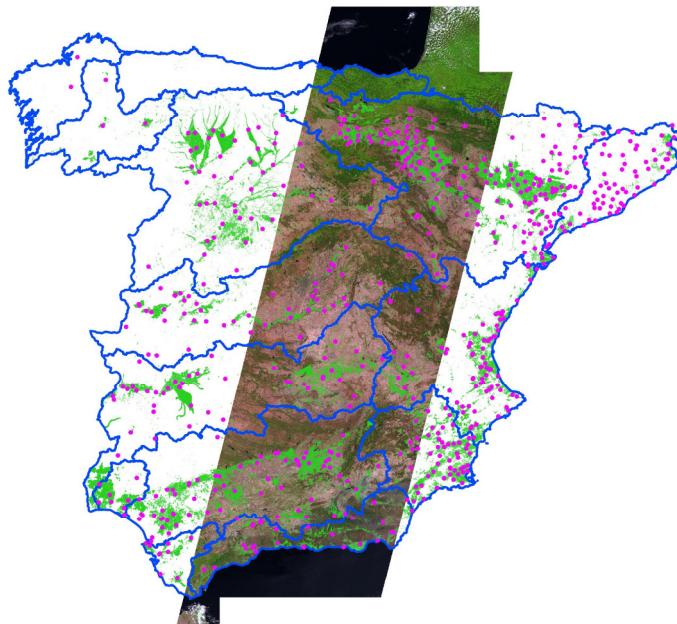


INFORME FINAL DEL PROYECTO ESPACIO SiAR AÑO 2018



**DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES
HÍDRICAS EN EL REGADÍO ESPAÑOL
MEDIANTE HERRAMIENTAS BASADAS EN
EL SIAR, LA TELEDETECCIÓN Y LOS SIG**

**MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO RURAL, INNOVACIÓN Y
POLÍTICA FORESTAL**

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE REGADÍOS E INFRAESTRUCTURAS RURALES

DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS EN EL REGADÍO ESPAÑOL MEDIANTE HERRAMIENTAS BASADAS EN EL SIAR, LA TELEDETECCIÓN Y LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA AÑO 2018

**Informe final
Madrid, Septiembre de 2019**

Autores:

Raquel Bravo Rubio. Directora Técnica del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR). Subdirección General de Regadíos e Infraestructuras Rurales. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación

Alfonso Calera Belmonte. Director de la Sección de Teledetección y SIG. Instituto Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha.

Iván Cilleros Fuentetaja, Hortensia Crespo Muñoz. Gerencia de Ingeniería y Edificación. TRAGSATEC.

Rosario Escudero Barbero, Blanca Sanchez Hernández. Gerencia de Sistemas de Información Geográfica. TRAGSATEC.

Jesús Garrido Rubio. Sección de Teledetección y SIG. Instituto Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha.

ÍNDICE

MEMORIA RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. INTEGRACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN Y DEL SIAR PARA EL SEGUIMIENTO CONTINUO DE LAS SUPERFICIES AGRÍCOLAS REGADAS Y SUS NECESIDADES HÍDRICAS	2
2.1. <i>PROCESADO DE IMÁGENES DE SATÉLITE MULTIESPECTRALES</i>	3
2.2. <i>CLASIFICACIÓN DE CULTIVOS EN REGADÍO</i>	4
2.3. <i>BALANCE DE AGUA EN EL SUELO MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN Y EL SiAR</i>	6
2.4. <i>DISTRIBUCIÓN DE LA INFORMACIÓN</i>	7
3. RESULTADOS DE LA MONITORIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES AGRÍCOLAS REGADAS Y SUS NECESIDADES HÍDRICAS	8
3.1. <i>RESULTADOS DE LAS SUPERFICIES AGRÍCOLAS REGADAS</i>	8
3.2. <i>RESULTADOS DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS ESTIMADAS</i>	11
4. ACCESO A LAS SECUENCIAS TEMPORALES DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y LOS PRODUCTOS	14
5. CONCLUSIONES	16

MATERIALES, MÉTODOS Y RESULTADOS

1. EL SISTEMA DE INFORMACIÓN AGROCLIMÁTICA PARA EL REGADÍO (SIAR) Y EL PROYECTO ESPACIO SIAR	19
2. METODOLOGÍA DE LOS PRODUCTOS BÁSICOS	20
2.1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA DEL PROCESADO	20
2.2. DIMENSIÓN DEL PROCESADO, ÁMBITO ESPACIAL Y TEMPORAL	21
2.3. IMÁGENES EMPLEADAS	22
2.4. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	22
2.5. CORRECCIONES RADIOMÉTRICAS	23
2.6. CORRECCIONES ATMOSFÉRICAS	23
2.7. PROCESADO DE NDVI	27
2.8. PROCESADO DE RGB	27
2.9. PROCESADO DE LA MÁSCARA DE NUBES/SOMBRA PARA LANDSAT	28
2.10. PROCESADO DE LA MÁSCARA DE NUBES/SOMBRA EN S2	33
2.11. PROCESADO DE IMÁGENES COEFICIENTE BASAL DE CULTIVO (Kcb)	34
2.12. DESARROLLO DE SOFTWARE: INTEGRACIÓN DE LOS ANTERIORES PROCESOS MANUALES EN UN SOFTWARE PARA PROCESADO AUTOMÁTICO	35
2.13. DETALLE DE LAS IMÁGENES PROCESADAS EN FECHAS Y PRODUCTOS	38
3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS EN EL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN REGADÍO MEDIANTE RECURSOS DE TELEDETECCIÓN Y APOYO CARTOGRÁFICO	39
3.1. ESQUEMA GENERAL DEL PROCEDIMIENTO DE CLASIFICACIÓN	39
3.2. MATERIAL EMPLEADO EN LA CLASIFICACIÓN	40
3.3. MATERIAL EMPLEADO EN LA OBTENCIÓN DE LAS DIFERENTES CLASES	40
3.4. PROCEDIMIENTO DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR ÁRBOLES DE DECISIÓN	41
3.5. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE EVOLUCIÓN DE NDVI PARA DIFERENTES USOS DEL SUELO	43
3.6. INCORPORACIÓN DE LA INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA DISPONIBLE	45
3.7. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DE USOS DE SUELO EN REGADÍO	46

4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y METODOLÓGICAS EN EL PROCESO DE SIMULACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DIARIAS MEDIANTE HIDROMORE48	
4.1. ASPECTOS METODOLÓGICOS DEL MODELO EMPLEADO POR HIDROMORE	48
4.2. MATERIAL DE ENTRADA	52
4.3. RESULTADOS DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS POR DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS	55
4.4. INTEGRACIÓN DE LA RED SIAR EN LA ESTIMACIÓN DIARIA DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS.....	57
5. CONTROL DE CALIDAD EN EL PROCESADO DE IMÁGENES	58
5.1. CONTROLES DE CALIDAD SOBRE LA IMAGEN.....	58
5.2. CONTROLES DE CALIDAD SOBRE LA SERIE TEMPORAL	59
5.3. OTROS CONTROLES DE CALIDAD.....	59
6. ACCESO A LAS SECUENCIAS TEMPORALES DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y LOS PRODUCTOS	63
7. CONCLUSIONES	67
8. BIBLIOGRAFÍA	68

ANEXO I. DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES DE AGUA Y DE RIEGO MEDIANTE ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS Y SERIES TEMPORALES DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS: METODOLOGÍA KC-ETO BASADA EN TELEDETECCIÓN	1
3. DISPONIBILIDAD DE IMÁGENES DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN	5
4. APLICACIÓN A CULTIVOS HERBÁCEOS	6
5. APLICACIÓN A LA VIÑA Y CULTIVOS LEÑOSOS	10
6. BALANCE DE AGUA EN EL SUELO Y DEFINICIÓN DEL COEFICIENTE DE ESTRÉS HÍDRICO	16

ANEXO II. ESTACIONES METEOROLÓGICAS EMPLEADAS EN EL PROYECTO ESPACIO SIAR 2018

19

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. ALCANCE DE LOS PRODUCTOS Y SERVICIOS GENERADOS POR <i>ESPACIO SiAR</i>	3
TABLA 2. LEYENDA DE USOS DE SUELO EN REGADÍO CLASIFICADOS POR EL PROYECTO <i>ESPACIO-SiAR</i>	5
TABLA 3. SUPERFICIE REGADA (HA) POR USOS Y DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS EN EL AÑO 2018	9
TABLA 4. SUPERFICIE REGADA (HA) POR USOS Y COMUNIDADES AUTÓNOMAS EN 2018.....	10
TABLA 5. VOLUMEN NETO ANUAL DE RIEGO (HM3/AÑO) POR DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS EN EL AÑO 2018.	11
TABLA 6. VOLUMEN DE RIEGO NETO MENSUAL (HM3/MES) EN DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA, 2018.....	12
TABLA 7. VOLUMEN DE RIEGO NETO MENSUAL (HM3/MES) POR COMUNIDAD AUTÓNOMA, 2018.	13
TABLA 8. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SATÉLITES EMPLEADOS.....	22
TABLA 9. ESPECIFICACIÓN DETALLADA DE LOS SENSORES A BORDO DE LOS SATÉLITES <i>L8</i> Y <i>S2A</i>	26
TABLA 10. ENTRADAS Y SALIDAS DEL MODELO MÁSCARA DE NUBES.	28
TABLA 11. MÁSCARA DE NUBES.....	30
TABLA 12. RESUMEN DE LAS IMÁGENES PROCESADAS.	38
TABLA 13. USOS DEL SUELO CLASIFICADOS ASÍ COMO SU LEYENDA Y DESCRIPCIÓN.	40
TABLA 14. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA OBTENCIÓN DE LAS DIFERENTES CLASES.	41
TABLA 15. USOS <i>SIGPAC</i> PARA LA CLASIFICACIÓN.....	45
TABLA 16. CÓDIGO DE LOS USOS DEL SUELO EN REGADÍO CLASIFICADOS.	46
TABLA 17. SUPERFICIE REGADA (HA) POR USOS Y DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS EN 2018.	47
TABLA 18. PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE <i>Hidromore</i> ® Y SUS FUENTES DE INFORMACIÓN.	54
TABLA 19. VOLUMEN NETO ANUAL DE RIEGO (HM3/AÑO) ORIGINADO POR DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS EN 2018.....	55
TABLA 20. VOLUMEN DE RIEGO NETO MENSUAL (HM3/MES) EN DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA, 2018.....	56
TABLA 21. ESTACIONES EMPLEADAS POR DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA Y SISTEMA DE EXPLOTACIÓN.	57
TABLA 22. FORMATO DE SALIDA DE LOS PRODUCTOS BÁSICOS	58
TABLA 23. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA CUENCA MEDITERRÁNEA DE ANDALUCÍA.	21
TABLA 24. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE LAS ISLAS BALEARES	22
TABLA 25. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE LAS ISLAS CANARIAS.....	22
TABLA 26. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL DUERO.....	23
TABLA 27. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO.....	25

TABLA 28. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE GALICIA-COSTA.	27
TABLA 29. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE GUADALETE Y BARBATE.	27
TABLA 30. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR.	28
TABLA 31. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA.	29
TABLA 32. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR.	31
TABLA 33. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL MIÑO-SIL.	32
TABLA 34. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA.	32
TABLA 35. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL TAJO.	34
TABLA 36. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL TINTO, ODIEL Y PIEDRAS.	35
TABLA 37. ESTACIONES EMPLEADAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE LAS CUENCAS INTERNAS DE CATALUÑA.	36

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA METODOLÓGICO DE TRABAJO EN <i>ESPACIO SiAR</i> PARA LA INTEGRACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN Y DEL SIAR. CONTIENE VARIAS PARTES DE TRABAJO BIEN DIFERENCIADAS POR LAS QUE FINALMENTE SE OBTIENEN DIFERENTES PRODUCTOS VÁLIDOS EN LA MONITORIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES REGABLES.....	2
FIGURA 2. CONJUNTO DE PRODUCTOS BÁSICOS TRAS EL PROCESADO DE LAS IMÁGENES SENTINEL Y RESOLUCIÓN ESPACIAL GENERADOS EN <i>ESPACIO SiAR</i>	4
FIGURA 3. ESQUEMA METODOLÓGICO DEL BALANCE DE AGUA EN SUELO ASISTIDO POR TELEDETECCIÓN ESPACIAL Y TEMPORALMENTE DISTRIBUIDO QUE DESARROLLA <i>HIDROMORE</i> ®	7
FIGURA 4. ASPECTO DE LA WEB DEL PROYECTO <i>ESPACIO SiAR</i> WWW.ESPACIOSIAR.ES DONDE SE HAN CARGADO LOS PRODUCTOS PARA SU CONSULTA LIBRE Y GRATUITA POR LOS DIFERENTES USUARIOS DEL AGUA	7
FIGURA 5. DIAGRAMA DEL PROCESAMIENTO BÁSICO DE IMÁGENES DEL SATÉLITE <i>LANDSAT 8</i> (<i>L8</i>) Y DE LOS <i>SENTINEL – 2</i> (<i>S2</i>). LOS DIFERENTES COLORES MUESTRAN LOS PROCESADOS REALIZADOS (VERDE), LOS PRODUCTOS INTERMEDIOS OBTENIDOS (AZUL) Y LOS PRODUCTOS BÁSICOS FINALES GENERADOS (NARANJA).	20
FIGURA 6. ÁMBITO ESPACIAL. DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA (LÍNEA AZUL), ZONAS REGABLES (POLÍGONOS VERDES) Y ESTACIONES DEL <i>SIAR</i> (PUNTOS ROSAS).	21
FIGURA 7. CADENA DE PROCESADO MÁSCARA DE NUBES/SOMBRA.....	29
FIGURA 8. MÁSCARA DE NUBES GENERADA	30
FIGURA 9. MÁSCARA DE SOMBRA GENERADA	31
FIGURA 10. MÁSCARA DE NUBES Y SOMBRA COMBINADA	32
FIGURA 11. ASPECTO FINAL DE LA MÁSCARA DE NUBES Y SOMBRA COMBINADA EN TODA UNA IMAGEN.....	32
FIGURA 12. CATEGORÍAS DE PÍXEL GENERADAS TRAS LA CLASIFICACIÓN DE ESCENA (IMAGEN TOMADA DEL MANUAL <i>SEN2COR</i>).	33
FIGURA 13. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESADO DURANTE LA FASE 1 (ARRIBA) Y 2 (ABAJO).	37
FIGURA 14. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN.	39
FIGURA 15. ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN.....	42
FIGURA 16. EJEMPLO ESQUEMÁTICO DE LA CONSTRUCCIÓN DE CLASIFICACIÓN EN ÁRBOL.	43
FIGURA 17. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES USOS DE SUELO EN REGADÍO CLASIFICADOS.	44
FIGURA 18. COEFICIENTE DE ESTRÉS HÍDRICO, <i>Ks</i> (ALLEN ET AL., 1998).	50
FIGURA 19. BALANCE DE AGUA EN LA ZONA RADICULAR (ALLEN ET AL., 1998).....	51
FIGURA 20. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS ENTRADAS Y SALIDAS A <i>HIDROMORE</i> ®.	53
FIGURA 21. ALGUNOS EJEMPLOS DE MÁSCARA DE NUBES Y SOMBRA TESTEADAS (<i>FMASK</i> , <i>SNAP</i> , <i>SEN2COR</i>).....	60
FIGURA 22. DIFERENCIAS EN LA MÁSCARA DE NUBES Y SOMBRA GENERADA POR <i>L8</i>	61
FIGURA 23. LIGERO DESPLAZAMIENTO EN LOS BORDES DE LAS ÓRBITAS PARA LAS IMÁGENES <i>S2A</i> DESCARGADAS DESDE EL SERVIDOR DE LA <i>ESA</i>	62

FIGURA 24. CONJUNTO DE PRODUCTOS BÁSICOS TRAS EL PROCESADO DE LAS IMÁGENES LANDSAT 8 Y RESOLUCIÓN ESPACIAL GENERADOS EN ESPACIO SIAR	63
FIGURA 25. IMAGEN GENERAL Y DETALLE DE CÓMO SE OBSERVAN LOS DISTINTOS CULTIVOS EN REGADÍOS SEGÚN LAS CLASES DE LA LEYENDA EN LOS MAPAS ANUALES DE USOS DEL SUELO EN REGADÍO EN ESPACIO SIAR	64
FIGURA 26. IMAGEN DE CÓMO SE OBSERVAN LOS DISTINTOS CULTIVOS EN REGADÍOS SEGÚN LAS CLASES DE LA LEYENDA EN LOS MAPAS ANUALES DE USOS DEL SUELO EN REGADÍO.....	65
FIGURA 27. EVOLUCIÓN DE UNA CUBIERTA DE TRIGO DE REGADÍO PARA EL AÑO 2012, DESCRITA MEDIANTE EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN OBTENIDO DESDE UNA SERIE TEMPORAL DE IMÁGENES DEIMOS1. EN LA FIGURA SE MUESTRAN SUPERPUESTAS LAS FASES DEL CICLO DE CRECIMIENTO SEPARADAS POR LÍNEAS DISCONTINUAS Y TAMBIÉN ALGUNAS FASES FENOLÓGICAS RELEVANTES.	7
FIGURA 28. EVOLUCIÓN DE LA CUBIERTA VEGETAL EN DOS PUNTOS DE UNA VIÑA REPRESENTATIVA DE LA ZONA MANCHA, DESCRITA MEDIANTE EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN OBTENIDO DESDE UNA SECUENCIA DE IMÁGENES DE SATÉLITE SENTINEL	10
FIGURA 29. COMPARACIÓN DE LOS VALORES MEDIDOS Y MODELADOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA UN CULTIVO DE VIÑEDO EN REGADÍO (AÑO 2007), CASO A, Y VIÑEDO EN SECANO (AÑO 2009), CASO B. ADAPTADO DE (CAMPOS ET AL., 2010c) Y (CAMPOS ET AL., 2010a).....	14
FIGURA 30. EVOLUCIÓN MENSUAL DEL COEFICIENTE KCB PROMEDIO ($\bar{\phi}$) Y DIAGRAMAS MENSUALES DE FRECUENCIAS DE LOS VALORES OBTENIDOS EN TODA LA SUPERFICIE ESTUDIADA DURANTE EL AÑO 2009.....	15

LISTADO DE SIGLAS

AOI: Área de interés (Area of interest)

API: Interfaz de Programación de Aplicaciones (Application Programming Interface)

BOA: Parte baja de la atmósfera (Bottom of Atmosphere)

ESA: Agencia Espacial Europea (European Space Agency)

ET: Evapotranspiración

ET_o: Evapotranspiración del cultivo de referencia

ET_c: Evapotranspiración del cultivo

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

FAO56: Estudio de la FAO Riego y Drenaje nº 56. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.

