representa la evolución de la precipitación total trimestral y la temperatura máxima promedio del trimestre desde el año 2001 hasta 2005, para la estación de la Red de Información Agroclimática (RIA-4119), situada en el término municipal de Écija (Sevilla). Se aprecia que las temperaturas máximas promediadas para el trimestre, apenas presentan variación a lo largo de las diferentes campañas. En cambio, la precipitación sí presenta fluctuaciones importantes de una campaña a otra, lo que en definitiva produce un efecto directo sobre el desarrollo y la evolución de los cultivos herbáceos de secano. La gráfica para el caso de Écija, que podemos considerar representativo para la zona, pone también de manifiesto que la sequía en la campaña 2004-2005 no sólo fue debida a las escasas precipitaciones durante el año 2005, sino que en realidad la situación comenzó en el último trimestre de 2004 para el que las precipitaciones fueron extremadamente bajas en comparación con años anteriores.

En el Anexo del boletín se incluyen un conjunto de mapas comparativos que ponen de manifiesto la situación de sequía que estamos sufriendo en relación a los últimos cinco años.

En conclusión, el año hidrológico 2004-2005 fue un año que empezó mal en octubre de 2004, en cuanto a precipitaciones se refiere, y no consiguió recuperar esa racha en los trimestres posteriores.

5.3. Resultados y Análisis

Una de las características fundamentales de la pasada campaña ha sido la disminución del área declarada de cultivos en secano (Figura 18), con efectos más patentes en Comarcas como La Campiña Sevillana y la Campiña Baja (Córdoba), efecto inequívoco del período de sequía que había comenzado meses antes. Como consecuencia, la Figura 19 pone de manifiesto el consiguiente aumento de las retiradas voluntarias. Es esclarecedor que éstas han sido mucho mayores en las provincias de Sevilla y Córdoba, donde el impacto de la sequía ha sido mayor.

En la Figura 20 se puede apreciar un mapa sinóptico de la incidencia de la sequía en áreas con declaraciones de herbáceos de secano, derivadas de imágenes de AVHRR/NOAA. Para las tres fechas consideradas (primera decena de marzo, primera decena de abril y primera decena de mayo) se aprecia un incremento generalizado de las áreas que acusan valores anómalos asociados a valores bajos de NDVI, y por tanto, asociados a estrés hídrico.

Según avanza la temporada, se aprecia un endurecimiento del estrés en las áreas de mayor importancia de los cultivos de secano, como por ejemplo en la campaña Sevillana y Cordobesa.

Es importante destacar el hecho de que las imágenes ópticas multiespectrales de satélite contienen información que ha sido relacionada con parámetros biofísicos y, en suma, con el vigor de la vegetación. Estas relaciones se basan, en su manera más simple, en el uso de índices de vegetación, que combinan la parte roja del espectro (donde la vegetación presenta una banda de absorción luminica debida a los pigmentos de clorofila), y el infrarrojo cercano, donde la vegetación presenta una gran reflectividad debido a la estructura celular de la hoja y su contenido en agua. El estudio de estas dos regiones del espectro

permite inferir niveles de metabolismo, y por consiguiente, son un indicio indirecto de situaciones de vigor o estrés, como en el caso que nos ocupa.

Además del uso ya conocido del sensor AVHRR a bordo del satélite NOAA, se están incorporado datos de los sensores MODIS, a bordo de los satélites AQUA y TERRA de la NASA (actualmente sólo se tienen datos del TERRA). Ambos satélites producen coberturas diarias de Andalucía, de las cuales se calcula el NDVI (índice normalizado de vegetación, por sus siglas en inglés). Como ya se ha mencionado anteriormente, se han usado las declaraciones de la PAC para localizar los cultivos de interés, y calcular la proporción de superficie ocupada por el grupo de cultivo mayoritario en cada píxel. En base a la composición de cada píxel, se han agregado los valores de NDVI a escala de municipio o polígono catastral, usando la proporción de área de la clase mayoritaria para ponderar el promediado del NDVI.

Para el sensor NOAA/AVHRR, con una resolución espacial de 1 Km, pero del que se disponen datos históricos desde los años 90, se han calculado los valores típicos (y sus desviaciones) desde el año 2000 para cada municipio, basado en las declaraciones. Para el año 2005, se ha comparado la media de éste último año con los valores típicos, usando un test de normalidad, para poner en evidencia valores anómalos.

Por otro lado el sensor MODIS, con una resolución espacial de 250 metros, permite calcular estadísticas a nivel de polígono, aunque la serie temporal disponible empieza en 2004. En este caso, se ha calculado el cambio relativo en NDVI y se ha expresado como porcentaje.

Finalmente, también se han extraído estadísticas a partir de las declaraciones de los agricultores al sistema de ayudas de la PAC para observar la evolución de la superficie declarada, las retiradas voluntarias y relacionarlos con la sequía.

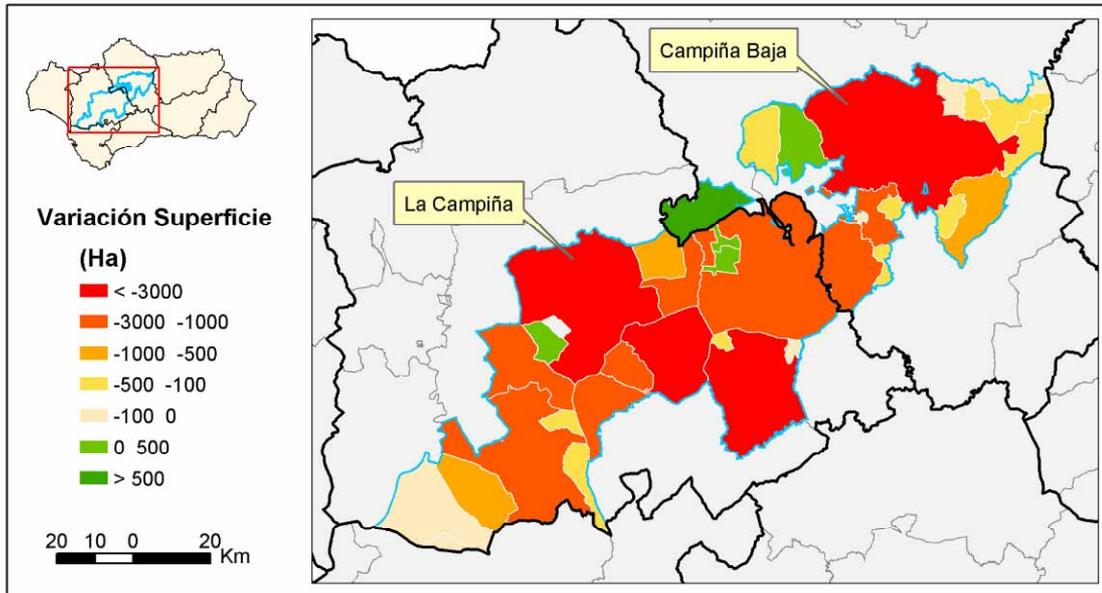


Figura 18. Diferencia de superficie cultivada de herbáceos de secano en la campaña 2004-2005 con respecto a la anterior según las declaraciones de la PAC