FC: Cítricos

Fc: Fracción de cobertura vegetal verde

FEGA: Fondo Español de Garantía Agraria

FEOGA: Fondo Europeo de Orientación y Garantía Agrícola

FR: Frutales

INV: Invernaderos

Kc: Coeficiente único de cultivo

Kcb: Coeficiente basal de cultivo

L8: Landsat 8

MAPAMA: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente

MSI: Instrumento Multiespectral a bordo de los satélites 2A y 2B (Multispectral Instrument)

NASA: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (National Aeronautics and Space Administration)

NDVI: Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (Normalized Difference Vegetation Index)

NIR: Infrarrojo cercano (Near Infrared)

OLI: Sensor multiespectral a bordo del satélite Landsat 8 (Operational Land Imager)

OR: Olivar

P: Precipitación

QA: Evaluación de calidad (Quality Assessment)

RAW: Agua fácilmente disponible para el cultivo

RGB: Composición de color en términos de la intensidad de los colores primarios de la luz: rojo, verde y azul (Red, Green, Blue)

ROI: Regadíos de otoño – invierno

RP: Regadíos de primavera

RPV: Regadíos de primavera – verano

RV: Regadíos de verano

SAVI: Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (Soil Adjusted Vegetation Index)

SIAR: Sistema de Información Agroclimática para el Regadío

SIG: Sistema de Información Geográfica

SIGPAC: Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas

S2A: Sentinel 2A

S2B: Sentinel 2B

TAW: Agua total disponible para el cultivo, la cual puede extraer del estrato de suelo explorado por sus raíces

TOA: Parte alta de la atmósfera (Top of Atmosphere)

UDA: Unidades de demanda agraria

USGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey)

VR: Viñedo

**DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS
EN EL REGADÍO ESPAÑOL MEDIANTE
HERRAMIENTAS BASADAS EN EL SIAR, LA
TELEDETECCIÓN Y LOS SISTEMAS DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

**Proyecto ESPACIO SiAR
2018
Informe final**

MEMORIA RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SiAR) tiene como misión optimizar el uso del agua en el regadío, promoviendo su sostenibilidad económica, social y medioambiental, mediante el asesoramiento a los regantes, facilitándoles información agroclimática relevante y estimaciones de riego, en el marco las actuaciones de impulso del desarrollo rural y del cumplimiento de requerimientos medioambientales que lleva a cabo el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

La Subdirección General de Regadíos e Infraestructuras Rurales del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), ha desarrollado el proyecto ESPACIO SiAR a lo largo del año 2018, en el marco de su Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR), a través de Tragsatec, con la participación de la Sección de Teledetección y SIG del Instituto de Desarrollo Regional de la Universidad de Castilla-La Mancha.

El proyecto ESPACIO SiAR integra los datos procedentes de las estaciones del SIAR del MAPA, ubicadas en las principales zonas regables, con las secuencias temporales de imágenes de los satélites Landsat 8, Sentinel 2A y Sentinel 2B, con el objetivo principal de realizar un seguimiento mediante teledetección de los cultivos que permita determinar con la mayor precisión posible las necesidades hídricas de los cultivos, para emplear el agua necesaria en el momento preciso, lo que llevará a un ahorro de agua y energía y, por otra parte, a la obtención de un rendimiento óptimo de los cultivos, teniendo en cuenta los cambios tecnológicos que está incorporando el sector agroalimentario en la actualidad.

La información obtenida se pone a disposición del amplio abanico de usuarios potenciales, entre otros: regantes individuales, gestores de comunidades de regantes, servicios de asesoramiento, así como la propia administración para la planificación de los recursos hídricos a medio y largo plazo, a través de servicios gratuitos y de libre acceso mediante herramientas WebSIG. Con ello, se pretende proporcionar una herramienta adicional para la toma de decisiones que conllevan la programación de riegos y, en consecuencia, una mayor eficiencia en el uso del agua.

Se pueden consultar de manera libre y gratuita todos los productos y servicios, generados por el proyecto ESPACIO SiAR, en la plataforma webSIG en la página web www.espaciosiar.es. Los productos disponibles del proyecto ESPACIO SiAR son los siguientes:

- Secuencias temporales formadas por 18.121 imágenes multiespectrales tomadas por los satélites Landsat 8 (L8), Sentinel – 2A (S2A) y Sentinel – 2B (S2B), con el fin de monitorizar en parcela los cultivos en regadío mediante: a) índices de vegetación (NDVI); b) imágenes en color (RGB); y c) coeficiente basal de cultivo (Kcb).
- Secuencia mensual y anual de mapas temáticos de superficies regadas.
- Monitorización de zonas regables de: a) variables agroclimáticas de demanda evapotranspirativa (ET₀) y precipitación (P); y b) componentes del balance de agua en

suelo asistido por teledetección e integrado con la red **SiAR** como son la evapotranspiración de los cultivos (ET_c) y las necesidades de agua de riego (R).

- Información de las anteriores secuencias mensuales agregadas espacialmente a las zonas regables de interés tales como: demarcaciones hidrográficas actualizadas a los nuevos planes hidrológicos de cuenca.
- Localización de las estaciones del **SiAR** y consulta de los últimos datos registrados por cada una de ellas.
- Información cartográfica de interés como los recintos SIGPAC, así como la búsqueda guiada y por coordenadas.

2. INTEGRACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN Y DEL SIAR PARA EL SEGUIMIENTO CONTINUO DE LAS SUPERFICIES AGRÍCOLAS REGADAS Y SUS NECESIDADES HÍDRICAS

La integración de los datos procedentes de las estaciones agrometeorológicas con la información multiespectral recogida por los diferentes satélites permite monitorizar y estimar las necesidades hídricas de los cultivos mediante un balance de agua en el suelo asistido por teledetección, espacial y temporalmente distribuido (Garrido-Rubio et al., 2012). En la Figura 1 se muestra el esquema metodológico empleado para tal fin.

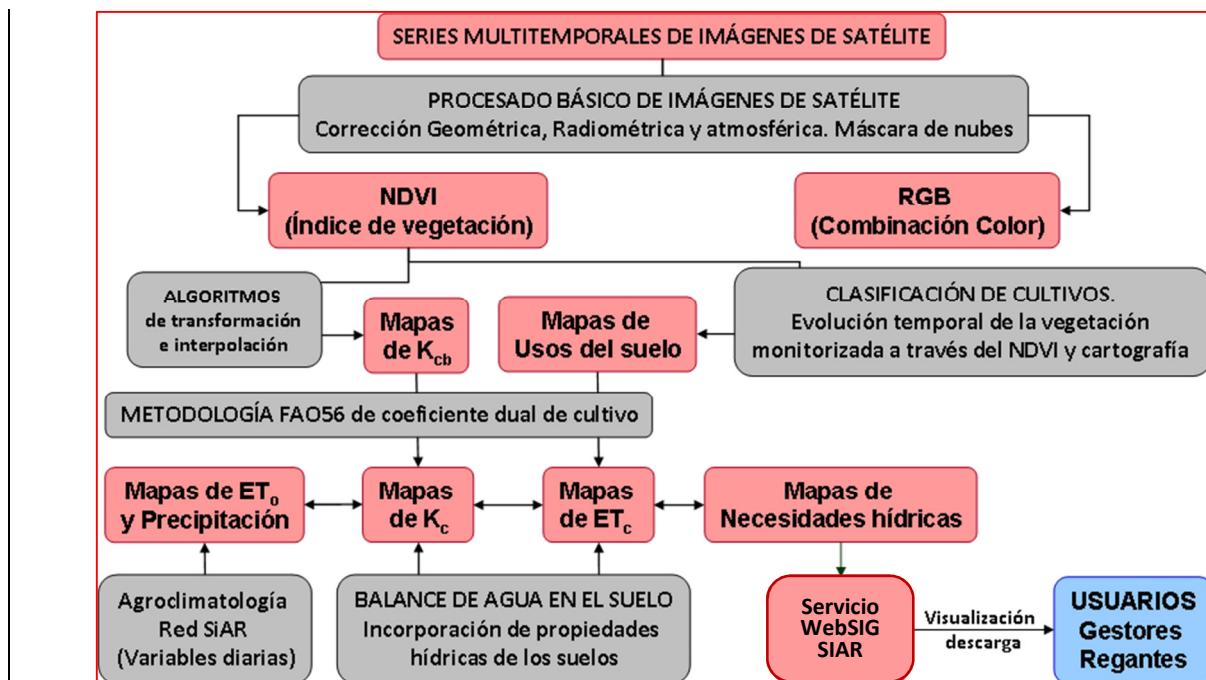


Figura 1. Esquema metodológico de trabajo en ESPACIO SiAR para la integración de la teledetección y del SIAR. Contiene varias partes de trabajo bien diferenciadas por las que finalmente se obtienen diferentes productos válidos en la monitorización de las superficies regables.

Así mismo, cada tipo de producto atiende a diferentes escalas espaciales de trabajo, con lo que da servicio a diferentes usuarios del agua como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Alcance de los productos y servicios generados por **ESPACIO SiAR**

Segmento de trabajo	Productos generados	Alcance de los servicios
Procesado de imágenes de satélite	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Secuencias temporales de imágenes NDVI, RGB y Kcb 	Monitorización a escala de parcela en tiempo real por usuarios privados del agua como regantes y/o asesores
Clasificación de cultivos en regadío	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mapas temáticos de cultivos en regadío. ▪ Mapas de cambios en el uso del suelo de regadío 	Monitorización en diferentes escalas de trabajo por gestores del agua en comunidades de regantes y administraciones
Balance de agua en el suelo. Estimación de las necesidades hídricas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mapas temáticos de la evapotranspiración actual (ETc) ▪ Mapas temáticos de las necesidades de riego (R) 	Monitorización en varias escalas de trabajo por usuarios del agua como regantes y/o asesores y gestores del agua en comunidades de regantes y administraciones
Distribución de la información vía servicios webSIG	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plataforma de distribución de la información 	Acceso de forma libre y gratuita que permite la monitorización en tiempo real y desde cualquier punto geográfico

2.1. PROCESADO DE IMÁGENES DE SATÉLITE MULTIESPECTRALES

El número total de imágenes procesadas entre los años 2016 y 2018 ha sido de 18.121. El proyecto **ESPACIO SiAR** se ha basado en el procesado de imágenes procedentes del satélite Landsat 8, Sentinel 2A y Sentinel 2B, con las que se ha cubierto toda la superficie española.

En concreto, para el satélite Landsat 8, 48 escenas (path-row) que abarcan España han sido procesadas. En cada escena L8 una imagen de unos 175 x 175 km es capturada, presentando una resolución espacial de 30 m, y un periodo de revista de 16 días (8 días en las zonas de solape).

Por otro lado, para los satélites Sentinel 2A y Sentinel 2B se procesaron 106 gránulos, que cubren España. En cada gránulo, de unos 100 x 100 km, una imagen es capturada, presentando una resolución espacial de 10 m y un periodo de revista de aproximadamente 10 días para el mismo satélite y de 5 días si se combinan ambos. En consecuencia, debido al menor

tiempo de revisita de S2A y S2B que proporcionan un mayor número de imágenes y presentan una resolución espacial mayor, se ha escogido el satélite Sentinel – 2 como el de referencia para el proyecto **ESPACIO SiAR**, con lo que los productos avanzados de clasificación de usos del suelo en regadío y de las componentes del balance de agua asistido por teledetección pasan a tener una resolución espacial de 10m.

En detalle, a partir de las 18.121 imágenes procesadas, se ha generado una densa secuencia temporal de imágenes NDVI, RGB y Kcb. Así, por cada uno de estos productos el usuario dispone de 18.121 imágenes NDVI, RGB y Kcb. Éste último producto Kcb, así como el NDVI, de gran valor para la estimación de las necesidades hídricas, se han distribuido libres de nubes y sombras. A este conjunto de productos los hemos denominado productos básicos (Figura 2). Por tanto, los productos básicos, orientados a la monitorización en parcela, pueden ser aprovechados por regantes o servicios de asesoramiento al riego. Mediante las secuencias temporales de imágenes RGB el usuario puede observar cualitativamente la evolución de sus parcelas y detectar posibles uniformidades. Esta información, acompañada cuantitativamente por las secuencias temporales de NDVI facilitará al usuario el diagnóstico de sus cultivos. Por último, mediante las series temporales de Kcb el regante puede utilizar una información capital a la hora de programar los riegos de forma eficiente. Siendo además una información personal y directamente obtenida de su parcela.

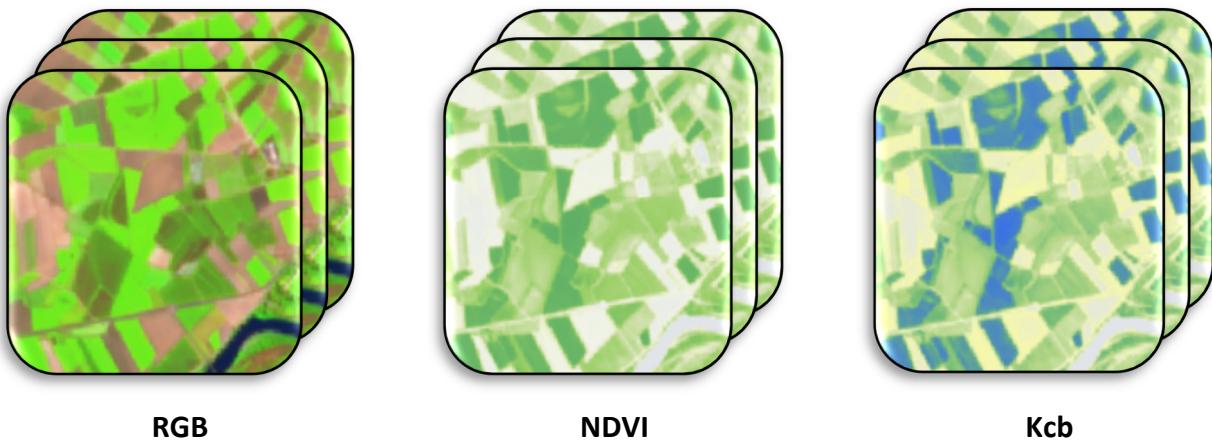


Figura 2. Conjunto de productos básicos tras el procesado de las imágenes sentinel y resolución espacial generados en **ESPACIO SiAR**

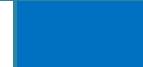
2.2. CLASIFICACIÓN DE CULTIVOS EN REGADÍO

Se ha generado un mapa de usos de suelo en regadío para el año 2018, a escala 10x10m que abarca la superficie española. Para su construcción, la metodología se basa en la combinación de una clasificación basada en secuencias multitemporales de imágenes NDVI, junto con el análisis e integración de múltiples fuentes cartográficas mediante herramientas SIG. En consecuencia, el conocimiento de la evolución temporal de las diferentes cubiertas vegetales ha sido el instrumento esencial en la identificación de los cultivos de regadío, pues la evolución temporal del NDVI derivado de dichas secuencias permite describir la evolución

temporal de la cubierta vegetal. Por lo tanto, se puede hacer el seguimiento mediante el NDVI de las diferentes fases de desarrollo en el crecimiento del cultivo. Resaltar que, aquellos cultivos que presenten una similar evolución fenológica y de cobertura del suelo presentarán una similar evolución en su NDVI (Calera *et al.*, 1999).

La generación de estos mapas de usos de suelo en regadío es un instrumento esencial en el seguimiento de las zonas regables por los **gestores del agua**. Su estudio permite identificar los cultivos y su evolución sobre el territorio, lo que aporta una poderosa herramienta para desarrollar la planificación. La Tabla 2 muestra las diferentes clases de usos del suelo en regadío clasificadas, con su código y leyenda visual.

Tabla 2. Leyenda de usos de suelo en regadío clasificados por el proyecto **ESPACIO-SiAR**

Grupo	Uso del Suelo	Leyenda	Descripción
Cultivos herbáceos en regadío	Regadíos de Primavera (RP)		Desarrollo fenológico centrado en la primavera
	Regadíos de Verano (RV)		Desarrollo fenológico centrado en el verano
	Regadíos de Primavera - Verano (RPV)		Desarrollo fenológico en primavera y verano
	Regadíos de Otoño - Invierno (ROI)		Desarrollo fenológico en otoño e invierno
Cultivos leñosos en regadío	Viñedo (VR)		Diferentes especies vitivinícolas.
	Olivar (OR)		Diferentes especies oleícolas.
	Cítricos (FC)		Diferentes especies de árboles cítricos.
	Frutales (FR)		Diferentes especies de árboles frutales.
Invernadero	Invernaderos (INV)		Agricultura bajo invernaderos.

2.3. BALANCE DE AGUA EN EL SUELO MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN Y EL SIAR

Mediante la ejecución del balance de agua en el suelo asistido por teledetección se integra el procesado de imágenes de satélite que monitorizan las cubiertas vegetales en regadío y los datos registrados por las redes agroclimáticas centradas en las zonas de regadío, principalmente el **SiAR**. En consecuencia, se han determinado espacial y temporalmente distribuidas (frecuencia mensual y anual), la evapotranspiración actual de los cultivos en regadío así como sus necesidades hídricas (demanda neta de los cultivos). La herramienta empleada para su ejecución ha sido el programa libre HidroMORE¹.

Es un modelo operativo para la estimación de la recarga y la evapotranspiración que integra datos de satélite, meteorológicos, edáficos y de cultivo en el modelo de coeficiente dual FAO-56 para la determinación de la evapotranspiración de los cultivos (ET) y sus necesidades hídricas (Torres, 2010). Desarrolla a escala diaria y espacialmente distribuido el balance de agua asistido por teledetección (Figura 3) (Moreno et al., 2015). Por tanto, la extensión espacial de estudio se encuentra únicamente limitada por el tamaño de las imágenes de satélite empleadas, mientras que la escala espacial estará en función de la resolución espacial de éstas imágenes. Presenta dos logros principales: la asimilación de datos multiespectrales a través de las relaciones NDVI-Kcb y NDVI-fc; y la distribución espacial del modelo FAO56 (Torres, 2010).

Ha sido aplicado de manera continua en campos diferentes, como su uso operativo para extender datos in-situ de sensores de humedad (Sánchez et al., 2010), como herramienta para modelizar la vegetación natural y los cultivos presentes en el Alto Guadiana (Calera et al., 2011; Calera et al., 2009a), para extender la metodología de los nuevos coeficientes de cultivo basal para viñas en regadío en el acuífero 08.29 (Mancha Oriental), así como extender la metodología de monitorización de cultivos de regadío y obtención de sus necesidades de riego en cuatro grandes cuencas españolas: Júcar, Guadiana, Segura y Tajo (Garrido-Rubio et al., 2012).

La generación de los mapas temáticos ETc y de necesidades netas de riego, es de gran interés para diferentes usuarios del agua, especialmente para aquellos gestores públicos encargados de desarrollar los planes hidrológicos de las diferentes demarcaciones hidrográficas. Al obtener series temporales mensuales de la evaporación actual de los cultivos y de sus necesidades hídricas, tras incorporar las condiciones meteorológicas registradas por las redes agroclimáticas, se obtiene información más detallada de los recursos hídricos empleados. Es, por tanto, un camino que facilita el cumplimiento de la Directiva Marco Agua.

¹ El programa HidroMORE ha sido desarrollado por la Sección de Teledetección y SIG del Instituto de Desarrollo Regional de la Universidad de Castilla-La Mancha. Se puede consultar más información en: <http://www.hidromore.es/>

En la siguiente imagen se muestran todos los elementos de partida tenidos en cuenta en el proyecto ESPACIO SiAR.