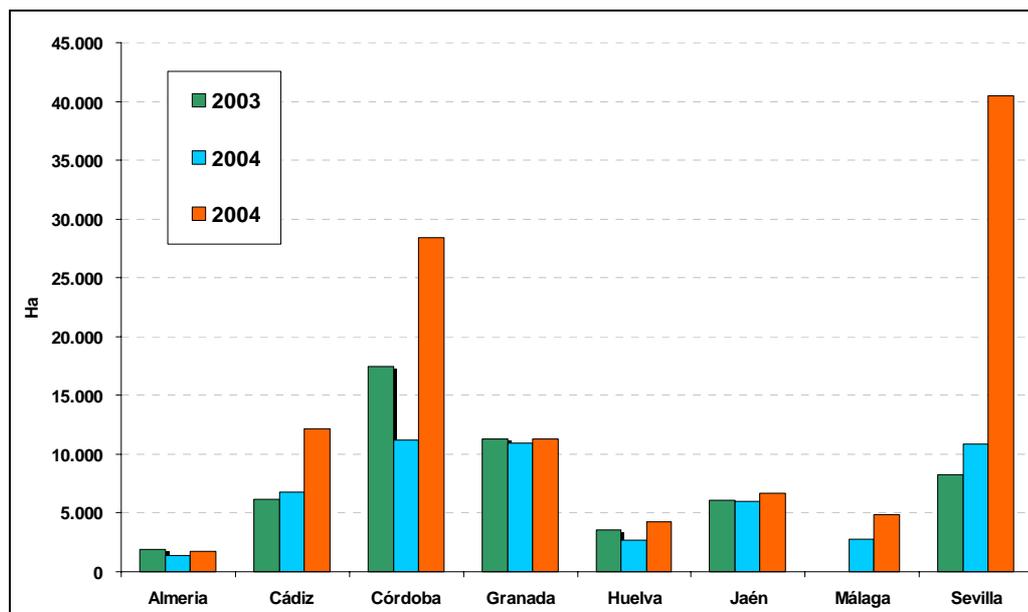


Figura 19. Evolución de la superficie de retirada voluntaria por provincias

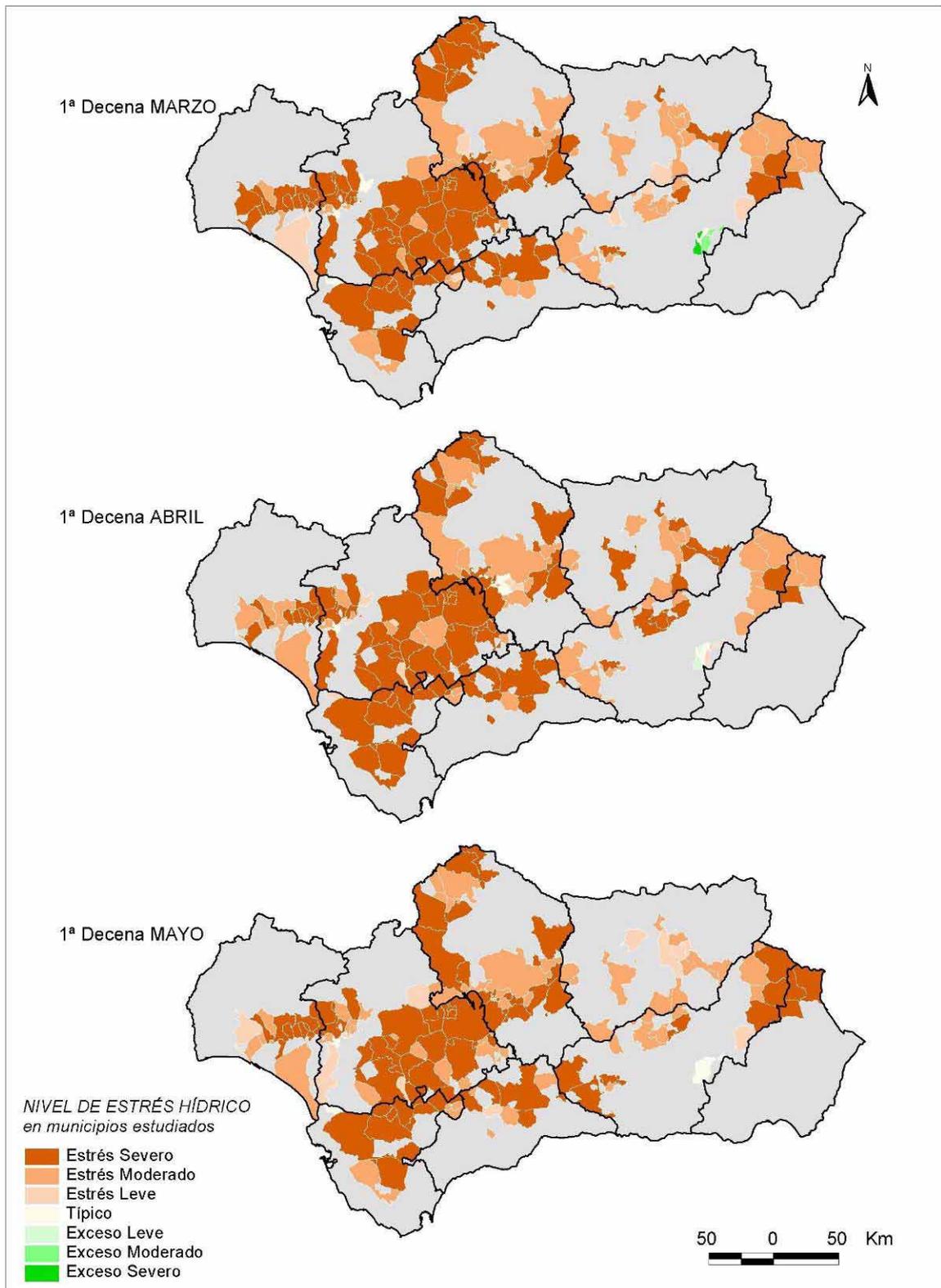


Figura 20. Nivel de estrés hídrico para Andalucía calculado a partir de la diferencia entre el NDVI medio de las decenas consideradas (2005) y el típico de la decena para la serie histórica de imágenes NOAA/AVHRR

Para ilustrar a nivel comarcal el efecto de la sequía, incluimos dos ejemplos correspondientes a los términos municipales de Carmona y Écija, que históricamente tienen la mayor superficie cultivada de herbáceos de secano de Andalucía. Los datos se han elaborado al nivel de polígono catastral, usando el sensor MODIS, y comparando la diferencia relativa entre 2004 y 2005. Los resultados para tres fechas se aprecian en la Figura 21, que resalta un marcado incremento de la diferencia según transcurre la temporada, con menor incidencia hacia la zona norte de ambos términos, cercana al Valle del Guadalquivir.

Es interesante reparar en la evolución temporal del índice de vegetación para los cultivos y zonas de interés. El desarrollo del cultivo desde su nacimiento provoca un aumento del índice de área

foliar (LAI, por sus iniciales en inglés) hasta llegar a un máximo, con un declive paulatino posterior. Esta evolución del área foliar revierte en una variación de la superficie disponible para realizar la fotosíntesis que resulta en una evolución del índice de vegetación pareja a la evolución del índice de área foliar. Para los herbáceos de secano, generalmente sembrados entre noviembre y diciembre, se produce un aumento monótono del LAI hasta llegar al máximo, alrededor de marzo para la zona de Andalucía Occidental, aunque este máximo depende del tipo de cultivo y de la zona en consideración. Posteriormente, se aprecia el agostamiento del cultivo, y el consiguiente descenso del LAI (ó del índice de vegetación observado). Para los herbáceos de regadío, la curva de evolución temporal es similar, aunque se encuentra desplazada en el tiempo, alcanzándose los máximos hacia el final del verano.

Para el caso del sensor **NOAA/AVHRR** se han comparado los valores medios del 2005 con los típicos entre 2000 y 2004 para algunos municipios con altas superficies de herbáceos de secano (*Figura 22*). Se aprecia en los casos de Córdoba, Carmona y Écija que los valores de los índices de vegetación se encuentran por debajo de los valores típicos, incluida la desviación, resultado de un elevado nivel de estrés, que estaría causado por la deficiencia de agua. Nótese que la serie típica tiene una gran variación, que no deja de ser un reflejo de la variación climática experimentada en los últimos cinco años. Como muestra, se ha incluido también la evolución de los herbáceos de regadío en el municipio de Carmona donde también se aprecian valores del índice de vegetación menores de los habituales (*Figura 22*). Es probable que esta discrepancia venga dada por la mezcla de distintos cultivos en el mismo pixel, resultado de la poca resolución espacial del sensor

NOAA/AHVRR, ya que no se puede achacar al estrés hídrico esta diferencia en un cultivo de regadío.

Con el sensor **TERRA/MODIS** se ha calculado la diferencia entre el año 2004 y el 2005. Se aprecia un notable descenso del índice de vegetación en los términos municipales estudiados (*Figura 23*). La mayor resolución radiométrica y espacial del sensor MODIS permite definir con más claridad la curva de evolución del cultivo, en comparación con los datos de AVHRR/NOAA. Desgraciadamente, no se dispone de una serie histórica tan completa como de AVHRR/NOAA, por lo cual es difícil usar esta serie de imágenes para proporcionar una imagen clara de estrés hídrico.

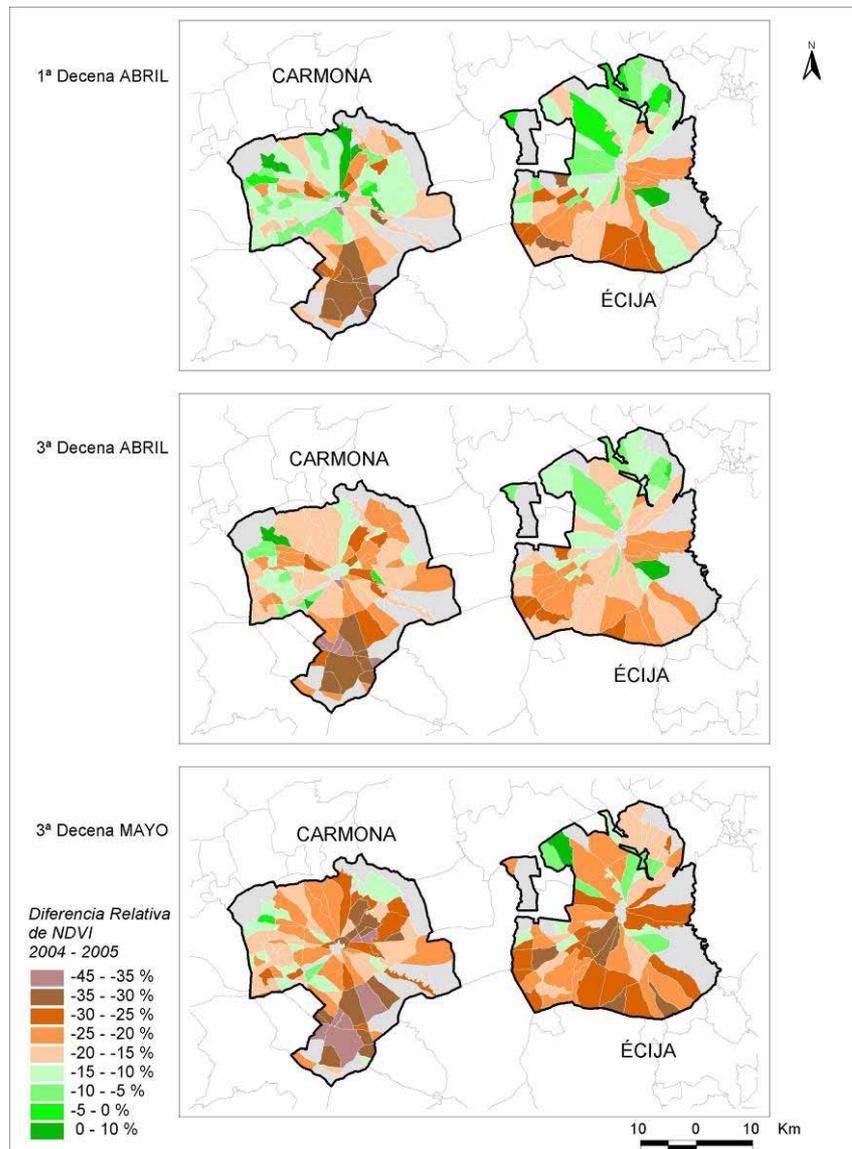


Figura 21. Diferencia relativa del NDVI medio a nivel de polígono catastral (sensor MODIS), en Carmona y Écija

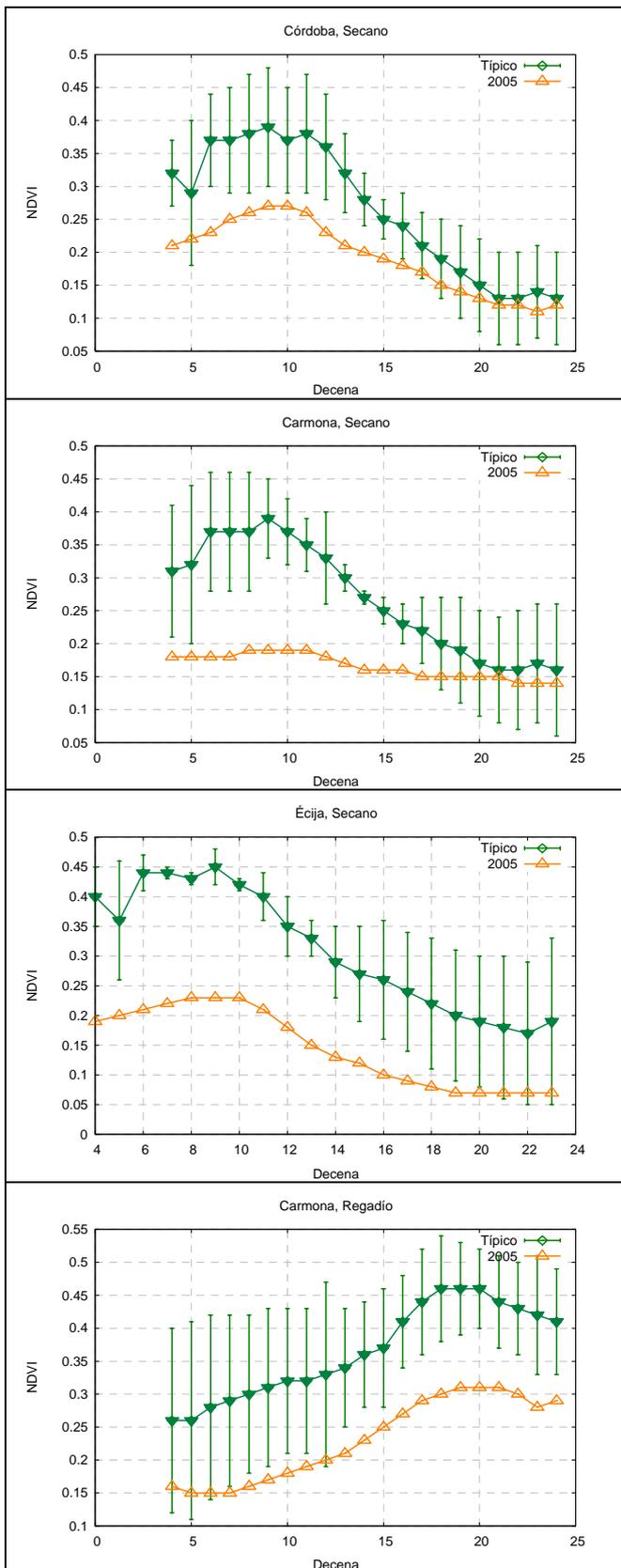


Figura 22. Evolución temporal del NDVI de herbáceos de secano y regadío con el sensor NOAA/AVHRR

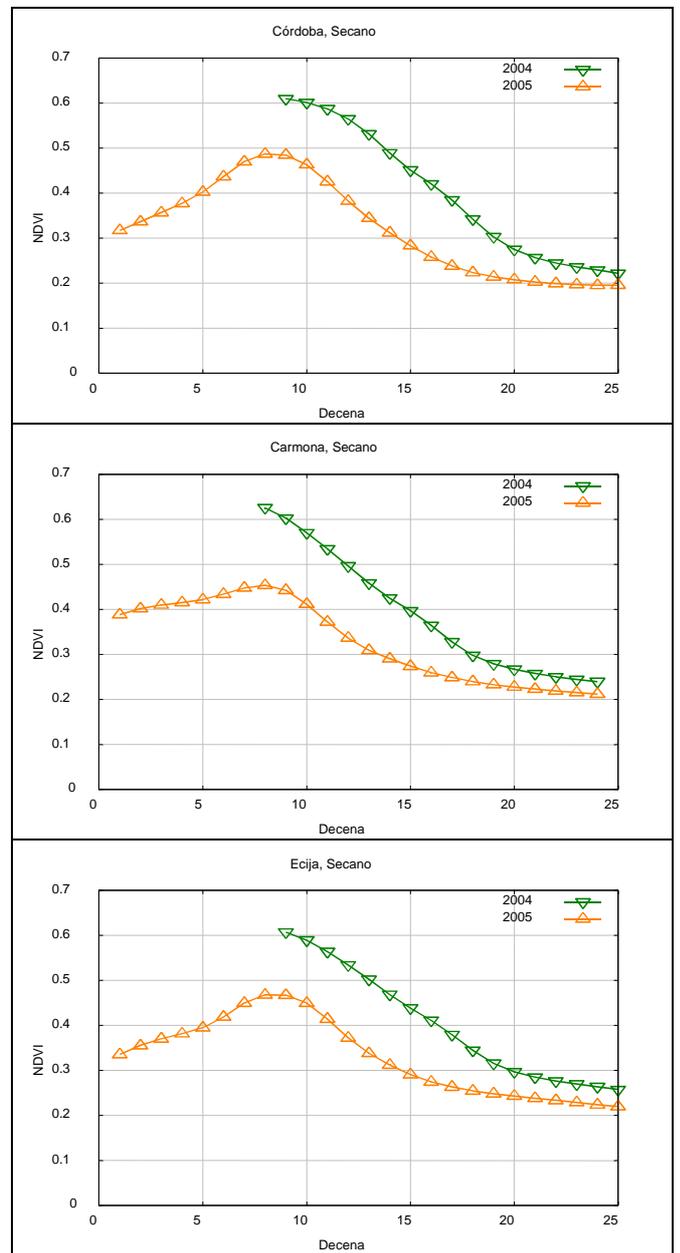


Figura 23. Evolución temporal del NDVI en herbáceos de secano con el sensor TERRA/MODIS