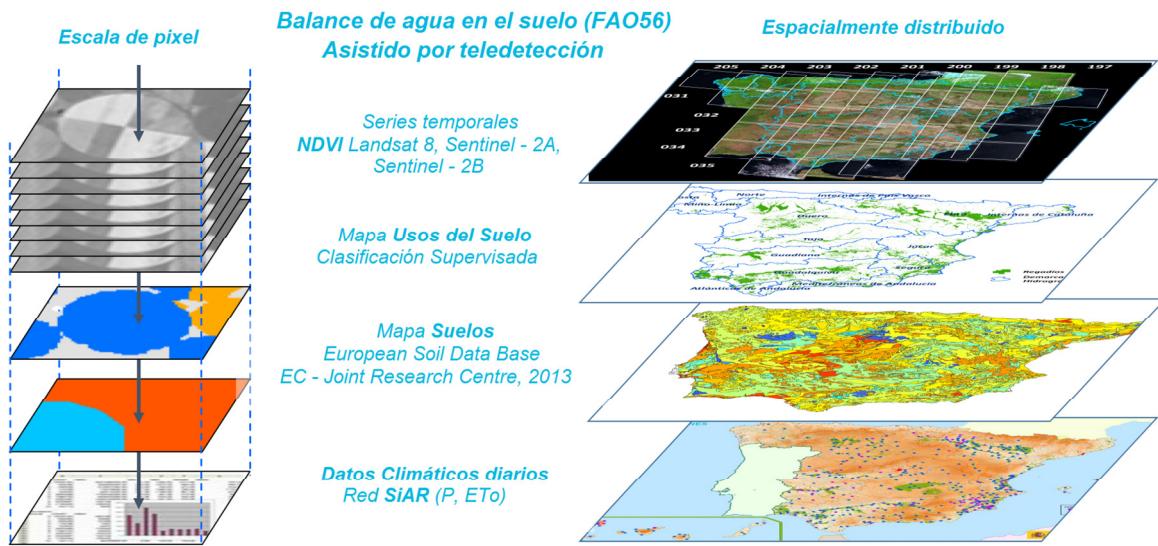


Figura 3. Esquema metodológico del balance de agua en suelo asistido por teledetección espacial y temporalmente distribuido que desarrolla **HidroMORE®**

2.4. DISTRIBUCIÓN DE LA INFORMACIÓN

A través de la página web del proyecto ESPACIO SiAR se facilita, a los diferentes usuarios, de manera gratuita y sin necesidad de instalar ningún software, el acceso a las secuencias temporales de los diferentes productos generados en **ESPACIO SiAR**.

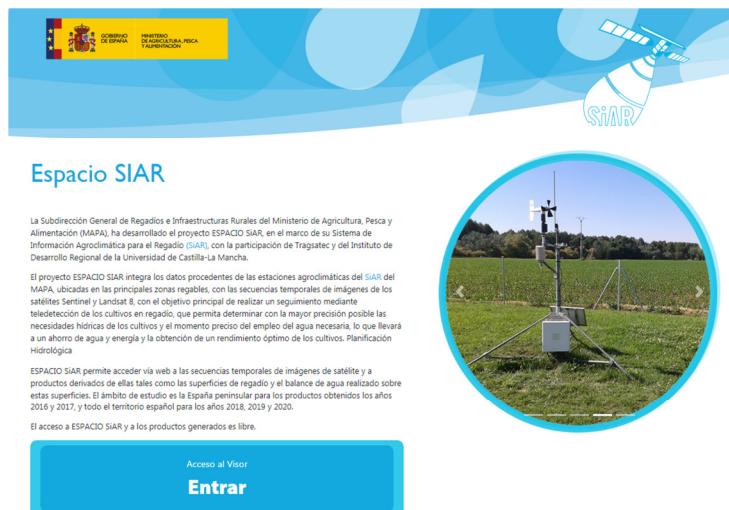


Figura 4. Aspecto de la web del proyecto **ESPACIO SiAR** www.espaciosiar.es donde se han cargado los productos para su consulta libre y gratuita por los diferentes usuarios del agua

3. RESULTADOS DE LA MONITORIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES AGRÍCOLAS REGADAS Y SUS NECESIDADES HÍDRICAS

Operando de la manera descrita en detalle en este informe final, se identifican las superficies en riego en cada año del estudio así como sus necesidades hídricas netas.

3.1. RESULTADOS DE LAS SUPERFICIES AGRÍCOLAS REGADAS

En la Tabla 3 se muestran los resultados de la superficie agrícola regada por demarcación hidrográfica y por tipo de cultivo del año 2018 (según el código y leyenda de cultivos en regadío presentados anteriormente en la Tabla 2). Así mismo, se muestran también en la

Tabla 44, de usos del suelo por comunidad autónoma (las superficies totales por usos del suelo según comunidades autónomas difieren ligeramente, diferencial menor al 1%, de las proporcionadas por demarcaciones hidrográficas debido a diferentes límites de las zonas a estudiar y su tratamiento espacial del perímetro a la hora de realizar la operación SIG de cruce).

Tabla 3. Superficie regada (ha) por usos y demarcaciones hidrográficas en el año 2018.

Demarcación hidrográfica	RP	RV	RPV	ROI	VR	OR	FC	FR	INV	TOTAL
Ebro	286.879	180.928	91.190	23.443	41.042	47.085	7.337	130.269	691	808.864
Guadalquivir	110.680	108.912	12.683	10.924	2.295	333.505	41.566	29.974	7.563	658.102
Duero	252.044	206.030	15.706	7.151	9.091	720	0	3.591	277	494.610
Guadiana	121.856	89.873	9.176	8.476	172.302	43.121	4.734	29.608	936	480.082
Júcar	52.594	40.596	10.552	16.407	39.140	10.961	149.077	37.520	1.239	358.086
Tajo	78.369	48.555	13.619	9.285	9.499	31.460	9	22.381	178	213.355
Segura	19.345	8.112	4.234	28.535	22.128	10.372	53.513	45.169	5.130	196.538
Mediterráneas Andaluzas	12.720	2.874	1.313	6.928	1.089	28.014	19.072	20.923	34.881	127.814
Internas de Cataluña	18.768	11.713	8.777	5.176	1.929	9.485	832	22.235	756	79.671
Guadalete y Barbate	19.182	19.114	4.213	3.250	304	5.061	772	882	867	53.645
Tinto, Odiel y Piedras	3.021	549	37	1.003	39	2.641	14.344	2.782	9.210	33.626
Islas Canarias	1.898	503	775	3.846	1.097	74	1.067	7.489	7.487	24.236
Islas Baleares	8.738	542	1.326	4.586	208	272	1.107	1.277	224	18.280
Cantábrico Oriental	210	456	178	11	63	7	0	3.600	236	4.761
Miño - Sil	962	1.075	509	67	134	3	0	1.409	50	4.209
Galicia Costa	500	782	281	53	208	4	0	36	130	1.994
Cantábrico Occidental	41	207	365	10	1	0	0	238	144	1.006
TOTAL	987.807	720.821	174.934	129.151	300.569	522.785	293.430	359.383	69.999	3.558.879

Tabla 4. Superficie regada (ha) por usos y comunidades autónomas en 2018.

Comunidad Autónoma	RP	RV	RPV	ROI	VR	OR	FC	FR	INV	TOTAL
Andalucía	148.800	131.672	18.563	24.460	3.198	368.009	82.353	56.079	53.620	886.754
Castilla la Mancha	188.849	49.389	17.066	10.215	209.454	29.066	5	25.934	292	530.270
Castilla y León	260.637	209.472	16.205	7.332	9.482	4.403	0	7.951	292	515.774
Aragón	175.196	99.691	58.674	12.182	11.312	16.394	14	58.654	100	432.217
Cataluña	61.925	61.775	30.869	10.453	8.503	32.545	8.688	82.225	860	297.843
Comunidad Valenciana	6.624	21.216	3.390	16.153	15.093	9.356	171.749	32.028	1.577	277.186
Extremadura	47.323	101.899	12.577	10.862	6.645	49.549	76	38.810	280	268.021
Región de Murcia	11.840	4.985	2.476	21.754	11.709	4.468	28.370	33.285	4.160	123.047
Comunidad Foral de Navarra	35.177	22.704	8.306	5.520	10.560	4.889	0	5.742	430	93.328
La Rioja	18.758	4.706	1.701	695	12.212	2.885	2	5.611	45	46.615
Canarias	1.888	502	773	3.812	1.095	74	1.067	7.316	7.417	23.944
Comunidad de Madrid	12.479	6.873	1.191	930	440	800	0	165	46	22.924
Baleares	8.738	542	1.326	4.586	208	272	1.107	1.277	224	18.280
País Vasco	8.467	3.616	649	60	443	65	0	3.863	243	17.406
Galicia	945	1.330	753	86	212	7	0	39	181	3.553
Cantabria	139	439	408	15	1	0	0	222	27	1.251
Principado de Asturias	5	7	6	1	0	0	0	8	116	143
TOTAL	987.790	720.818	174.933	129.116	300.567	522.782	293.431	359.209	69.910	3.558.556

3.2. RESULTADOS DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS ESTIMADAS

La identificación previa de las superficies en riego junto a la información agrometeorológica de la red **SiAR**, principalmente, ha permitido estimar las necesidades hídricas netas de riego que se muestran de manera agregada por demarcaciones hidrográficas en la Tabla 5 y en la Tabla 6. Se presentan, por tanto, los resultados anuales y mensuales de las necesidades netas de riego (sin tener en cuenta las diferentes eficiencias), obtenidas tras realizar con HidroMORE® el balance de agua en el suelo asistido por teledetección espacial y temporalmente distribuido. Además, en la página web del proyecto ESPACIO SiAR se muestran las series temporales de necesidades de riego agregadas mensualmente.

Tabla 5. Volumen neto anual de riego (hm³/año) por demarcaciones hidrográficas en el año 2018.

Demarcación Hidrográfica	Volumen de riego neto (hm ³)
	2018
Ebro	2.836
Duero	1.554
Guadalquivir	1.448
Júcar	1.193
Guadiana	1.151
Tajo	724
Segura	642
Cuencas Med. Andaluzas	291
Cuencas Internas de Cataluña	193
Guadalete y Barbate	175
Tinto, Odiel y Piedras	73
Tenerife	29
Islas Baleares	26
Cantábrico Oriental	21
La Palma	20
Gran Canaria	19
Miño – Sil	13
Galicia – Costa	5
Cantábrico Occidental	3
La Gomera	2
El Hierro	1
Fuerteventura	0
Lanzarote	0
TOTAL	10.419

Tabla 6. Volumen de riego neto mensual (hm³/mes) en demarcación hidrográfica, 2018.

Demarcación hidrográfica	Volumen de riego neto (hm ³) en 2018											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ebro	29,5	16,2	69,4	111,2	431,2	478,9	666,3	540,7	372,3	117,3	1,3	1,8
Duero	23,8	19,9	10,2	38,2	265,7	235,1	334,1	328,5	203,1	95,4	0,2	0,2
Guadalquivir	8,1	14,7	1	26,1	125,2	184,2	358,2	404,3	256,4	67,5	1,1	1,2
Júcar	39,5	6,4	47,2	128,5	200	172,7	277,1	206,6	76	35,4	1,2	2,4
Guadiana	6,6	11,3	4,4	57,6	129	138,3	316,1	319,1	140,4	27,3	0,5	0,3
Tajo	7,3	8,7	2,1	23,9	104,4	114,7	181,4	157,5	95,8	27,4	0,5	0,3
Segura	21,8	7	48,8	75,2	87,6	89,4	118,2	83	46,2	40,6	14,6	9,9
Mediterráneas Andaluzas	5,9	9,5	4,1	11,4	32,3	57,2	67,6	54,4	31,7	12,3	2,5	2,6
Internas de Cataluña	8,3	0,4	2,6	10	20	38,7	51,5	31,2	23,5	6,7	0	0,2
Guadalete y Barbate	1,1	2,3	0	2,5	24,7	25,3	40,9	41,2	27,9	8,6	0	0,1
Tinto, Odiel y Piedras	0,6	0,9	0,1	0,3	3,2	12,1	20,1	18,4	12,8	4,4	0,2	0
Tenerife	2,7	0	0,8	2,1	2,7	3,6	3,9	3,5	4	2,3	1,1	2,7
Islas Baleares	0	0	0,7	5,6	4,7	3,9	4,6	2,2	3,3	1,4	0	0
Cantábrico Oriental	0	0	0	0,1	0,5	2,9	4,9	6,9	4,1	1,6	0	0
La Palma	1,1	0	0,3	1,6	1,1	3,3	3,4	2,9	3,2	1,3	0,4	1,1
Gran Canaria	1,2	0	0,5	1,3	1,2	3,2	2,7	2,6	3,1	1,5	0,3	1,2
Miño – Sil	0	0	0	0,5	1,9	1,3	2,7	3,4	2,2	0,6	0	0
Galicia – Costa	0	0	0	0,2	0,9	0,6	0,8	1,1	0,9	0,2	0	0
Cantábrico Occidental	0	0	0	0	0,3	0,4	0,6	1,2	0,7	0,2	0	0
La Gomera	0,2	0	0	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	0,1	0,2
El Hierro	0,1	0	0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fuerteventura	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
Lanzarote	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	157,9	97,3	192,2	496,6	1.437	1.566,3	2.455,6	2.209,1	1.308,1	452,3	24,1	24,4

Tabla 7. Volumen de riego neto mensual (hm³/mes) por comunidad autónoma, 2018.

CCAA	Volumen de riego neto (hm ³) en 2018											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Galicia	0	0	0	0,3	1,9	1,1	1,6	2,2	1,7	0,4	0	0
Principado de Asturias	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cantabria	0	0	0	0	0,5	0,5	0,9	1,5	1	0,3	0	0
País Vasco	0,6	0	0	0,7	6	12,5	10,1	12,4	6,5	2,2	0	0
Comunidad Foral de Navarra	4	1	2	3,5	40,2	37,8	55,7	60,7	40,6	18,9	0,2	0,2
Castilla y León	24,1	20,1	10,5	39,7	272,7	246,5	348,9	342,2	210,9	97,5	0,2	0,2
Aragón	12,7	11,7	53,9	78,3	273,5	265,4	386,9	285,6	206,6	67,3	0,9	1,5
Cataluña	19	3,7	16	38,3	115,7	180,9	252,9	197,5	135,9	33	0,1	0,2
La Rioja	1,5	0,2	0,4	1,1	14	19,9	16,6	20,7	9,2	4,6	0,1	0
Castilla La Mancha	11,6	11,1	12,4	110,8	219,1	154,7	245,5	215,9	77,3	25,3	1,4	1,5
Comunidad de Madrid	1,3	0,7	0,2	3,9	15,9	17,2	17,7	12,9	8,1	2,5	0,1	0,1
Comunidad Valenciana	42,7	3,9	54,1	109,4	153,3	126,3	231,2	179,1	69,3	33,6	4,4	3,8
Extremadura	4,1	10,3	1,4	10	69,4	146	303,1	290,3	164,1	37,3	0,2	0
Islas Baleares	0	0	0,7	5,6	4,7	3,9	4,6	2,2	3,3	1,4	1,4	0
Región de Murcia	14	5,6	31,8	46	54,5	57,8	74,8	51,5	29,4	26,9	9,8	7,1
Andalucía	16,6	28,6	7	43,7	190,3	285	494,2	524,6	333,2	95,8	4,6	4,3
Canarias	0	0,1	1,6	5,3	9,1	10,5	10,4	9,2	10,7	5,3	2	5,3
TOTAL	152,2	97	192	496,6	1440,8	1566	2455,1	2208,5	1307,8	452,3	25,4	24,2

4. ACCESO A LAS SECUENCIAS TEMPORALES DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y LOS PRODUCTOS

Como se ha reseñado anteriormente, la consulta de los productos generados por el proyecto **ESPACIO SiAR** es libre y gratuita.

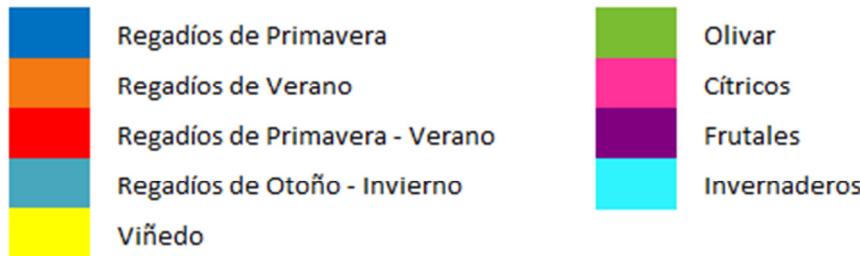
Web ESPACIO SiAR	Web propia del SIAR
www.espaciosiar.es	www.siar.es

4.1. SECUENCIAS TEMPORALES DE IMÁGENES DE SATÉLITE.

- **RGB**: secuencia temporal de imágenes combinación color.
- **NDVI**: secuencia temporal de imágenes de índice de vegetación NDVI sin nubes y sombras.
- **Kcb**: secuencia temporal de imágenes coeficiente basal de cultivo sin nubes y sombras.

4.2. USOS DEL SUELO.

- **Usos del suelo [en regadío]**: mapas descriptivos de usos de suelo en regadío clasificados según la secuencia temporal de NDVI. Divididos en diferentes clases según la leyenda:



4.3. MAPAS TEMÁTICOS DE VARIABLES AGROCLIMÁTICAS Y BALANCE DE AGUA EN SUELO.

- **Evapotranspiración actual [mm/mes y mm/año]**: secuencia temporal de imágenes que describen las necesidades hídricas acumuladas mensual y anualmente de las cubiertas vegetales en regadío.
- **Necesidades netas de riego [mm/mes y mm/año]**: secuencia temporal de imágenes que describen la dosis de riego neto acumulado mensualmente de las cubiertas vegetales en regadío.

- **Evapotranspiración de referencia [mm/mes y mm/año]:** secuencia temporal de imágenes que describen la demanda evaporativa de la atmósfera acumulada mensual y anualmente.
- **Precipitación [mm/mes y mm/año]:** secuencia temporal de imágenes que describen la precipitación acumulada mensual y anualmente.

4.4. CARTOGRAFÍA AUXILIAR.

- **Red SiAR:** capa vectorial de puntos que indica la posición de cada estación agroclimática que forma parte del SiAR.
- **Demarcaciones hidrográficas:** Capa que contiene los límites de las Demarcaciones hidrográficas
- **Recintos SIGPAC:** Capa que contiene los recintos del Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas, SIGPAC. Esta capa únicamente es visible a un nivel de zoom de 200 m
- **Catastro:** Capa que contiene los bienes inmuebles rústicos, urbanos y de características especiales
- **Nomenclador Geográfico:** Registro dinámico de información del Instituto Geográfico Nacional, que recoge las denominaciones oficiales referenciadas geográficamente que deben utilizarse en la cartografía oficial. Está constituido por la armonización del Nomenclátor Geográfico Básico de España y los Nomenclátores Geográficos de cada una de las Comunidades Autónomas
- **Divisiones Administrativas:** Unidades administrativas y límites administrativos de España con tres niveles de administración (comunidad autónoma, provincia y municipio) en función del zoom aplicado.
- **MTN IGN:** Mapa topográfico nacional procedente del instituto geográfico nacional. Las escalas representadas en función del nivel de zoom son: 1:500.000, 1:200.000, 1:100.000 y 1:25.000.
- **Ortofotos (PNOA):** Imágenes procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con resolución de 25 o 50 cm
- **Fechas Ortofotos:** Fecha de captura de las ortofotos
- **Open Street Map:** Mapa básico procedente de Open Street Maps.

5. CONCLUSIONES

Gracias al proyecto ESPACIO SiAR, llevado a cabo por la Subdirección General de Regadíos e Infraestructuras Rurales del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, MAPA, el empleo de imágenes de satélite junto con la información ofrecida por el SiAR del MAPA permite conocer a escala de píxel la evolución de las cubiertas vegetales en regadío.

Toda la información generada por el proyecto ESPACIO SiAR se pone a disposición de los diferentes usuarios, tanto en el ámbito del sector agroalimentario como de la gestión de los recursos hídricos que realizan las administraciones públicas, de forma libre y gratuita en la página web del proyecto en el ámbito nacional.

El estudio de las secuencias temporales de Kcb aporta beneficios relevantes en diferentes niveles de gestión.

Por un lado, el regante o el asesor pueden ser capaces de monitorizar el estado de sus cubiertas vegetales en regadío y, estimar las necesidades hídricas de sus cultivos. Por otro lado, el gestor de una comunidad de regantes es capaz de acceder a valores promedio agregados a la escala espacial de la propia comunidad de regantes y efectuar la comparación con la de otras campañas de riego.

De manera adicional, la estimación de las superficies de los cultivos en regadío por demarcaciones hidrográficas y por comunidades autónomas, así como de sus necesidades hídricas netas, resultan de gran relevancia para la gestión de los recursos hídricos y la planificación estratégica que realizan las administraciones públicas, en el marco del ciclo de planificación hidrológica.

Por todo ello, se puede afirmar que el proyecto ESPACIO SiAR contribuye a la mejora de la eficiencia en el uso del agua del regadío y, por lo tanto, a la eficiencia energética, además de permitir una planificación adecuada de los recursos hídricos por parte de los gestores del agua, al contar con información espacialmente agregada de la situación y evolución de los cultivos en regadío sobre grandes áreas.

**DETERMINACIÓN DE NECESIDADES HÍDRICAS EN EL
REGADÍO ESPAÑOL MEDIANTE HERRAMIENTAS
BASADAS EN EL SiAR, LA TELEDETECCIÓN Y LOS SIG**

**Proyecto ESPACIO SiAR
2018**

MATERIALES, MÉTODOS Y RESULTADOS

1. EL SISTEMA DE INFORMACIÓN AGROCLIMÁTICA PARA EL REGADÍO (SIAR) Y EL PROYECTO ESPACIO SIAR

El Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SiAR) tiene como misión optimizar el uso del agua en el regadío, promoviendo su sostenibilidad económica, social y medioambiental, mediante el asesoramiento a los regantes, facilitándoles información agroclimática relevante y estimaciones de riego, en el marco las actuaciones de impulso del desarrollo rural y del cumplimiento de requerimientos medioambientales que lleva a cabo el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Dado que resulta clave para el regadío el determinar con la mayor precisión posible las necesidades hídricas de los cultivos, con el objetivo de emplear el agua necesaria en el momento preciso, en el año 1998, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) inició el proyecto, ejecución e instalación del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío, SiAR, al amparo de la Iniciativa Comunitaria INTERREG II-C: Lucha contra la sequía, dentro de la medida 1 de mejora de la gestión y uso del agua de riego, correspondiente al subprograma 2 del FEOGA-Orientación, de competencia de la Administración General del Estado, en las comunidades autónomas de: Andalucía, Canarias, Castilla y León, Castilla-La Mancha, Comunidad Valenciana, Extremadura y Región de Murcia, instalando una serie de estaciones agroclimáticas automáticas en dichas comunidades autónomas. A continuación, en el marco del Plan Nacional de Regadíos, se procedió a su ampliación a las comunidades autónomas de Aragón, Islas Baleares, Galicia, Comunidad de Madrid y Comunidad Foral de Navarra, con superficies significativas en regadío, en las que fue posible su instalación.

En la actualidad, el SIAR es una red compuesta por más de 450 estaciones agroclimáticas ubicadas en zonas de regadío, siendo la mayor parte de ellas propiedad del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA).

La información que proporciona el SiAR es de gran utilidad para el regante y también para el MAPA, en el ámbito de la política en materia de agua a nivel nacional.

La Subdirección General de Regadíos e Infraestructuras Rurales del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), ha desarrollado el proyecto ESPACIO SiAR a lo largo del año 2018, en el marco de su Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SiAR), a través de Tragsatec con la participación de la Sección de Teledetección y SIG del Instituto de Desarrollo Regional de la Universidad de Castilla-La Mancha.

El proyecto ESPACIO SiAR integra los datos procedentes de las estaciones del SiAR del MAPA, ubicadas en las principales zonas regables, con las secuencias temporales de imágenes de los satélites Landsat 8, Sentinel 2A y Sentinel 2B, con el objetivo principal de realizar un seguimiento mediante teledetección de los cultivos que permita determinar con la mayor precisión posible las necesidades hídricas de los cultivos, para emplear el agua necesaria en el momento preciso, lo que llevará a un ahorro de agua y energía y, por otra parte, a la obtención de un rendimiento óptimo de los cultivos, teniendo en cuenta los cambios tecnológicos que está incorporando el sector agroalimentario en la actualidad.

2. METODOLOGÍA DE LOS PRODUCTOS BÁSICOS

El procesado de las imágenes de satélite, cuyo fin es obtener series multitemporales, supone una de las bases sobre la que construir los productos finales, con los que monitorizar las superficies en regadío y estimar sus necesidades hídricas. Se especifica a continuación la metodología empleada durante el procesado de las imágenes en el proyecto ESPACIO SiAR, para obtener los siguientes productos básicos:

- El índice de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)
- Imagen de combinación color (nombrada en adelante RGB)
- Coeficiente de cultivo basal (Kcb) sin nubes y sombras

2.1. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA DEL PROCESADO

En la figura siguiente, se muestra el diagrama de flujo del procesamiento básico de imágenes propuesto, para los satélites Sentinel – 2A (S2A), Sentinel – 2B (S2B) y Landsat 8 (L8).

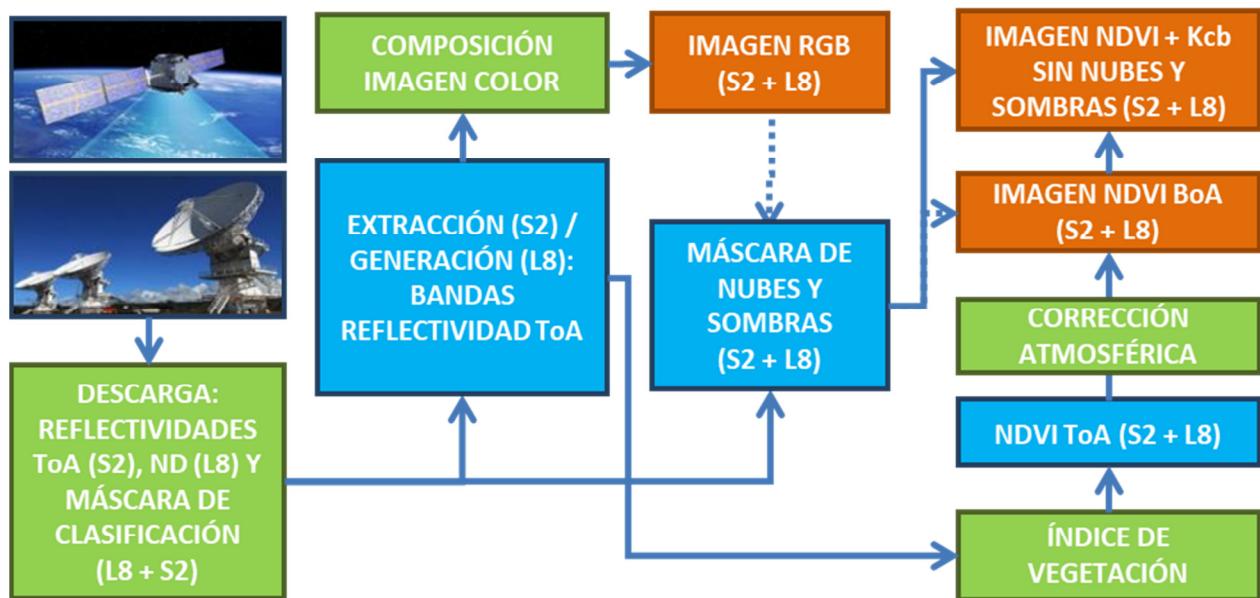


Figura 5. Diagrama del procesamiento básico de imágenes del satélite Landsat 8 (L8) y de los Sentinel – 2 (S2). Los diferentes colores muestran los procesados realizados (verde), los productos intermedios obtenidos (azul) y los productos básicos finales generados (naranja).

2.2. DIMENSIÓN DEL PROCESADO, ÁMBITO ESPACIAL Y TEMPORAL

El ámbito espacial es toda la superficie española mientras que el ámbito temporal abarca el año 2018. Su ejecución está centrada en el seguimiento de las superficies regables. En aquellas comunidades autónomas donde no existen estaciones del SiAR, la información necesaria se ha recopilado de otras redes de estaciones meteorológicas disponibles.

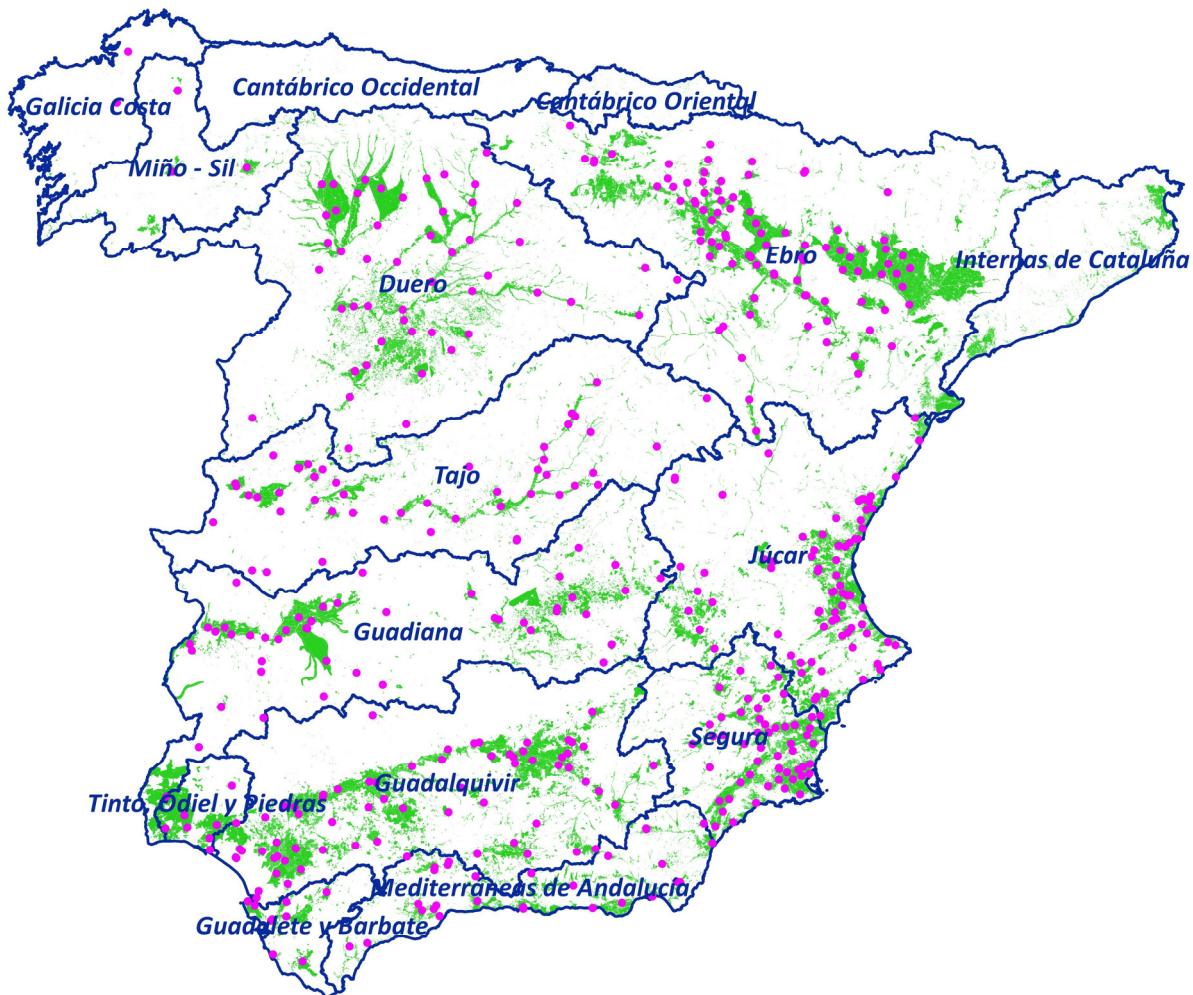


Figura 6. Ámbito espacial. Demarcaciones hidrográficas de la península Ibérica (línea azul), zonas regables (polígonos verdes) y estaciones del SiAR (puntos rosas).

2.3. IMÁGENES EMPLEADAS

Las imágenes multiespectrales del satélite Sentinel – 2 (S2A + S2B) forman el cuerpo principal de las imágenes procesadas pero, además, se han procesado imágenes del satélite Landsat 8 con el fin de aumentar la frecuencia temporal de imágenes adquiridas y ejecutar seguimiento más exhaustivo de las superficies en regadío. En la siguiente tabla se describen los detalles generales de los satélites empleados.

Tabla 8. Descripción general de los satélites empleados.

Satélite	Landsat 8 OLI	Sentinel – 2A MSI	Sentinel – 2B MSI
Barrido	180 x 180 Km (sin dividir, la imagen completa forma lo que la NASA llama escena)	290 x 290 Km (dividido en gránulos de aproximadamente 100 x 100 km)	290 x 290 Km (dividido en gránulos de aproximadamente 100 x 100 km)
Bandas espectrales y longitud de onda central (nm)	8 bandas + Pancromática NIR: 864,67 Rojo: 654,59 Verde: 561,41	13 bandas NIR: 835,1 Rojo: 664,5 Verde: 560,0	13 bandas NIR: 833,0 Rojo: 665,0 Verde: 559,0
Resolución espacial	30 m	10, 20 y 60 m (según las bandas. ESPACIO SiAR emplea aquellas a 10 m de resolución espacial)	10, 20 y 60 m (según las bandas. ESPACIO SiAR emplea aquellas a 10 m de resolución espacial)
Tiempo de revisita	16 días	10 días	10 días

2.4. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

La adquisición de imágenes depende del satélite a emplear. En todos los casos, el criterio mínimo para la descarga de las imágenes ha sido la realización de una inspección visual previa de la imagen para saber si estaba cubierta en su gran mayoría por nubes y descartar su adquisición en tal caso. Por norma general, si la cobertura nubosa es superior al 80% se descartan automáticamente las imágenes.

En cuanto a la descarga de las imágenes Landsat 8 existen diferentes posibilidades para su adquisición. El primero consiste en emplear la web del USGS llamada Global Visualization Viewer (Glovis) (<http://glovis.usgs.gov/>). Dicha web es una herramienta de búsqueda de imágenes y pedido de éstas cuya característica fundamental es que la imagen es proporcionada en un breve tiempo tras la pasada del satélite. En segundo lugar, también se han descargado

imágenes de forma masiva desde la web USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center Science Processing Architecture (ESPA) (<https://espa.cr.usgs.gov/>). Empleando esta otra web es posible adquirir un mayor número de imágenes simultáneamente aunque el tiempo de espera es superior al de la primera opción. En cuanto a la descarga de las imágenes del satélite Sentinel – 2 (S2A + S2B), la Agencia Espacial Europea (ESA) proporciona la web de acceso y descarga “Copernicus Open Access Hub” (<https://scihub.copernicus.eu/>). Dicha web es una herramienta de búsqueda de imágenes y pedido de éstas.

2.5. CORRECCIONES RADIOMÉTRICAS

En S2A no se llevan a cabo correcciones radiométricas pues se hace una descarga de las reflectividades TOA directamente. Sin embargo, para L8 se aplican unos coeficientes de corrección proporcionados por USGS mediante un fichero de metadatos (*.MLT.txt). En consecuencia obtenemos directamente, desde Números Digitales, las reflectividades TOA tras la extracción de dichos coeficientes y la corrección del ángulo solar también proporcionada por dicho fichero de metadatos. A continuación las ecuaciones empleadas.

Eq. 1

$$\rho\lambda' = M_\rho \cdot Q_{cal} + A_\rho$$

Donde:

$\rho\lambda'$: reflectancia espectral TOA captada por el sensor en la banda λ , sin corrección para el ángulo solar, $W/(m^2 \text{ sr } \mu\text{m})$.

M_ρ : Factor multiplicativo específico por banda para el re-escalado (en el fichero de metadatos el campo denominado REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda)

Q_{cal} : Valores cuantificados y calibrados del producto estándar, números digitales (ND)

A_ρ : Factor aditivo específico por banda para el reescalado (en el fichero de metadatos el campo denominado REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de banda)

Eq. 2

$$\rho_\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\theta_{sz})} = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta_{se})}$$

Donde:

$\rho\lambda'$: Reflectividad TOA captada por el sensor en la banda λ , sin unidades.

$\sin(\theta_{sz})$: elevación local del ángulo solar (proporcionado en los metadatos (SUN_ELEVATION)

$\cos(\theta_{sz})$: ángulo local cenital solar,, $\theta_{sz} = 90^\circ - \theta_{se}$

2.6. CORRECCIONES ATMOSFÉRICAS

Los métodos de corrección atmosférica pretenden eliminar o compensar los efectos atmosféricos sobre la imagen obteniendo así una señal en superficie comparable para áreas y

fechas de adquisición diferentes. De esta forma obtendremos Reflectividades BoA (por sus siglas en Inglés de “Bottom of Atmosphere”). La corrección atmosférica adoptada es un método de normalización absoluta que basa la corrección de las series de imágenes en una imagen que se considera como referencia. La reflectividad de cada banda del sensor es corregida en función de superficies consideradas invariantes (Schroeder et al., 2006), o los índices de vegetación son corregidos en base a esas superficies (Chen et al., 2005). Este método se basa por tanto en que es posible encontrar superficies en la imagen cuyo índice de vegetación es invariante en el tiempo y que dichas superficies exhiben un rango de valores de índices de vegetación que abarque una gama dinámica adecuada. El índice de vegetación de dichas superficies invariantes debe ser conocido. Las mejores superficies IV-invariantes son: suelo desnudo y vegetación muy densa, que a su vez presentan la gran ventaja de representar los dos extremos del rango dinámico de valores de índice de vegetación para la superficie terrestre. Los valores obtenidos se toman como patrón y en base a ellos se procede a la normalización de las imágenes.

2.6.1. CONSTELACIÓN MULTISENSOR L8, S2A Y S2B.

El reto al que hemos de dar respuesta en este trabajo es construir series temporales de los productos RGB y NDVI derivados de las reflectividades espectrales registradas en las imágenes de los sensores Landsat – 8 (OLI), Sentinel – 2A y Sentinel – 2B (ambos MSI), cuyas características técnicas se describen en la Tabla 9.

El procedimiento utilizado ha sido el de elegir un sensor como referencia y desarrollar una serie de ecuaciones que permitieran transformar los valores de los productos de cada uno de los sensores al de referencia para que estos fueran comparables entre sí.

La elección del sensor de referencia recayó en Landsat 8 por la mayor experiencia existente sobre él, y por coherencia con las series históricas anteriores. Sin embargo, como el programa Sentinel – 2 está cumpliendo sus objetivos y fechas, y dada la mayor resolución espacial y frecuencia temporal de estas imágenes, es prudente comenzar a preparar el cambio a referencia S2.