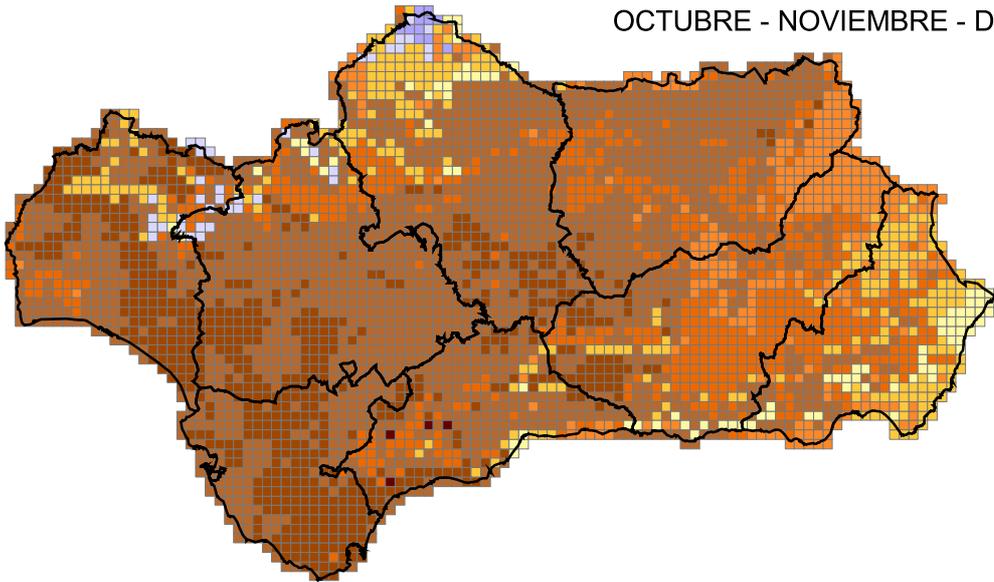
Anexo

Mapas de precipitación trimestral

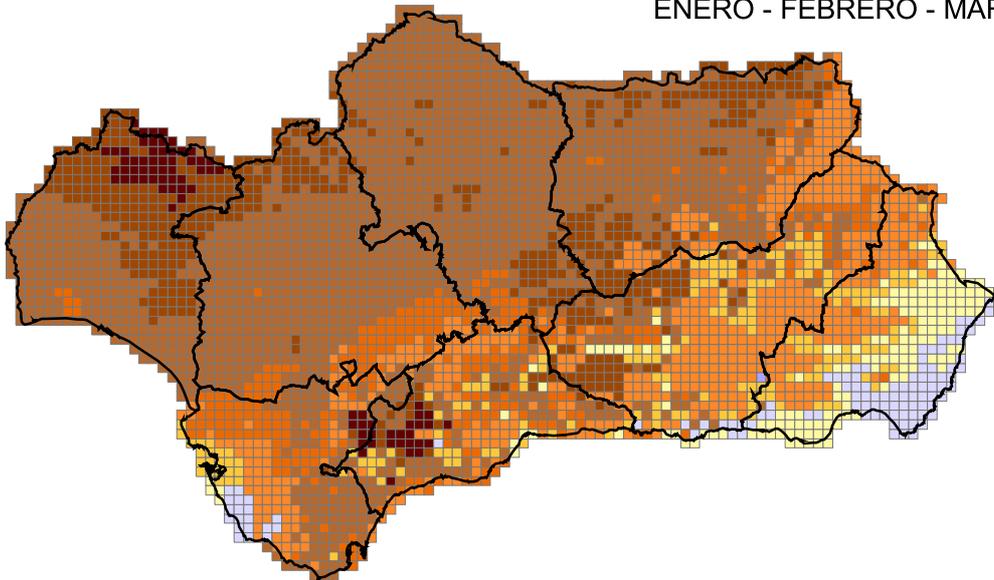
DIFERENCIA DE PRECIPITACIÓN TRIMESTRAL CAMPAÑA 2004 - 2005 RESPECTO DE LA MEDIA 2000- 2004



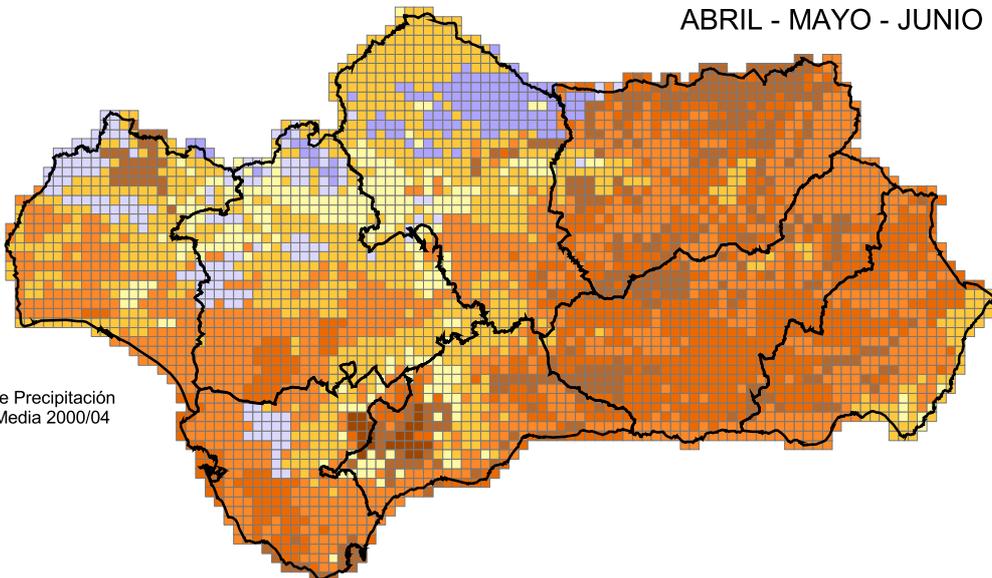
OCTUBRE - NOVIEMBRE - DICIEMBRE



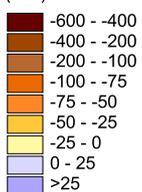
ENERO - FEBRERO - MARZO



ABRIL - MAYO - JUNIO



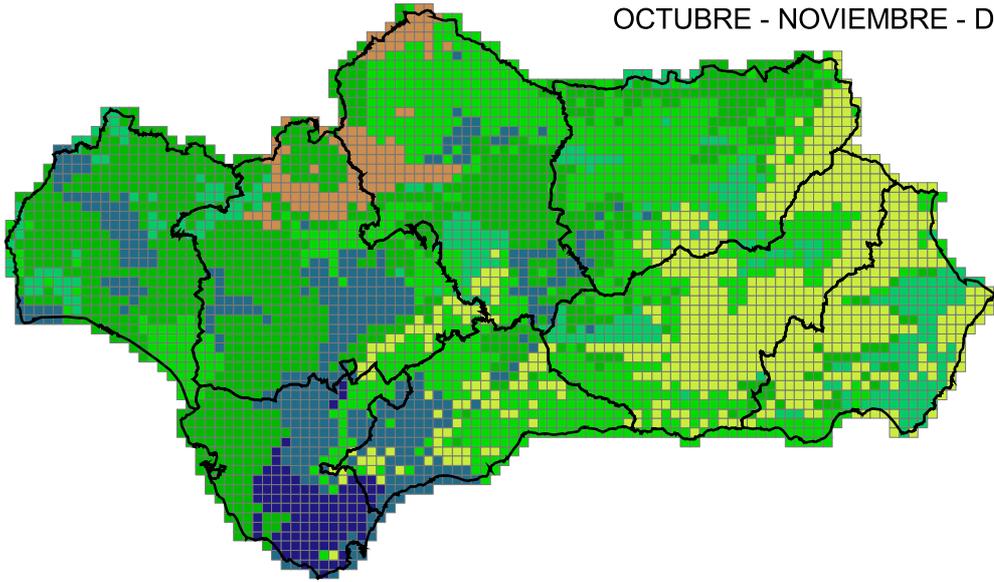
Diferencia absoluta de Precipitación
Campaña 2004/05 - Media 2000/04
(mm)



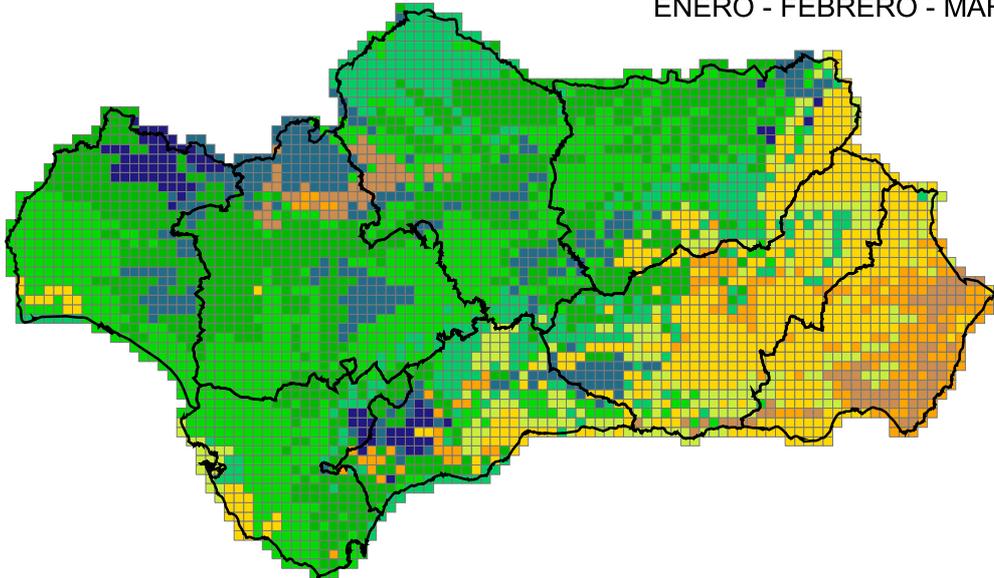
PRECIPITACIÓN TRIMESTRAL CAMPAÑA 2000 - 2001



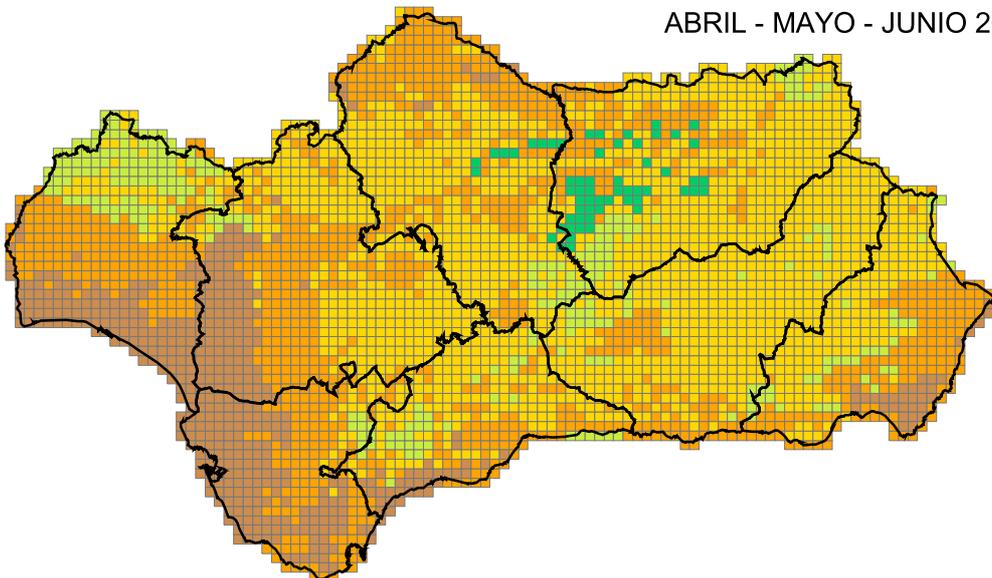
OCTUBRE - NOVIEMBRE - DICIEMBRE 2000



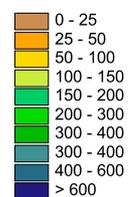
ENERO - FEBRERO - MARZO 2001



ABRIL - MAYO - JUNIO 2001



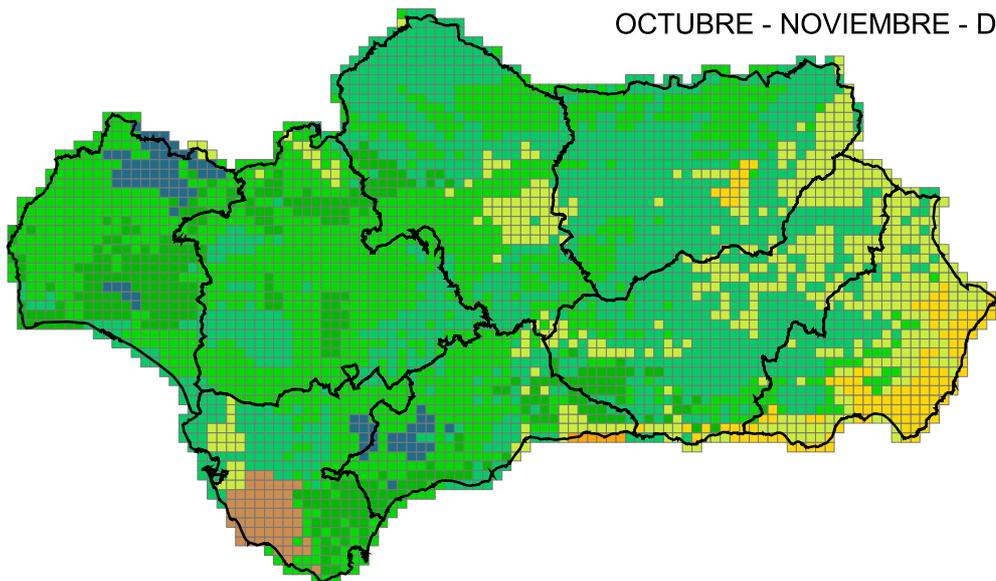
Precipitación Trimestral
Acumulada (mm)



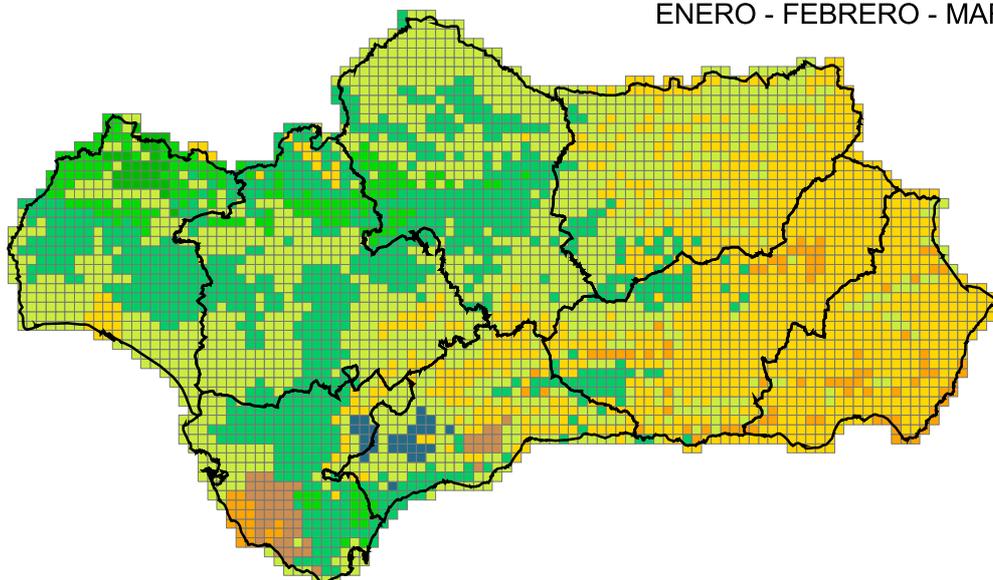
PRECIPITACIÓN TRIMESTRAL CAMPAÑA 2001 - 2002