Para desarrollar la serie de ecuaciones que permitan transformar los valores de los productos de un sensor a otro se ha realizado la comparativa entre imágenes sincrónas, esto es tomadas por los diferentes sensores en el mismo día, de tal forma que el recorrido de la radiación solar atraviese la misma atmósfera, pues el tiempo de adquisición solo difiere en alrededor de 20 minutos entre L8 y S2. Detalle de todo este proceso se facilita en el Anejo III: Intercalibración de los sensores L8, S2A y S2B: Una constelación multisensor. Este documento técnico, cuya principal conclusión conceptual es que cuando las reflectancias e índices de Vegetación (NDVI, SAVI,...) calculadas en el techo de la atmósfera, desde un sensor se compararan con las derivadas del otro, ambas exhiben un comportamiento fuertemente lineal, muchos casos cercanas al 1:1, lo que permite utilizar ecuaciones lineales para hacer comparables ambos sensores.

En el caso de las imágenes RGB, tras el análisis de las secuencia de imágenes en la forma descrita, teniendo en cuenta que este producto RGB tiene un mayor uso cualitativo y dado el similar comportamiento de las reflectividades, se han elegido los mismos coeficientes que multiplican los valores de reflectividades TOA de las bandas con las que se construyen estas imágenes, tanto en S2 como en L8 (ver anexo III).

La magnitud NDVI reviste gran relevancia cuantitativa pues sobre esta variable descansan relaciones que permiten calcular las necesidades de agua de los cultivos. El proceso de comparación entre valores obtenidos desde ambos satélites en imágenes sincronas se llevado a cabo en diferentes áreas, y evidencia un comportamiento claramente lineal. Por ello se han desarrollado las ecuaciones 3 y 4 que permiten obtener los valores normalizados de forma absoluta desde los valores calculados en el techo de la atmósfera para valores NDVITOA dese ambos sensores.

Eq. 3

$$NDVI_{norm} = 1,0597 NDVI_{TOAL8} - 0,019$$

Eq. 4

$$NDVI_{norm} = 0,960 NDVI_{TOAS2} + 0,084$$

Donde:

NDVI_{norm}: Valor NDVI normalizado, consistente con los valores en superficie del producto NDVI Landsat7-ETM+

NDVI_{TOA, L8}: NDVI calculado desde las reflectancias en el Techo de la Atmósfera (TOA) usando las bandas del Rojo e Infrarrojo cercano del sensor L8-OLI

NDVI_{TOA, S2}: NDVI calculado desde las reflectancias en el Techo de la Atmósfera (TOA) usando las bandas del Rojo e Infrarrojo cercano del sensor S2A y S2B (ambos MSI)

Tabla 9. Especificación detallada de los sensores a bordo de los satélites L8 y S2A.

Parameter	Landsat 8 OLI		Sentinel 2 MSI	
	Band	Wavelength μm	Band	Wavelength μm
Spectral Bands	1 (coastal / aerosol)	0.43-0.45	B1 (blue)	0.43-0.45
	2 (blue)	0.45-0.52	B2 (blue)	0.46-0.52
	3 (green)	0.52-0.60	B3 (green)	0.54-0.58
	4 (red)	0.63-0.68	B4 (red)	0.65-0.68
	-	B5 (red edge)	0.70-0.71	
	-	B6 (red edge)	0.73-0.75	
	-	B7 (red edge)	0.77-0.79	
	-	B8 (NIR)	0.78-0.90	
	5 (NIR)	0.84-0.88	B8a (NIR)	0.86-0.88
	-	B9 (water vapor)	0.93-0.95	
	9 (cirrus)	1.36-1.39	B10 (cirrus)	1.37-1.39
	6 (SWIR1)	1.56-1.66	B11 (SWIR1)	1.57-1.66
	7 (SWIR2)	2.10-2.30	B12(SWIR2)	2.10-2.28
	8 (pan)	0.50-0.68	-	-
Landsat 8 TIRS		-	-	-
10 (TIR1)	10.3-11.3	-	-	-
11 (TIR2)	11.5-12.5	-	-	-
GSD at nadir (Spatial Resolution)	30 m VNIR 15m pan 100 m TIR		10 m (B2, B3, B4, B8) 20 m (B5, B6, B7, B8a, B11, B12) 60 m (B1, B9, B10)	
Quantization	12 bit		12 bit	
Onboard Calibration	Yes		Yes	
Off-axis viewing	Up to 7.5 deg off nadir		Up to 10.3 deg off nadir (w/o pointing)	
Orbit altitude	705 km		786 km	
Swath width	185 km		290 km	
Revisit time	every 16 days (7 - 9 days in overlapping areas)		1 satellite: every 10 days (3 - 7 days in overlapping areas) 2 satellites: every 5 days (2 - 3 days in overlapping areas)	
Launch	February, 2013		June, 2015	

2.7. PROCESADO DE NDVI

Los índices de vegetación se pueden definir como combinaciones de bandas espectrales, cuyo objetivo es el de realzar la contribución de la vegetación fotosintéticamente activa en la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros factores como el suelo en el que se asienta, las condiciones de iluminación solar, restos de vegetación seca y la atmósfera. El índice de vegetación por diferencias normalizado, NDVI, definido por la Eq. 5 (Rouse et al., 1973) es, con mucho, el índice de vegetación más usado en las aplicaciones de la Teledetección

Resaltar que el NDVI es el índice de vegetación sobre el que más experiencia se ha acumulado en la descripción de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal, lo que constituye un argumento adicional en su favor como índice adoptado. Por otro lado, sus valores oscilan entre -1 y +1, lo que ayuda en su interpretación. El NDVI presenta las ventajas de una gran sencillez de cálculo, facilita la interpretación directa de los parámetros biofísicos del cultivo, dada la gran cantidad de experiencia acumulada en su uso, y permite, por tanto, la comparación entre datos obtenidos. Así pues, combinando la reflectividad en las bandas del rojo e infrarrojo cercano, se calcula un mapa de NDVI combinando algebraicamente las bandas según la ecuación Eq. 5. Operando de esta forma, para cada fecha de la que dispongamos de imagen podemos disponer de mapa de NDVI, con lo que finalmente podríamos disponer de una secuencia temporal de mapas de NDVI.

Eq. 5

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NIR es la reflectividad en el infrarrojo cercano (banda 5 en L8, y banda 8 en S2), y R es la reflectividad en el rojo (banda 4 en L8 y S2), en el ancho de banda correspondiente. En consecuencia con las resoluciones espaciales de las bandas empleadas se obtienen imágenes NDVI a 10m de resolución espacial si se emplea S2, e imágenes NDVI a 30m de resolución espacial si se emplea L8.

2.8. PROCESADO DE RGB

Las combinaciones color, generalmente llamadas RGB, es un importante instrumento que permite el análisis visual de la dinámica de las superficies estudiadas. Por tanto se presta especial atención a la generación de combinaciones fácilmente interpretables y comparables en el tiempo. La combinación propuesta es la adecuada para la monitorización de la vegetación y de las prácticas agrícolas.

En Landsat 8, se utiliza la banda espectral del infrarrojo medio (B6) en el canal del rojo, la banda espectral del infrarrojo cercano (B5) en el canal del verde y la banda espectral del

rojo (B4) en el canal del azul. Por otro lado, en Sentinel – 2 (S2A + S2B), se utiliza la banda espectral del SWIR (B11) en el canal del rojo, la banda del infrarrojo cercano (B8) en el canal del verde y por último la banda espectral del rojo (B4) en el canal del azul. Las imágenes de color RGB de Landsat 8 están obtenidas a 15 m de resolución espacial tras un proceso de fusión, mientras que las de Sentinel – 2 lo están a 10m.

Estas combinaciones resultan ser fácilmente interpretables puesto que permite distinguir la vegetación fotosintéticamente activa (colores verdes brillantes), el suelo desnudo (colores ocres) y la vegetación natural (verde oscuro). Las combinaciones RGB obtenidas se procesan para obtener una visualización adecuada sin necesidad de aplicar ninguna modificación posterior del histograma.

2.9. PROCESADO DE LA MÁSCARA DE NUBES/SOMBRA PARA LANDSAT

La detección de nubes, y de las sombras asociadas, es uno de los retos para el aprovechamiento efectivo de las imágenes de satélite en la observación de la superficie terrestre. Procesos como la clasificación de usos de suelo o la obtención de variables biofísicas y, en general, las aplicaciones en las que se utilicen series multitemporales de imágenes, requieren de la previa detección y eliminación de las nubes y sus sombras. Por ello, se ha generado un procesado que las detecte y elimine de las imágenes NDVI. En consecuencia, la monitorización de las superficies de regadío y la estimación de sus necesidades hídricas presentará un menor número de píxeles con información inválida. La cadena de procesado creada para eliminar las nubes y sombras de la imagen se muestra en la Figura 7, mientras que en la siguiente tabla se muestran las entradas y las salidas del modelo.

Tabla 10. Entradas y salidas del modelo máscara de nubes.

Inputs	Outputs
Banda Quality Assessment (BQA)	Tabla (*.tbl)
Imagen RGB 654 (30x30m)	Máscara de nubes/sombras (mns)
Imagen NDVI BoA 0-200 (30x30m)	NDVI BoA 0-200 mns (30x30m)

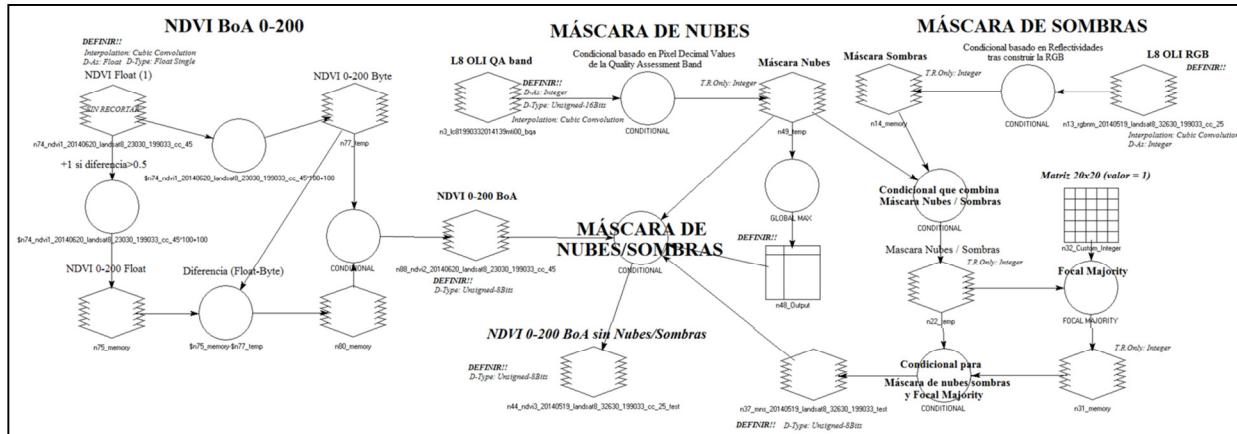


Figura 7. Cadena de procesado Máscara de Nubes/Sombras

En resumen, la metodología consiste en emplear la banda de calidad que Landsat 8 trae para cada imagen capturada y extraer los píxeles contaminados por nubes. Seguidamente, con la imagen combinación color se detectan las sombras producidas por las nubes. Una vez identificados los píxeles con presencia de nubes o sombras se unen para crear una máscara. Esta máscara final, se aplica a la imagen NDVI para eliminar aquellos píxeles contenidos en ella. Es necesario aclarar que el modelo sólo es aplicable en las imágenes capturadas por el satélite Landsat 8 ya que cada imagen contiene una banda de calidad. El procesado de nubes/sombras presenta varias etapas:

- máscara de nubes;
- máscara de sombras;
- combinación máscara de nubes/sombras (mns); y
- aplicación de la mns al NDVI.

2.9.1. Máscara de nubes

Para obtener la máscara de nubes se utiliza la banda de calidad que incorpora las imágenes de Landsat 8, llamada QA Band (Quality Assessment). A esta banda se aplica un condicional, de manera que los píxeles (pixel Decimal Values) que incorpora con una alta probabilidad de nubes y cirros son clasificados como nubes. Finalmente, la imagen QA Band es reclasificada. En consecuencia, se asigna a los píxeles de nubes el valor 2, mientras que el valor 1 se asigna zonas sin nubes, y el valor 0 se asigna a la zona exterior sin valores.

Resaltar que los resultados en la determinación están fuertemente influenciados por la tipología de nubes siendo más precisos en su extensión y delimitación cuando las nubes presentan una estructura más definida. Destacar que la máscara de nubes y sombras no se aplicará a las imágenes que no contengan nubes. La forma en la que el procesado detecta o no la presencia de nubes es mediante la creación de una tabla con el proceso *Global Max* en ERDAS. Este proceso busca el mayor valor presente en la máscara de nubes y lo escribe en

dicha tabla. En consecuencia, esta tabla sólo puede contener dos valores posibles: 1, cuando la imagen no contiene nubes; o 2, cuando la imagen contiene nubes.

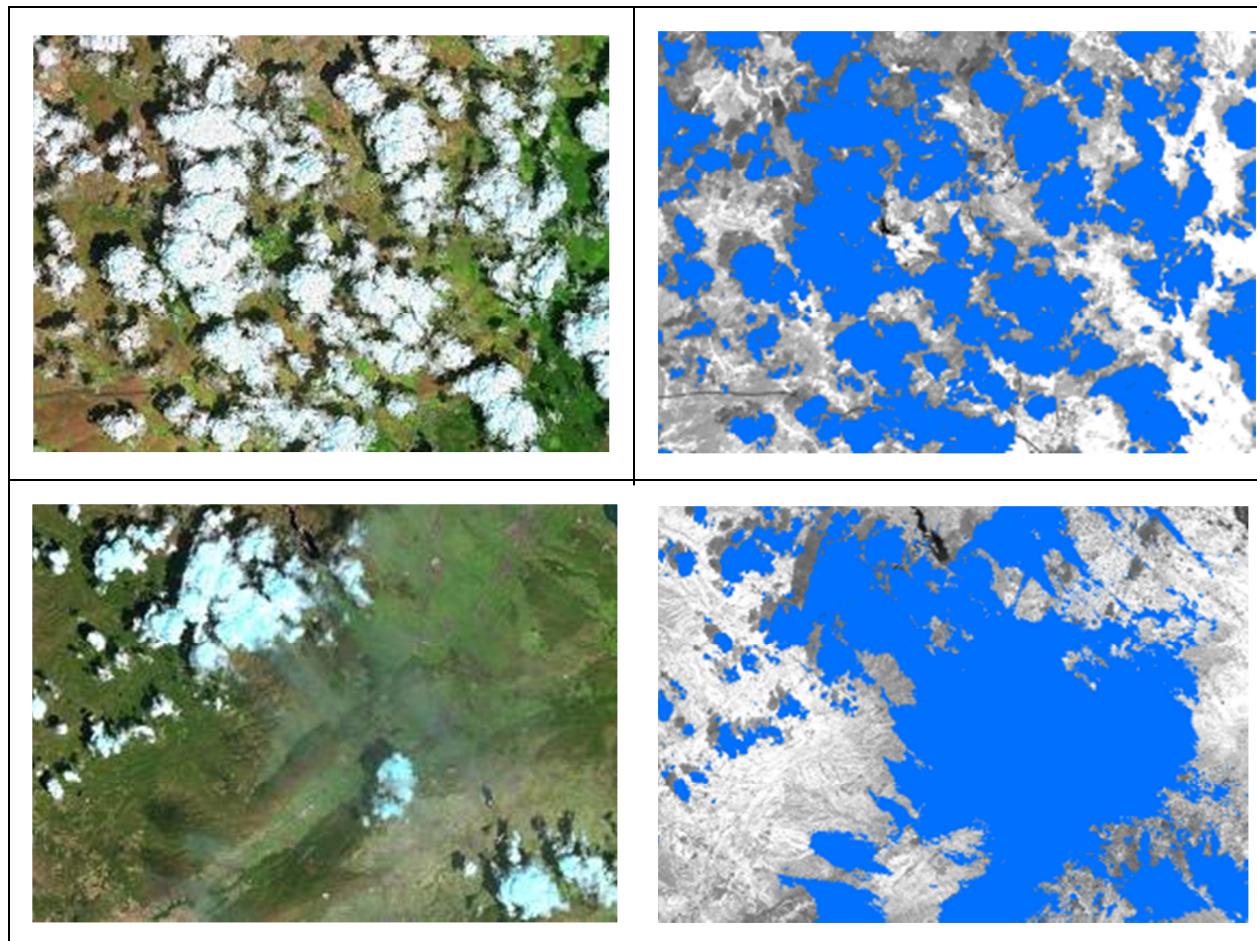


Figura 8. Máscara de nubes generada

Tabla 11. Máscara de nubes.

Valor reclasificado	Decimal Pixel Value (BQA L8 OLI)
2	61440, 59242, 57344, 56320, 53248, 52256, 52224, 49184, 49152, 48128, 45056, 43040, 39936, 36896, 36864, 32768, 31744, 28672, 26656 y 24576
1	El resto de <i>pixel decimal values</i> salvo valor 1
0	1 (zona exterior de la imagen sin valores)

2.9.2. Máscara de sombras

Las sombras son detectadas por el ojo humano con facilidad por predominar los colores oscuros en esas superficies. Por consiguiente, para obtener la máscara de sombras se aplica un condicional a las 3 bandas de reflectividades empleadas en la construcción de la imagen RGB. La respuesta espectral de las sombras está ligada a una menor radiación incidente sobre dichas superficies en sombra. Por ello, las reflectividades máximas en las que está basada la regla de identificación de sombras en cada banda son las siguientes:

$$\rho_{SWIR} \leq 0.1; \rho_{NIR} \leq 0.15; y \rho_R \leq 0.08$$

CONDITIONAL $\{(rgbmn(1) \leq 40) \& (rgbmn(2) \leq 60) \& (rgbmn(3) \leq 40)\}0, (rgbmn(1))1\}$

En la imagen RGB los anteriores valores equivalen a 40, 60 y 40 respectivamente ya que las bandas 6,5 y 4 de la RGB están multiplicadas por 400, 400 y 500 respectivamente. En la siguiente imagen se observa la construcción de la máscara de sombras en el módulo Model Maker del programa ERDAS. Así, obtenemos una nueva imagen compuesta de 0 y 1 según haya detectado sombras o no. Los resultados en la determinación están de nuevo fuertemente influenciados por la tipología de las nubes y la fecha del año obteniendo los mejores resultados cuando las nubes están bien definidas estructuralmente y son densas en su composición.