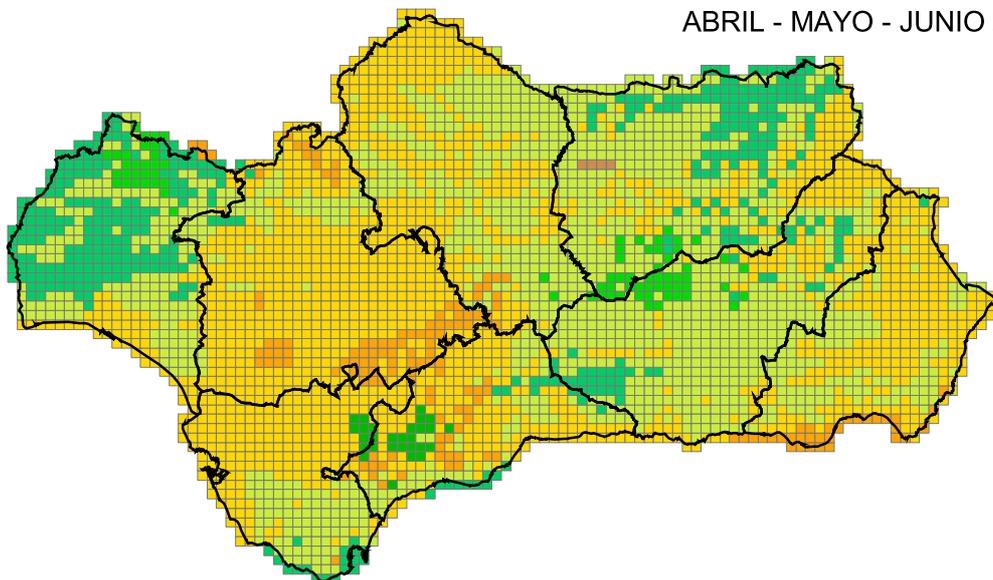
OCTUBRE - NOVIEMBRE - DICIEMBRE 2001



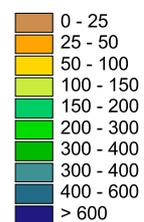
ENERO - FEBRERO - MARZO 2002



ABRIL - MAYO - JUNIO 2002



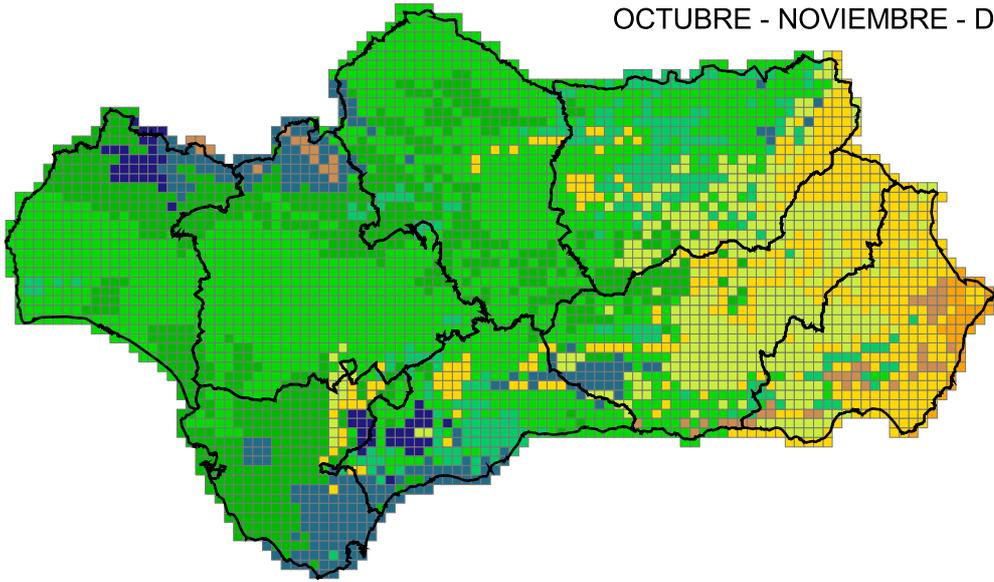
Precipitación Trimestral
Acumulada (mm)



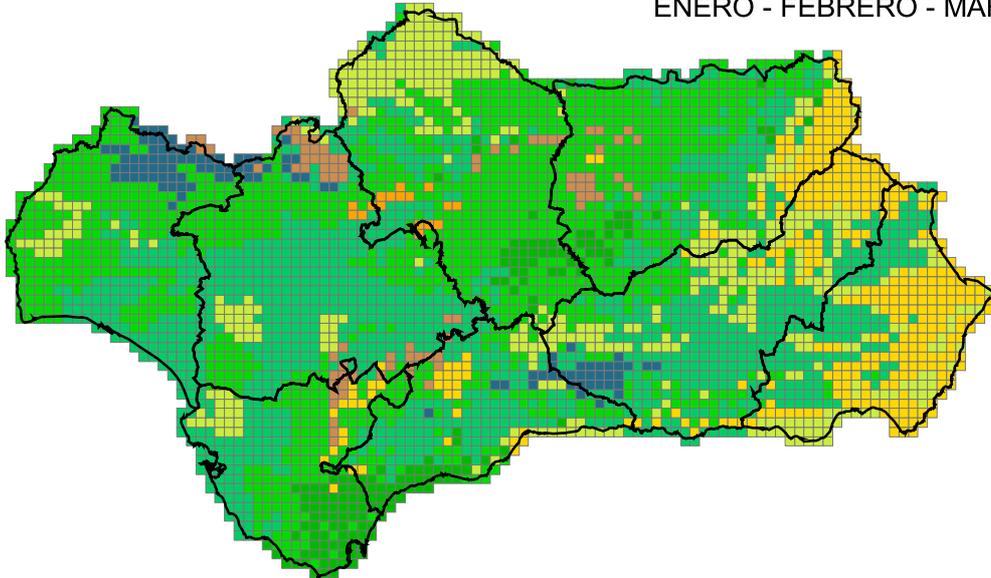
PRECIPITACIÓN TRIMESTRAL CAMPAÑA 2002 - 2003



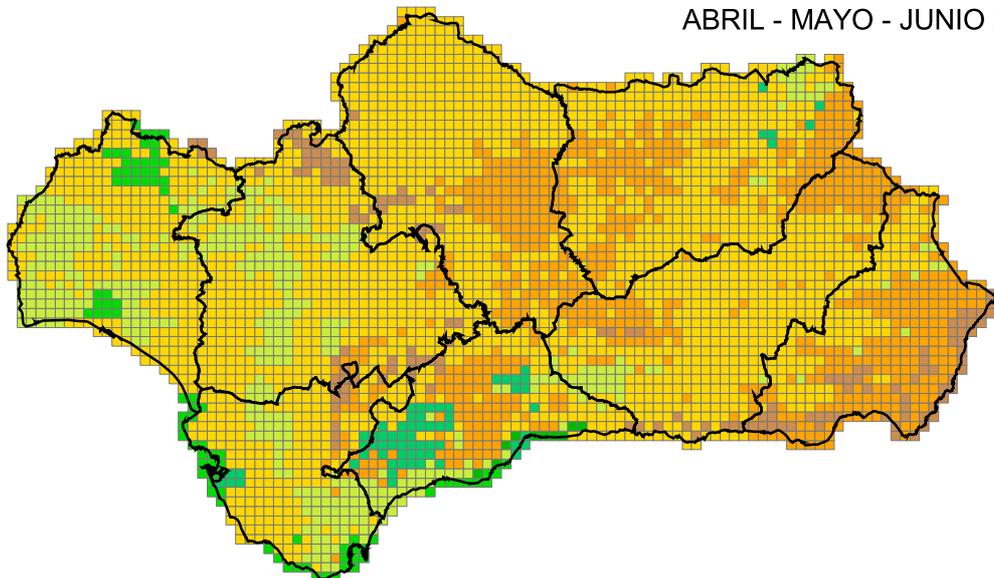
OCTUBRE - NOVIEMBRE - DICIEMBRE 2002



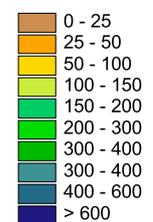
ENERO - FEBRERO - MARZO 2003



ABRIL - MAYO - JUNIO 2003



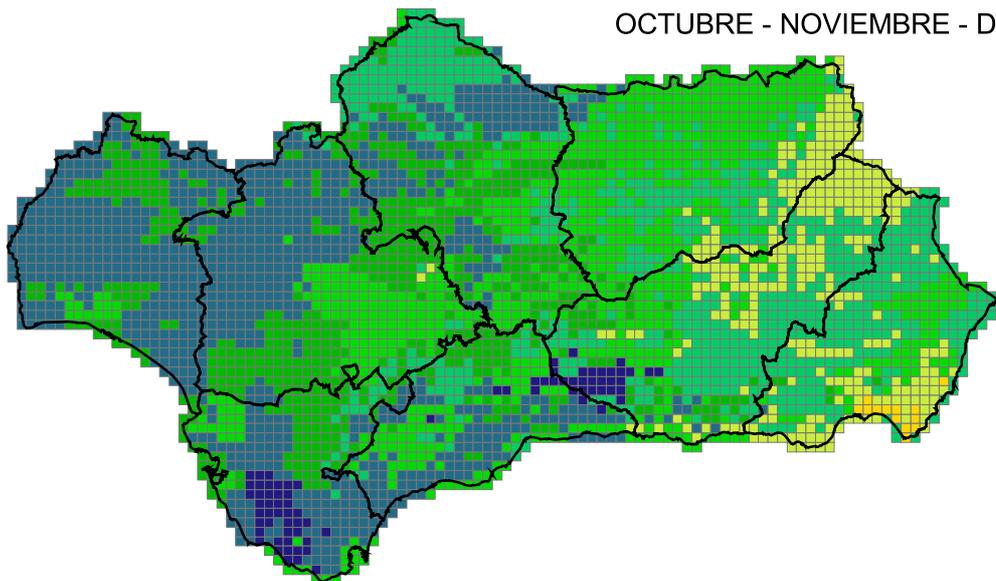
Precipitación Trimestral
Acumulada (mm)