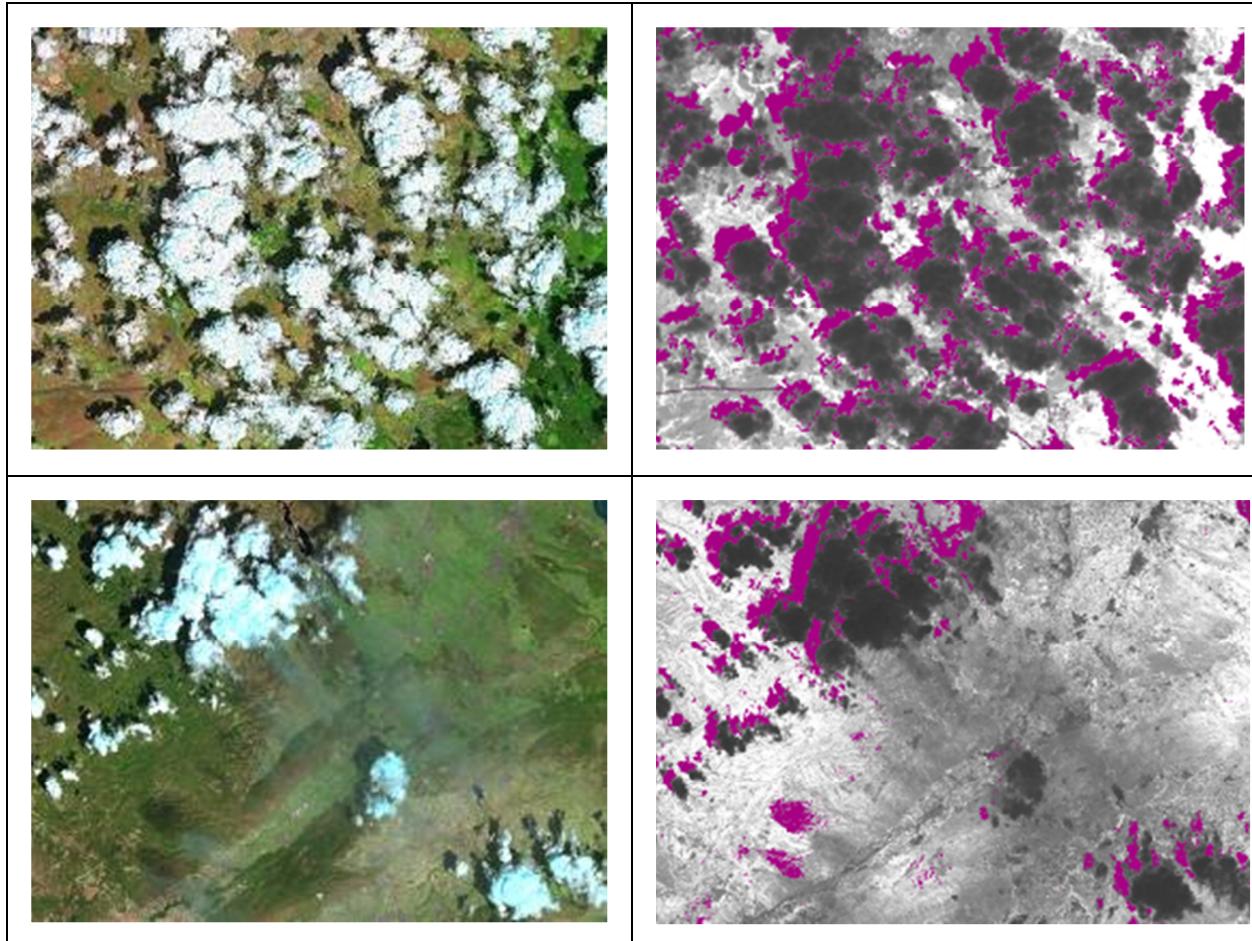


Figura 9. Máscara de sombras generada

2.9.3. Combinación de máscara de nubes y sombras (mns)

Se trata de sumar ambos resultados de la máscara de nubes y de la máscara de sombras para obtener una única imagen a modo de máscara. Sin embargo, antes hay un paso intermedio por el cual se pretende llenar posibles huecos que hayan quedado sin identificar como nube o sombra, mediante la herramienta focal majority del programa ERDAS. De esta forma se construye una máscara de nubes y sombras.

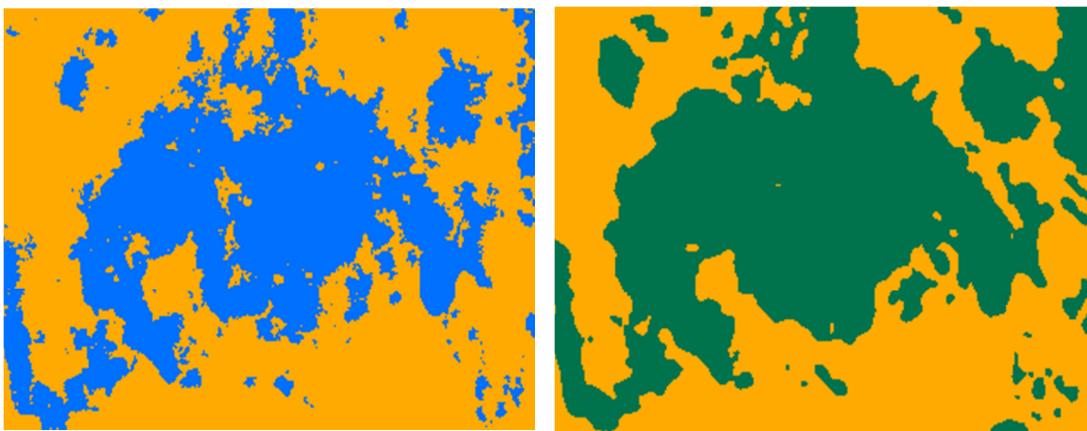


Figura 10. Máscara de nubes y sombras combinada

2.9.4. Aplicación de la máscara de nubes y sombras a la imagen NDVI

Se trata de combinar la máscara de nubes y sombras con la imagen NDVI corregida atmosféricamente (BoA). En consecuencia, si el proceso ha detectado que la imagen contiene nubes, la máscara se aplica a la imagen NDVI. El resultado final es una imagen NDVI BoA con valores de 0-200 donde se han eliminado las nubes y el exterior de la imagen (píxeles con valor 0) para poder ser empleada en HidroMORE.

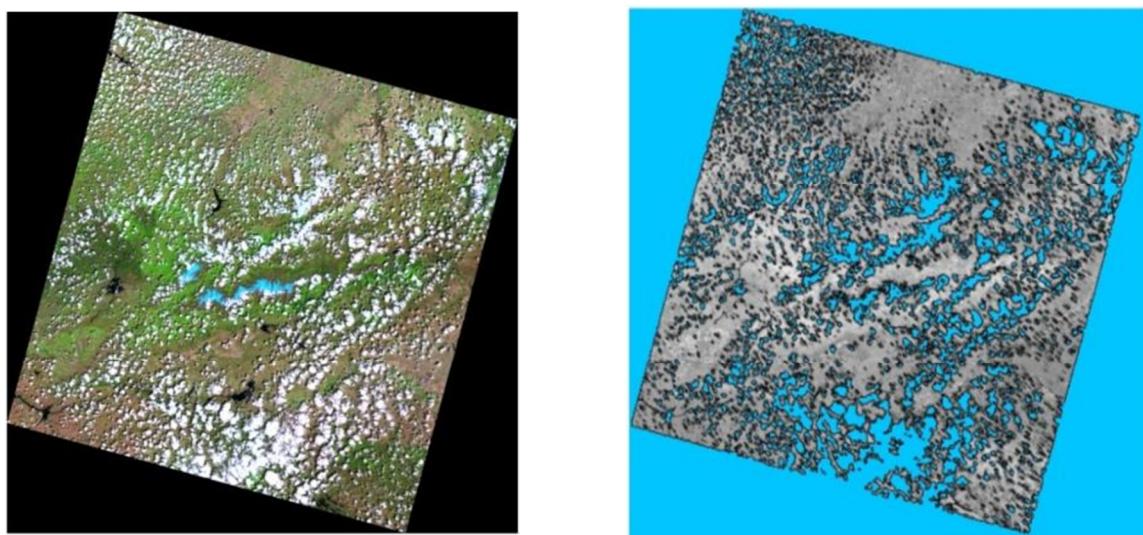


Figura 11. Aspecto final de la máscara de nubes y sombras combinada en toda una imagen

2.10. PROCESADO DE LA MÁSCARA DE NUBES/SOMBRA EN S2

Tras un análisis de diferentes procedimientos para la detección de nubes y sombras como son Fmask, Sen2Cor y el propio producto inicial de Sentinel – 2A, la metodología escogida para eliminar las nubes y sombras de las imágenes capturadas por el satélite Sentinel – 2 consiste en aplicar la máscara que produce el algoritmo Sen2Cor de corrección atmosférica (<http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>). Dicha máscara clasifica los píxeles de la imagen en diferentes categorías y con diferentes probabilidades de nubes, nieve, sombras, cirros, píxeles erróneos... Es lo que se conoce como clasificación de la escena (scene classification). Así pues, una vez obtenidos aquellos píxeles con presencia de nubes y sombras se aplica la máscara al NDVI normalizado para obtener el producto final. El procesado de nubes/sombras presenta varias etapas:

- Modulo Sen2Cor: clasificación de la escena;
- Selección de categorías y construcción de la máscara de nubes y sombras (msn);
- Aplicación de la mns al NDVI.

Este proceso se ha implementado en la cadena de procesado de las imágenes

2.10.1. Clasificación de la escena: módulo Sen2Cor

El módulo Sen2Cor, previo a la corrección atmosférica, realiza una clasificación de la escena en base a unas categorías objetivo (ver Figura 12). El algoritmo se basa en una serie de valores umbrales tomando de partida las reflectividades en el techo de la atmósfera de diferentes bandas espectrales. Además, se aplica índices de vegetación (NDVI) y de cobertura nival (NDSI), que junto a los anteriores rangos umbrales asignan probabilidades a cada píxel para establecer las categorías finales y ejecutar la clasificación de la escena.

Label	Classification
0	NO_DATA
1	SATURATED_OR_DEFECTIVE
2	DARK_AREA_PIXELS
3	CLOUD_SHADOWS
4	VEGETATION
5	BARE_SOILS
6	WATER
7	CLOUD_LOW_PROBABILITY
8	CLOUD_MEDIUM_PROBABILITY
9	CLOUD_HIGH_PROBABILITY
10	THIN_CIRRUS
11	SNOW

Figura 12. Categorías de píxel generadas tras la clasificación de escena (imagen tomada del manual Sen2Cor).

2.10.2. Selección de categorías y construcción de la máscara de nubes y sombras (msn)

Tras la categorización de la escena en base a la lista anterior, en el proyecto ESPACIO SiAR se ha decidido usar para formar la máscara de nubes y sombras las siguientes categorías:

- 0: píxeles sin datos
- 1: píxeles saturados o defectuosos
- 3: píxeles con presencia de sombras de nubes
- 8: píxeles con media probabilidad de presencia de nubes
- 9: píxeles con alta probabilidad de presencia de nubes
- 10: píxeles con presencia de nubes tipo cirros

Una vez seleccionados los píxeles anteriores de la escena de clasificación, se lleva a cabo una operación de buffer exterior de 100m sobre la categoría 3, píxeles con presencia de nubes. El objetivo es generar un margen de seguridad mayor para eliminar zonas con presencia de sombras. Por último, se generará una máscara de nubes y sombras con valores de 1 para aquellos píxeles libres de nubes y sombras, y con valores de 0 para aquellos píxeles seleccionados tras la construcción de la categorización de escena.

2.10.3. Aplicación de la máscara al NDVI: Construcción del NDVI libre de nubes y sombras

En esta última operación se trata de combinar la máscara de nubes y sombras previamente generada con la imagen NDVI corregida atmosféricamente (BoA). En consecuencia, si el proceso ha detectado que la imagen contiene nubes, la máscara se aplica a la imagen NDVI. El resultado final es una imagen NDVI BoA con valores de 0-200 donde se han eliminado las nubes y el exterior de la imagen (píxeles con valor 0) para poder ser empleada en HidroMORE.

2.11. PROCESADO DE IMÁGENES COEFICIENTE BASAL DE CULTIVO (Kcb)

La generación de imágenes denominadas coeficiente basal de cultivo es otro de los productos básicos que se obtienen mediante el procesado de las imágenes de satélite. Para su generación se emplean relaciones lineales con los índices de vegetación obtenidos desde imágenes de satélite, ya demostradas y validadas en numerosos cultivos desde que en 1989 se publicase el primer estudio que relacionaba el Kcb con el NDVI (NDVI-Kcb). Resaltar que las imágenes Kcb obtenidas se basan en las imágenes NDVI tras aplicar la máscara de nubes y sombras. Su construcción está basada en la Eq. 6 (Campos et al., 2010d).

Eq. 6

$$Kcb = 1,44 \cdot NDVI - 0,1$$

2.12. DESARROLLO DE SOFTWARE: INTEGRACIÓN DE LOS ANTERIORES PROCESOS MANUALES EN UN SOFTWARE PARA PROCESADO AUTOMÁTICO

La generación de productos a partir de las imágenes de satélite se basa en procesos altamente repetitivos. La realización de estos procesos por un especialista requiere, además de una especialización del técnico que los realiza, de un tiempo de gestión y ejecución relativamente grande en comparación con el tiempo real de ejecución de estos procesos, que van desde unos segundos a varios minutos. Todo ello hace que sea más que interesante la automatización de dichos procesos, con la finalidad principal de ahorrar costes por imagen procesada derivados de los recursos humanos necesarios para la realización de estos procesos de forma manual. Dado que el tratamiento de las imágenes Landsat8 necesita una mínima intervención humana, principalmente para normalizar las imágenes y realizar un control de calidad de los procesos, la automatización de estos procesos se basa en dos fases, anterior y posterior a esta intervención, denominada interfase, y claramente diferenciadas:

En la primera fase (Figura 13 arriba), el tratamiento no necesita de una intervención humana. Se parte de una carpeta con los ficheros “.tar.gz” tal cual se descargan de la web en formato comprimido, y se extraen los archivos originales de cada imagen, a partir de los cuales se generan varios productos:

- Composición Color RGB (654) a 30 m, previo cálculo y reescalado de los valores de las reflectividades de dichas bandas, con el fin de realizar el producto visualmente.
- Composición Color RGB (654) a 15 m, tras fusión con la banda pancromática, y previo cálculo y reescalado de los valores de las reflectividades de dichas bandas, con el fin de realizar el producto visualmente.
- Composición Color RGB (654) a 15 m, y posteriormente erosionada en un marco 2 píxeles de grosor, aplicando la Máscara No-Data o AOI.
- Máscara No-Data o AOI (Área of Interest).
- Máscara de Nubes y Sombras, a partir de la banda de calidad “bqa”.
- NDVI previo a la normalización, tras el cálculo de reflectividades de las bandas 5 y 4.

En la segunda fase (Figura 13 abajo), el tratamiento necesita un fichero de configuración de la normalización que previamente se ha tenido que generar, bajo la supervisión de un técnico. Los productos generados en esta **segunda fase** son:

- NDVI normalizado.
- NDVI erosionado en un marco de 2 píxeles aplicando la Máscara No-Data o AOI.
- NDVI reescalado entre 0 y 200
- NDVI tras la aplicación de la máscara de nubes y sombras, al NDVI reescalado entre 0 y 200.
- NDVI tras la aplicación de la máscara de nubes y sombras, al NDVI reescalado entre 0 y 200, y erosionado en un marco de 2 píxeles de grosor aplicando la Máscara No-Data o AOI.

Para la ejecución de cada una de estas fases se han creado dos programas de automatización respectivamente y que dependen de un fichero de configuración (“config.txt”): Fase 1: “procesar.py” y Fase 2: “normalizar.py” Para facilitar aún más la labor del técnico, minimizando su intervención, reduciendo así la posibilidad de errores “humanos” no sistemáticos, se ha creado un tercer programa (“definir.py”) para la generación de los ficheros de normalización necesarios en la segunda fase.

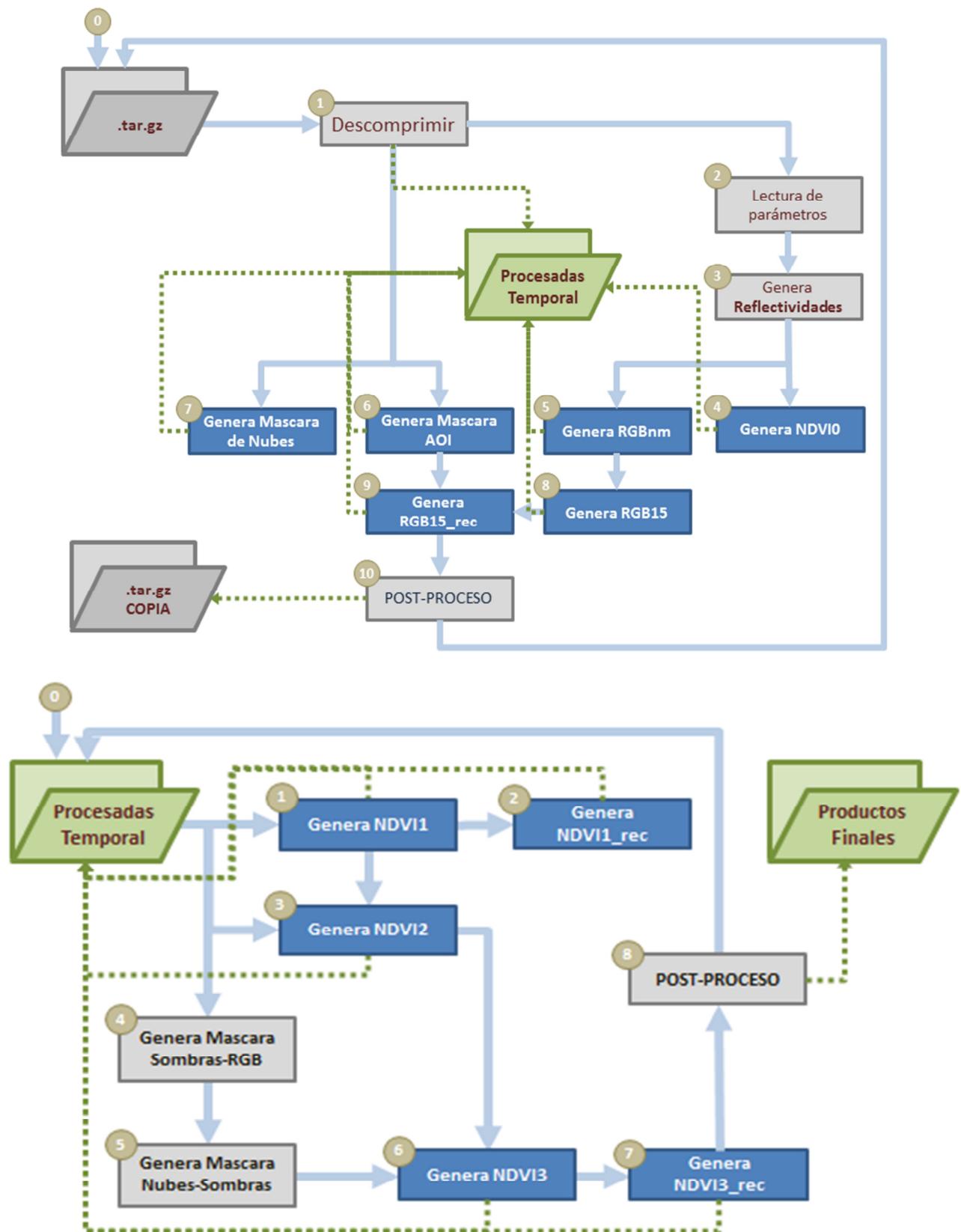


Figura 13. Diagrama de flujo del procesado durante la fase 1 (arriba) y 2 (abajo).

2.13. DETALLE DE LAS IMÁGENES PROCESADAS EN FECHAS Y PRODUCTOS

El número total de imágenes procesadas en la campaña 2018 es de 8.833. En campañas anteriores para el año 2016 entre Landsat 8 y Sentinel – 2A se procesaron 3.528 imágenes, mientras que en 2017 y para los mismos satélites más Sentinel – 2B el número total alcanzó las 8.417 imágenes. En cuanto al satélite Landsat 8 se han procesado un total de 48 escenas diferentes, mientras que en relación al satélite Sentinel – 2 (S2A + S2B) se han trabajado un total de 106 gránulos diferentes. En detalle, para el año 2016 se han procesado 620 imágenes Landsat 8, mientras que 2.908 fueron procesadas del satélite Sentinel – 2A. A su vez, en 2017 se procesaron 756 imágenes Landsat 8, 5.049 fueron procesadas del satélite Sentinel – 2A y 2.612 del satélite Sentinel – 2B. En el año 2018 se han procesado 1.095 imágenes Landsat 8 y 7.738 imágenes Sentinel 2. En la siguiente tabla se muestran en detalle las imágenes procesadas para el año 2018. Destacar, que el número total de productos procesados es superior al número total de imágenes procesadas, ya que tal y como se ha explicado, 3 son los productos básicos generados: imágenes NDVI, imágenes RGB e imágenes Kcb.

Tabla 12. Resumen de las imágenes procesadas.

	RGB (L8)	NDVI (L8)	Kcb (L8)	RGB (S2)	NDVI (S2)	Kcb (S2)
2018	1.095	1.095	1.095	7.738	7.738	7.738

3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS EN EL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN REGADÍO MEDIANTE RECURSOS DE TELEDETECCIÓN Y APOYO CARTOGRÁFICO

A continuación, se especifican las características técnicas empleadas en el proceso de clasificación de usos del suelo mediante teledetección y apoyo cartográfico. El objetivo principal es obtener la clasificación de usos de suelo en regadío, para poder realizar un seguimiento de los cultivos en regadío.

3.1. ESQUEMA GENERAL DEL PROCEDIMIENTO DE CLASIFICACIÓN

El procedimiento se basa en la combinación de la clasificación basada en secuencias multitemporales de imágenes de satélite, junto con el análisis e integración de múltiples fuentes cartográficas mediante herramientas SIG (Figura 14). Esto nos llevará a obtener un mapa anual de cultivos regados agrupados en clases para cada uno de los años del estudio.

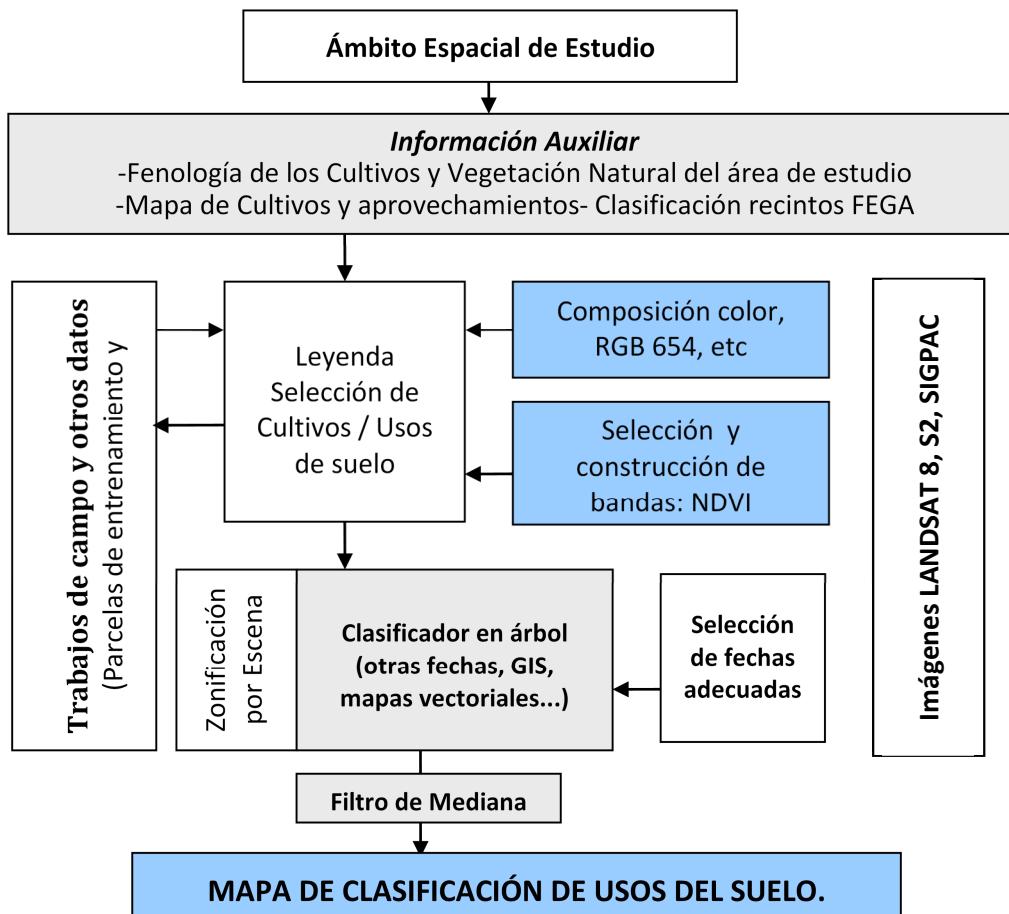


Figura 14. Diagrama de flujo del proceso de clasificación.

3.2. MATERIAL EMPLEADO EN LA CLASIFICACIÓN

Imágenes utilizadas:

- Secuencias temporales de imágenes NDVI Landsat 8 y Sentinel – 2 (S2A + S2B) correspondientes a cada una de las escenas y/o gránulos que abarcan la zona de estudio. El número de imágenes potencialmente “utilizables” que componen cada secuencia depende de la nubosidad. Resaltar que en las zonas de solape entre imágenes dispondremos de mayor número de imágenes por año.

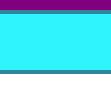
Fuentes cartográficas:

- Cartografía, tanto gráfica como de la base datos alfanumérica de los recintos SIGPAC, proporcionada por el FEGA
- Zonas regables proporcionadas por la Subdirección General de Regadíos e Infraestructuras Rurales del MAPA

3.3. MATERIAL EMPLEADO EN LA OBTENCIÓN DE LAS DIFERENTES CLASES

Se detalla en la siguiente tabla, los usos del suelo discriminados mediante la clasificación desarrollada.

Tabla 13. Usos del suelo clasificados así como su leyenda y descripción.

Grupo	Uso del Suelo	Leyenda	Descripción
Cultivos herbáceos en regadío	Regadíos de Primavera		Desarrollo fenológico centrado en la primavera
	Regadíos de Verano		Desarrollo fenológico centrado en el verano
	Regadíos de Primavera - Verano		Desarrollo fenológico en primavera y verano
	Regadíos de Otoño - Invierno		Desarrollo fenológico en otoño e invierno
Cultivos leñosos en regadío	Viñedo		Diferentes especies vitivinícolas.
	Olivar (OR)		Diferentes especies oleícolas.
	Cítricos (FC)		Diferentes especies de árboles cítricos.
	Frutales (FR)		Diferentes especies de árboles frutales.
Invernadero	Invernaderos (INV)		Agricultura bajo invernaderos.

Atendiendo a la discriminación de clases presentada en la siguiente tabla, se muestra a continuación la metodología empleada para la obtención de las diferentes clases del mapa de usos del suelo.

Tabla 14. Metodología empleada para la obtención de las diferentes clases.

USOS DEL SUELO	METODOLOGÍA
Regadío de primavera	– Clasificación supervisada por árboles de decisión basada en series multitemporales de NDVI
Regadío de verano	– Empleo de cartografía disponible: Regadíos2013, SigPAC y UDA
Regadío de primavera/verano	– Empleo de cartografía disponible: Regadíos2013, SigPAC y UDA
Regadío de otoño/ invierno	– Clasificación supervisada por árboles de decisión basada en series multitemporales de NDVI , atributos de los recintos contenidos en la cartografía disponible y fotointerpretación
Viñedo en regadío	– Empleo de cartografía disponible: Regadíos2013 , SigPAC y UDA
Olivar en regadío	– Clasificación supervisada por árboles de decisión basada en series multitemporales de NDVI , atributos de los recintos contenidos en la cartografía disponible y fotointerpretación
Cítricos en regadío	– Empleo de cartografía disponible: Regadíos2013 , SigPAC y UDA
Frutales en regadío	– Empleo de cartografía disponible: Regadíos2013 , SigPAC y UDA
Invernadero	– Empleo de cartografía disponible: Regadíos2013 , SigPAC y UDA

3.4. PROCEDIMIENTO DE CLASIFICACIÓN SUPERVISADA POR ÁRBOLES DE DECISIÓN

El conocimiento de la evolución temporal de las diferentes cubiertas vegetales ha sido el instrumento esencial en la identificación de los cultivos de regadío. Las diferentes fases de desarrollo se expresan habitualmente a través de las curvas de los coeficientes de cultivo (Kc), que a su vez están estrechamente relacionados con la fracción de cobertura vegetal verde, y cuyos valores máximos coinciden con los momentos en que el cultivo cubre en mayor medida el suelo.

La magnitud que se deriva de las imágenes multiespectrales de satélite y que está directamente relacionada con la fracción de cobertura vegetal verde (fc) es el denominado Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado (NDVI). Así, al utilizar una secuencia temporal de imágenes multiespectrales, la evolución temporal del NDVI derivado de ellas permite describir la evolución temporal de la cubierta vegetal. Por lo tanto, se puede hacer el seguimiento mediante el NDVI libre de nubes y sombras de las diferentes fases de desarrollo en el crecimiento del cultivo. Resaltar que, aquellos cultivos que presenten una similar evolución fenológica y de cobertura del suelo presentarán una similar evolución su NDVI. En consecuencia, aplicando estos conceptos, la discriminación se hace entre grupos de cultivos que presentan una evolución temporal diferente. Esto presenta una importante ventaja: aquellos cultivos con semejante evolución temporal en desarrollo y cobertura vegetal, tienen semejantes necesidades hídricas.

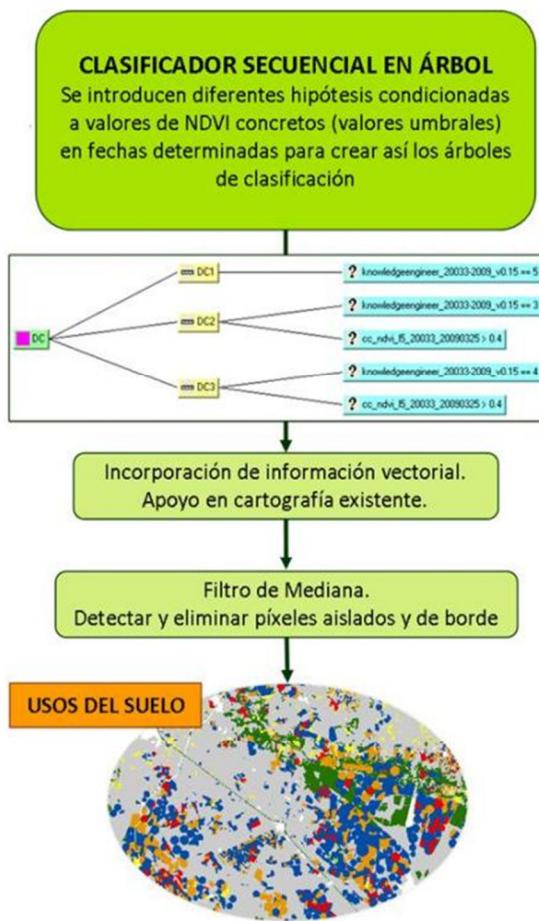


Figura 15. Esquema general del proceso de clasificación.

Para la realización de las clasificaciones utilizaremos los procesos de clasificación basados en clasificadores secuenciales en árbol (árboles de decisión). El primer paso requiere una recopilación de toda la información disponible de tipo vectorial (SigPAC, unidades de demanda agraria...), así como de la secuencia temporal de imágenes NDVI libres de nubes y sombras disponibles de nuestra zona de clasificación y para cada año de estudio. Recalcar, que aquellos píxeles con presencia de nubes y sombras no son introducidos en el árbol de decisión, así como que la disponibilidad de imágenes L8, S2A y S2B permiten monitorizar el desarrollo de cultivos (Garrido-Rubio et al., 2011) sin tener que recurrir a técnicas de sustitución de píxeles con presencia de nubes y sombras.

Seguidamente, el procedimiento consiste en separar los píxeles de la escena a clasificar según unas reglas de clasificación basadas en las secuencias temporales antes mostradas. En consecuencia, se busca discriminar por fechas y valores NDVI los diferentes usos en regadío. Además, la información alfanumérica contenida en la información vectorial es así mismo empleada para determinar las zonas regables. Por ello, mediante las decisiones que se van realizando sucesivamente, se construye un árbol de decisión, en el que la propia estructura piramidal establece una jerarquía en las decisiones (Figura 16). Por ello, es sencillo el análisis de este tipo de criterios, su comprobación con los datos de referencia.

El conocimiento de la zona, tanto de los datos de la imagen, como de la información auxiliar, se ha de trasladar al ordenador en forma de reglas. La forma más sencilla en que este proceso se hace es en forma de operadores lógicos condicionales, que constituyen las reglas, en las que la estructura es: SI (Condición) ENTONCES (Inferencia).

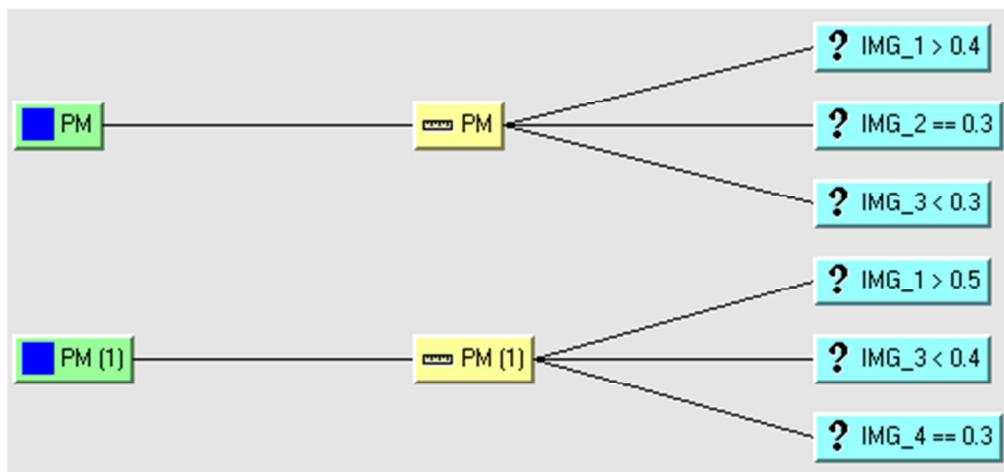
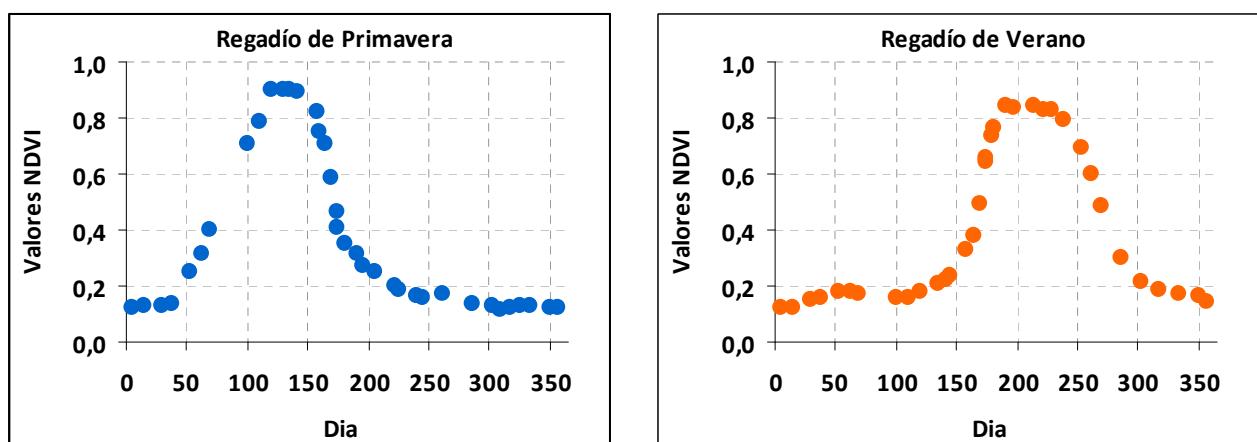


Figura 16. Ejemplo esquemático de la construcción de clasificación en árbol.

3.5. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE EVOLUCIÓN DE NDVI PARA DIFERENTES USOS DEL SUELO

Puesto que una parte importante del proceso de clasificación se realiza atendiendo a las curvas multitemporales de evolución de NDVI, se muestran las curvas típicas para cada uso de suelo clasificado, obtenidas en el proyecto ESPACIO SiAR (Figura 17) los gráficos que se muestran a continuación).



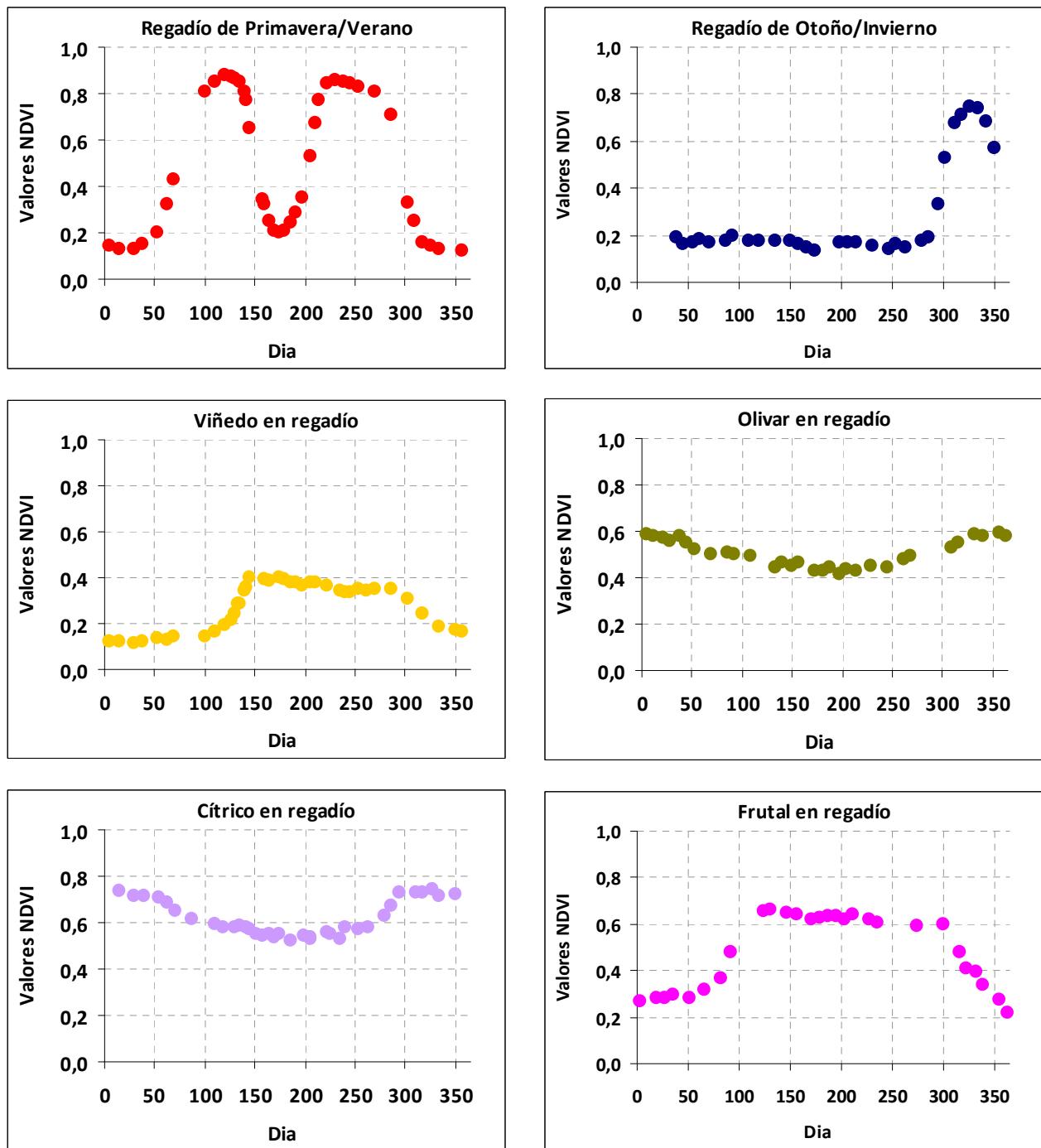


Figura 17. Curvas características de los diferentes usos de suelo en regadío clasificados.