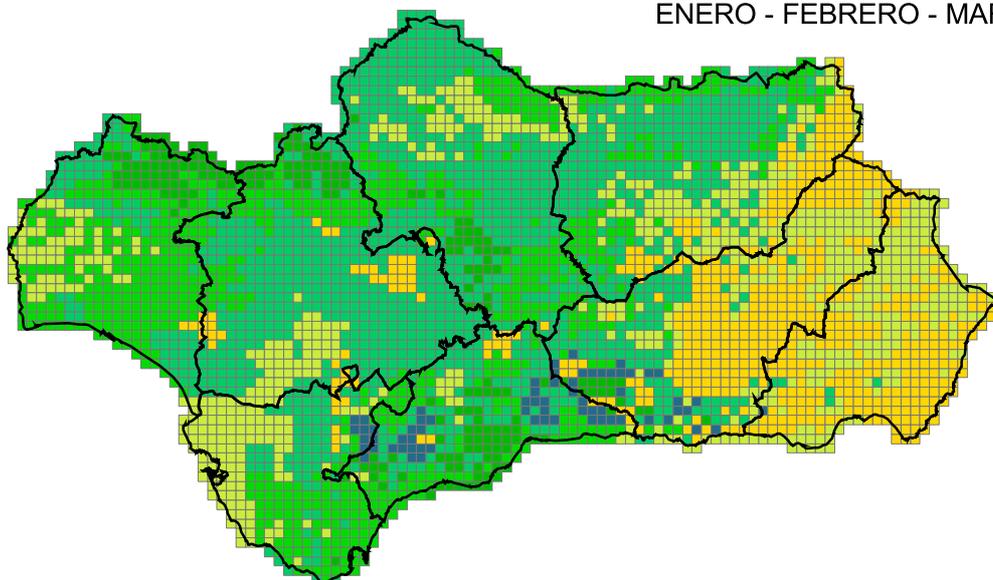
PRECIPITACIÓN TRIMESTRAL CAMPAÑA 2003- 2004



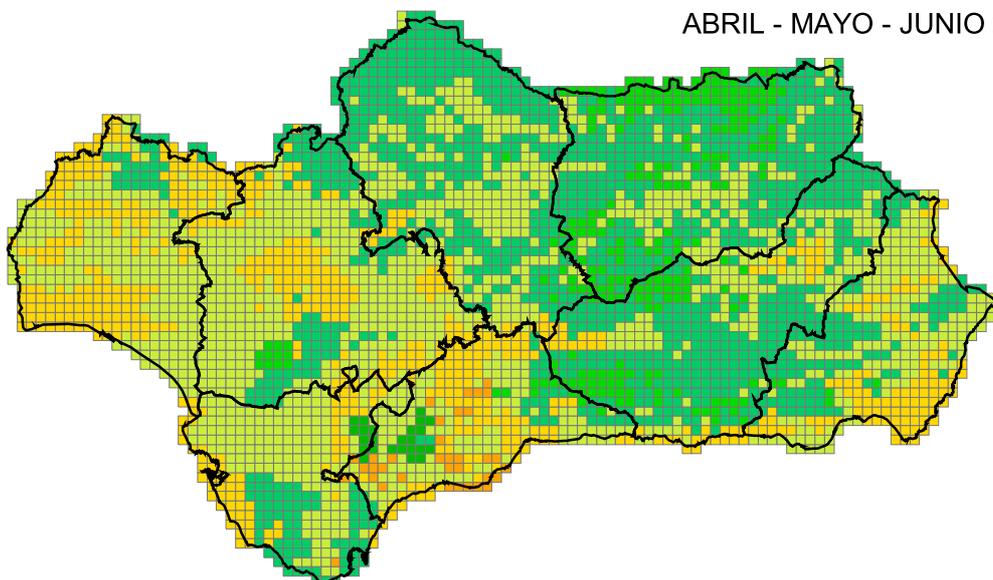
OCTUBRE - NOVIEMBRE - DICIEMBRE 2003



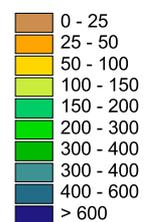
ENERO - FEBRERO - MARZO 2004



ABRIL - MAYO - JUNIO 2004



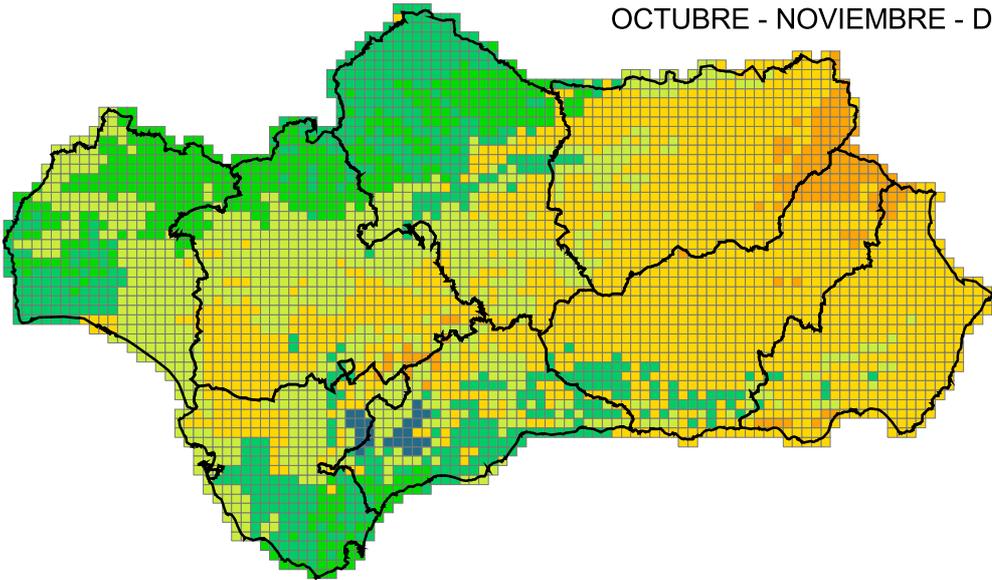
Precipitación Trimestral
Acumulada (mm)



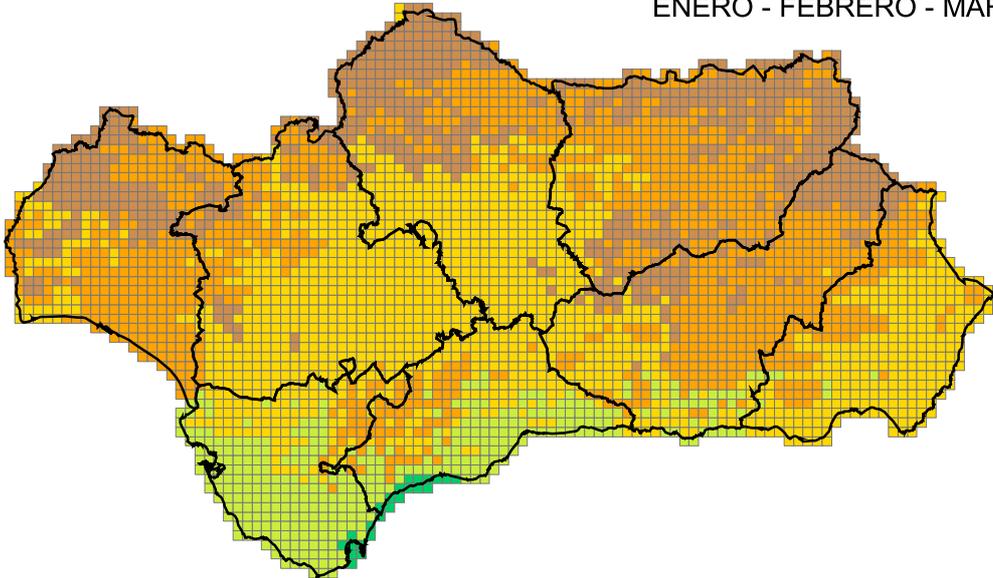
PRECIPITACIÓN TRIMESTRAL CAMPAÑA 2004- 2005



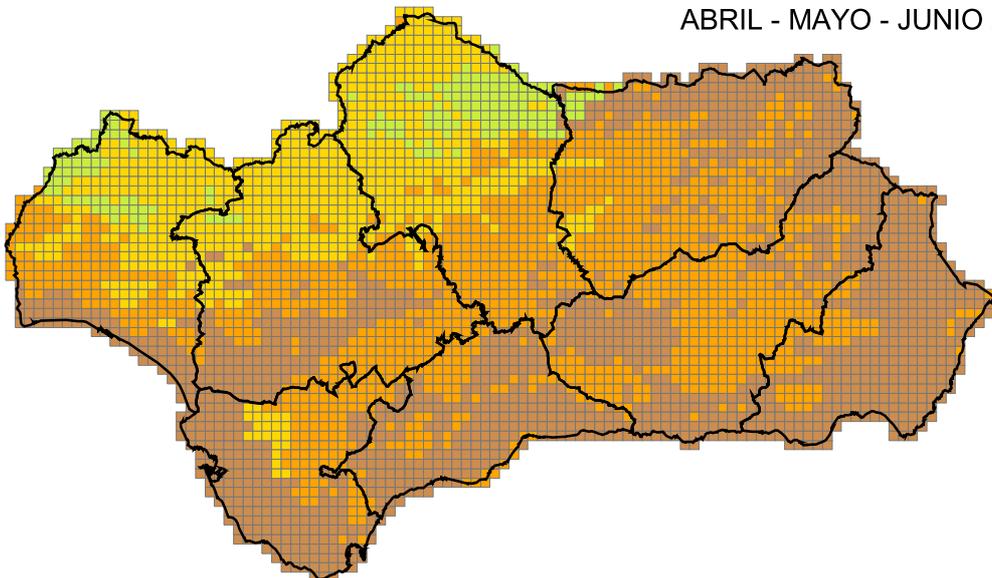
OCTUBRE - NOVIEMBRE - DICIEMBRE 2004



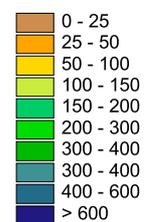
ENERO - FEBRERO - MARZO 2005



ABRIL - MAYO - JUNIO 2005



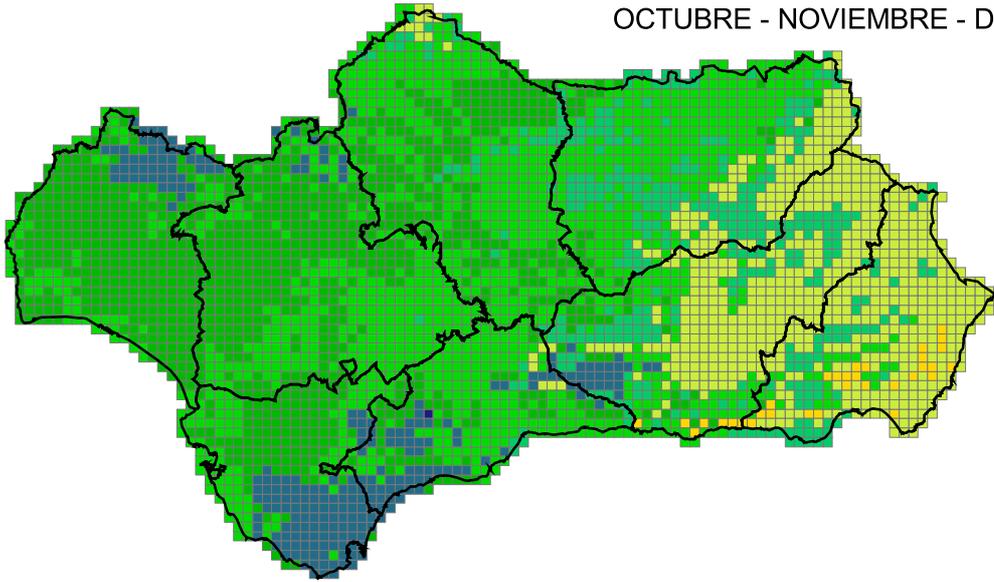
Precipitación Trimestral
Acumulada (mm)



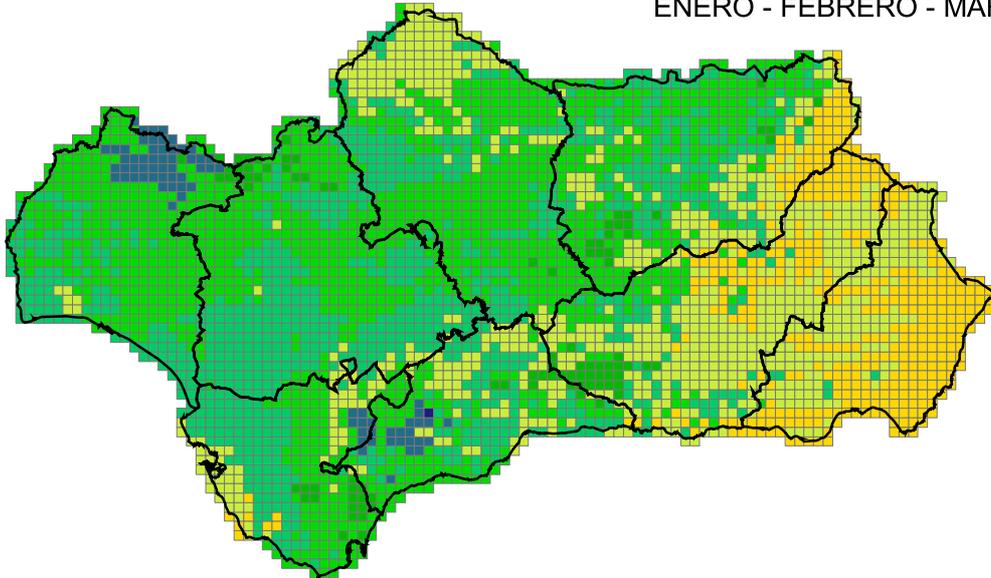
PRECIPITACIÓN TRIMESTRAL MEDIA 2000- 2004



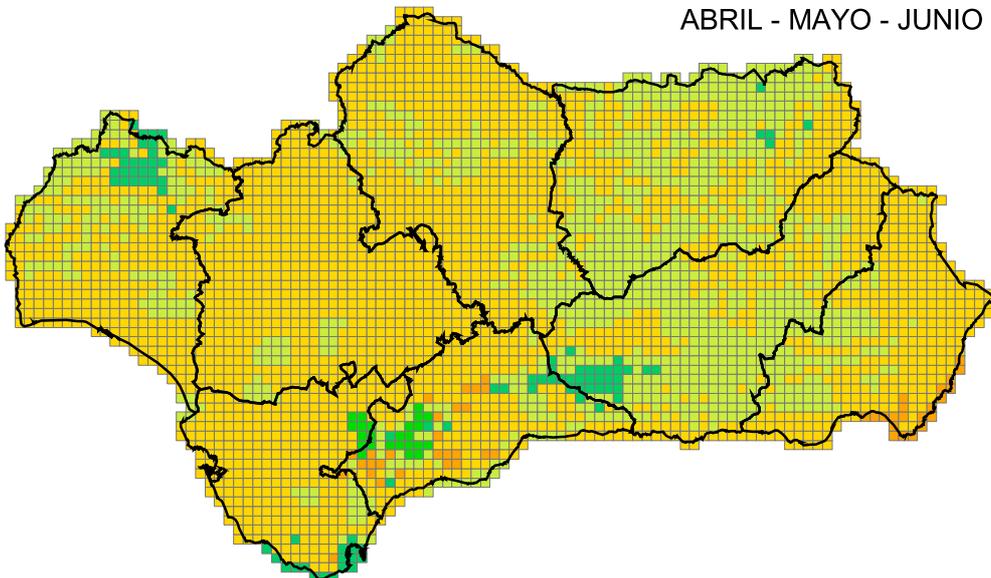
OCTUBRE - NOVIEMBRE - DICIEMBRE



ENERO - FEBRERO - MARZO



ABRIL - MAYO - JUNIO



Precipitación Trimestral
Acumulada (mm)