3.6. INCORPORACIÓN DE LA INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA DISPONIBLE

A continuación, se detalla la metodología seguida en la extracción de los polígonos posteriormente incorporados a la clasificación. Se trata de información cartográfica, SigPAC, Unidades de Demanda Agraria y zonas regables. A partir de la información alfanumérica, se extraen los códigos que se muestran en la tabla, a continuación.

Tabla 15. Usos SIGPAC para la clasificación.

Usos de suelo clasificados	Código SIGPAC
Regadío de primavera	TA: Tierra Arable, TH: Huerta (regadío) y PA: Pasto
Regadío de verano	arbolado (regadío), PR: Pasto arbustivo (regadío) y PS: Pastizal (regadío)
Regadío de primavera-verano	
Regadío de otoño-invierno	
Viñedo	CV: Asociación cítricos-viñedo, FV Frutos secos y viñedo, VF: viñedo frutal, VI: viñedo, VO: Viñedo-Olivar COEF_REGAD > 0
Olivar	FL: Frutos secos y viñedo, OC: Asociación olivar-cítricos, OF: Olivar-frutal, OV: Olivar COEF_REGAD > 0
Cítricos	CF: Asociación cítricos-frutales, CI: Cítricos, CS: Asociación cítricos- frutales de cascara COEF_REGAD > 0
Frutal	FF: Asociación frutales- frutales de cascara, FS: Frutos secos, FY: Frutales COEF_REGAD > 0
Invernaderos y cultivos bajo plástico	IV: Invernaderos

Los polígonos extraídos de la cartografía vectorial SigPAC son los recintos correspondientes a todas las provincias de la España Peninsular, los cuales contienen los campos identificadores de: provincia, municipio, agregado, polígono, zona, parcela, recinto, coeficiente de regadío (“COEF_REGAD”) y uso2018 (“USO_SIGPAC”). Los recintos extraídos de la cartografía SigPAC, son polígonos que se encuentren en regadío.

Como capa base de la clasificación, se utilizan las capas resultantes del cruce entre la capa de recintos de leñosos de secano del SigPAC con la las capas de zonas regables, y con las capas de unidades de demanda agraria.

3.7. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DE USOS DE SUELO EN REGADÍO

Los resultados obtenidos tras el proceso de clasificación asistida por Teledetección y recursos cartográficos se entregan en dos formatos:

- Una imagen de la zona de estudio, año 2018
- Agregación de los resultados de superficie en riego por demarcación hidrográfica (ver Tabla 17)

Tabla 16. Código de los usos del suelo en regadío clasificados.

Usos de suelo en regadío	Código	Usos de suelo en regadío	Código
Regadío de primavera	RP	Viñedo en regadío	VR
Regadío de verano	RV	Olivar en regadío	OR
Regadío de primavera y verano	RPV	Frutales cítricos en regadío	FC
Regadío de otoño e invierno	ROI	Frutales en regadío	FR
Invernadero	INV		

Tabla 17. Superficie regada (ha) por usos y demarcaciones hidrográficas en 2018.

Demarcación hidrográfica	RP	RV	RPV	ROI	VR	OR	FC	FR	INV	TOTAL
Ebro	286.879	180.928	91.190	23.443	41.042	47.085	7.337	130.269	691	808.864
Guadalquivir	110.680	108.912	12.683	10.924	2.295	333.505	41.566	29.974	7.563	658.102
Duero	252.044	206.030	15.706	7.151	9.091	720	0	3.591	277	494.610
Guadiana	121.856	89.873	9.176	8.476	172.302	43.121	4.734	29.608	936	480.082
Júcar	52.594	40.596	10.552	16.407	39.140	10.961	149.077	37.520	1.239	358.086
Tajo	78.369	48.555	13.619	9.285	9.499	31.460	9	22.381	178	213.355
Segura	19.345	8.112	4.234	28.535	22.128	10.372	53.513	45.169	5.130	196.538
Mediterráneas Andaluzas	12.720	2.874	1.313	6.928	1.089	28.014	19.072	20.923	34.881	127.814
Internas de Cataluña	18.768	11.713	8.777	5.176	1.929	9.485	832	22.235	756	79.671
Guadalete y Barbate	19.182	19.114	4.213	3.250	304	5.061	772	882	867	53.645
Tinto, Odiel y Piedras	3.021	549	37	1.003	39	2.641	14.344	2.782	9.210	33.626
Islas Canarias	1.898	503	775	3.846	1.097	74	1.067	7.489	7.487	24.236
Islas Baleares	8.738	542	1.326	4.586	208	272	1.107	1.277	224	18.280
Cantábrico Oriental	210	456	178	11	63	7	0	3.600	236	4.761
Miño - Sil	962	1.075	509	67	134	3	0	1.409	50	4.209
Galicia Costa	500	782	281	53	208	4	0	36	130	1.994
Cantábrico Occidental	41	207	365	10	1	0	0	238	144	1.006
TOTAL	987.807	720.821	174.934	129.151	300.569	522.785	293.430	359.383	69.999	3.558.879

4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y METODOLÓGICAS EN EL PROCESO DE SIMULACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DIARIAS MEDIANTE HIDROMORE

A continuación, se especifican las características técnicas empleadas en el proceso de simulación de las necesidades hídricas mediante HidroMORE, así como la metodología implícita en la simulación, esto es, el modelo FAO-56 de coeficiente dual asistido por satélite.

4.1. ASPECTOS METODOLÓGICOS DEL MODELO EMPLEADO POR HIDROMORE.

4.1.1. *El modelo FAO-56 de coeficiente dual.*

El modelo FAO-56 de Coeficiente Dual trata sobre el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) tanto bajo condiciones estándar, es decir cuando no existen limitaciones al crecimiento del cultivo o la evapotranspiración (Allen et al., 1998), o bajo condiciones de estrés, ET actual, o simplemente ET. Este modelo estima la ET a través del producto de la evapotranspiración de referencia (ET₀) y el coeficiente de cultivo (K_c) (Allen et al., 1998b; Doorenbos and Pruitt, 1977), separando este último como la suma del coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), relacionado con la transpiración de la planta, y el coeficiente de evaporación (K_e), relacionado con la evaporación del suelo (Wright, 1982; Allen et al., 1998). Además, el K_c incorpora el coeficiente de estrés hídrico (K_s) para simular bajo condiciones diferentes a las óptimas. En resumen, la ecuación empleada es:

$$ET_c = K_c \cdot K_s \cdot ET_0 = (K_s K_{cb} + K_e) \cdot ET_0 \quad \text{Eq. 7}$$

4.1.2. *Asimilación del coeficiente de cultivo basado en reflectividad.*

La obtención del K_{cb} basado en la reflectividad espectral de la cubierta, es posible y ha sido ensayado y demostrado en numerosas ocasiones (Campos et al., 2010d; González-Piqueras, 2006). Por tanto, la obtención de coeficientes de cultivo, en nuestro caso K_{cb}, derivados de las imágenes de satélite, nos permite acceder al modelo FAO-56 de Coeficiente Dual y estimar por último las necesidades hídricas de los cultivos en suelo, sin tener que recurrir a los valores tabulados propuestos en la metodología clásica.

Tras el procesado de las imágenes y consecución de los productos de IV, fundamentales para estimar los K_{cb}, seremos capaces de representar las evoluciones temporales monitorizando así la relación entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia (ET_c/ET₀). De esta forma, se obtendrán mapas de coeficiente de cultivo basal de imágenes satelitales.

4.1.3. *Cultivos en condiciones no estándar. Balance de agua en la capa de suelo.*

Hemos visto, por tanto, que obtener la ET bajo condiciones estándar (sin limitaciones al crecimiento o la evapotranspiración), es posible a través de las técnicas de teledetección. En general, y en concreto en los cultivos herbáceos, es usual aplicar el agua necesaria para mantener el techo de transpiración. Sin embargo, para determinar el momento de aplicar el agua es necesario determinar el umbral en que el cultivo entra en estrés. En algunos cultivos como la viña, a diferencia de otros, es bien conocido el incremento de la calidad del fruto cuando la planta transpira en ciertas fases del ciclo de crecimiento a un ritmo menor del máximo que la cubierta vegetal puede transpirar, esto es, cuando se induce en la planta un cierto grado de estrés hídrico. La metodología utilizada mantiene el procedimiento utilizado en el manual FAO56 para cuantificar el papel del agua en el suelo.

En algunos casos y cultivos, cuando el contenido de agua en la capa de suelo cae por debajo de un cierto umbral, que puede variar de unos grupos de cultivo a otros, la energía potencial del agua en el suelo cae por debajo de cierto valor umbral, y la planta es incapaz de extraer el agua suficiente para mantener el ritmo de transpiración, por lo que se dice que el cultivo está en estrés hídrico. Los efectos del estrés hídrico son incorporados al multiplicar en el modelo de Coeficiente Dual, el K_{cb} por el coeficiente de estrés hídrico (K_s) (Allen et al., 1998), de la siguiente forma:

$$ET_{cag} = (K_s \cdot K_{cb} + K_e) \cdot ET_o \quad \text{Eq. 8}$$

La Figura 18 presenta la relación del coeficiente de estrés con el contenido de agua en suelo, y por tanto permite establecer el momento en que es necesario aplicar el riego en función del agotamiento de agua, bien para impedir que el cultivo entre en estrés, bien para mantener el estrés en los niveles deseados, actuación que se suele denominar riego deficitario controlado.

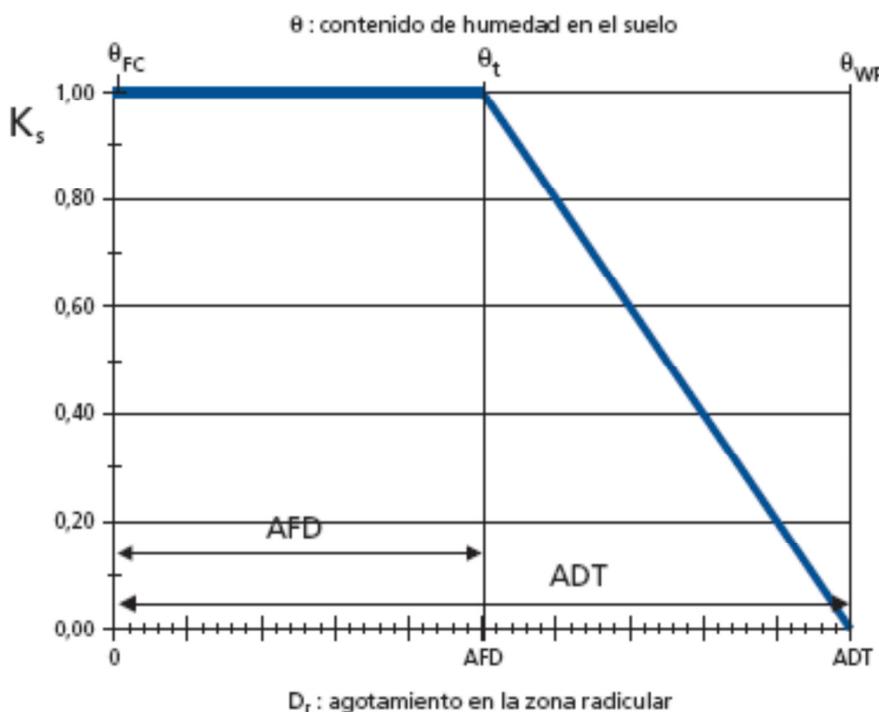


Figura 18. Coeficiente de estrés hídrico, K_s (Allen et al., 1998).

De forma numérica, el manual FAO 56 propone la siguiente ecuación 9 para determinar el coeficiente de estrés, K_s , lo que permite a HidroMORE incorporar los valores estándar de p establecidos para los diferentes grupos de cultivo.

$$K_s = \frac{ADT - D_r}{ADT - AFA} = \frac{ADT - D_r}{(1 - p) \cdot ADT} \quad \text{Eq. 9}$$

Donde:

K_s es un factor adimensional de reducción de la transpiración que depende de la cantidad de agua disponible en el suelo [0 - 1],

D_r , es el agotamiento de humedad en la zona radicular [mm],

ADT , es el agua disponible total en la zona radicular del suelo [mm],

AFA , es el agua fácilmente asimilable por las raíces de las plantas [mm],

p , es la fracción de la ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico [-]

4.1.4. Componentes del balance de agua en el suelo: las necesidades de agua de riego

Conocidos diferentes parámetros necesarios para estimar la ET, las necesidades hídricas de los mismos estarán ligadas además de a su evapotranspiración al contenido de humedad en el suelo en la zona radicular. Atendiendo a la siguiente es posible diferenciar los diferentes componentes que actúan en el balance de agua.

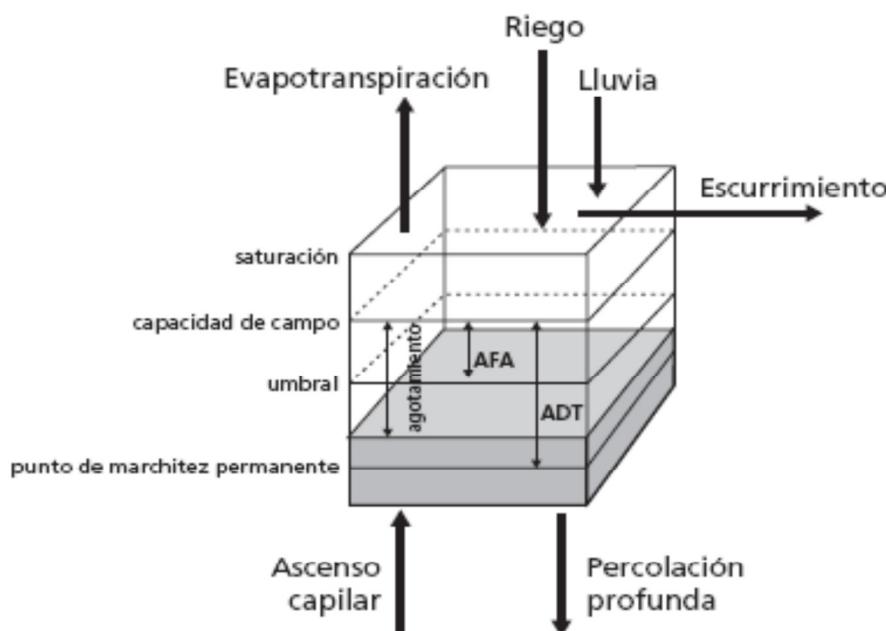


Figura 19. Balance de agua en la zona radicular (Allen et al., 1998)

Según la metodología FAO-56, algunos de estos componentes (procesos de evaporación, transpiración del cultivo y pérdidas por percolación) aumentan el agotamiento de agua, mientras que la precipitación, el ascenso capilar o riego, disminuyen el agotamiento de agua en el suelo. Este balance, ha de ser calculado diariamente mediante:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO_i) - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad \text{Eq. 10}$$

Donde:

$D_{r,i}$, es el agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo al final del día i [mm],

$D_{r,i-1}$, es el contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior, $i-1$ [mm],

P_i , es la precipitación en el día i [mm],

RO_i , es el escurrimiento superficial en el día i [mm],

I_i , es la lámina neta de riego en el día i que infiltra en el suelo [mm],

CR_i , es el ascenso capilar proveniente de la mesa de agua subterránea en el día i [mm],

$ET_{c,i}$, es la evapotranspiración del cultivo en el día i [mm],

DP_i , las pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda en el día i [mm],

Por todo ello, las necesidades de riego obtenidas al aplicar la ecuación 7 tienen como objetivo principal la aplicación del agua en suelo en el momento preciso y con la cantidad precisa. Mediante el cálculo del balance diario del agua presente en la zona radicular del suelo se pueden planificar las láminas y los momentos de aplicación del riego. Para evitar el estrés hídrico se debe aplicar el riego antes, o en el momento, de agotarse la lámina de agua

fácilmente extraíble del suelo ($Dr,i \leq AFA$). Por otra parte, para evitar pérdidas por percolación que puedan producir el lavado de importantes nutrientes de la zona radicular, la lámina neta de riego deberá ser menor o igual que el agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo ($l_i \leq Dr,i$).

4.2. MATERIAL DE ENTRADA

La integración de los anteriores pasos y productos en HidroMORE permite la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos, para su posterior empleo como apoyo en la gestión del agua de los regadíos.

HidroMORE® es un modelo operativo para la estimación de la recarga y la evapotranspiración que integra datos de satélite, agrometeorológicos, edáficos y de cultivo en el modelo de coeficiente dual FAO56 (Allen et al., 1998a) para la determinación de la evapotranspiración de los cultivos y sus necesidades hídricas (Torres, 2010). Así, HidroMORE® desarrolla a escala diaria y espacialmente distribuido el balance de agua asistido por teledetección. Por tanto, la extensión espacial de estudio se encuentra únicamente limitada por el tamaño de las imágenes de satélite empleadas, mientras que la escala espacial estará en función de la resolución espacial de éstas imágenes. HidroMORE® presenta dos logros principales: la asimilación de datos multiespectrales a través de las relaciones NDVI-Kcb y NDVI-fc; y la distribución espacial del modelo FAO56 (Torres, 2010). Es más, HidroMORE® ha sido aplicado de manera continua en campos diferentes, como su uso operativo para extender datos in-situ de sensores de humedad (Sánchez et al., 2010), como herramienta para modelizar la vegetación natural y los cultivos presentes en el Alto Guadiana (Calera et al., 2011; Calera et al., 2009a), para extender la metodología de los nuevos coeficientes de cultivo basal para viñas en regadío en el acuífero 08.29 (Mancha Oriental), así como extender la metodología de monitorización de cultivos de regadío y obtención de sus necesidades de riego en cuatro grandes cuencas españolas: Júcar, Guadiana, Segura y Tajo (Garrido-Rubio et al., 2012).

HidroMORE® se alimenta de varios tipos de entradas que cuantifican el desarrollo de las coberturas vegetales, las condiciones climáticas, las propiedades hídricas de los suelos y los usos agrícolas que se desarrollan sobre estos. A continuación, se muestran en la Tabla 18 y la Figura 20, con un resumen de los parámetros empleados y la representación esquemática del proceso de simulación atendiendo a las entradas y salidas o productos obtenidos.

El balance de agua en suelo incorpora la precipitación registrada, y permite determinar el coeficiente de estrés y el coeficiente de evaporación desde el suelo desnudo, el cual a su vez considera el sistema de riego utilizado y la frecuencia de aplicación. Este balance requiere del conocimiento de la cantidad máxima de agua que puede almacenar la capa de suelo donde se alojan las raíces, que a su vez depende de la profundidad de raíces y de la capacidad de retención de agua del suelo. Finalmente, se determina la necesidad de agua de riego a aplicar para mantener un coeficiente de estrés adecuado.

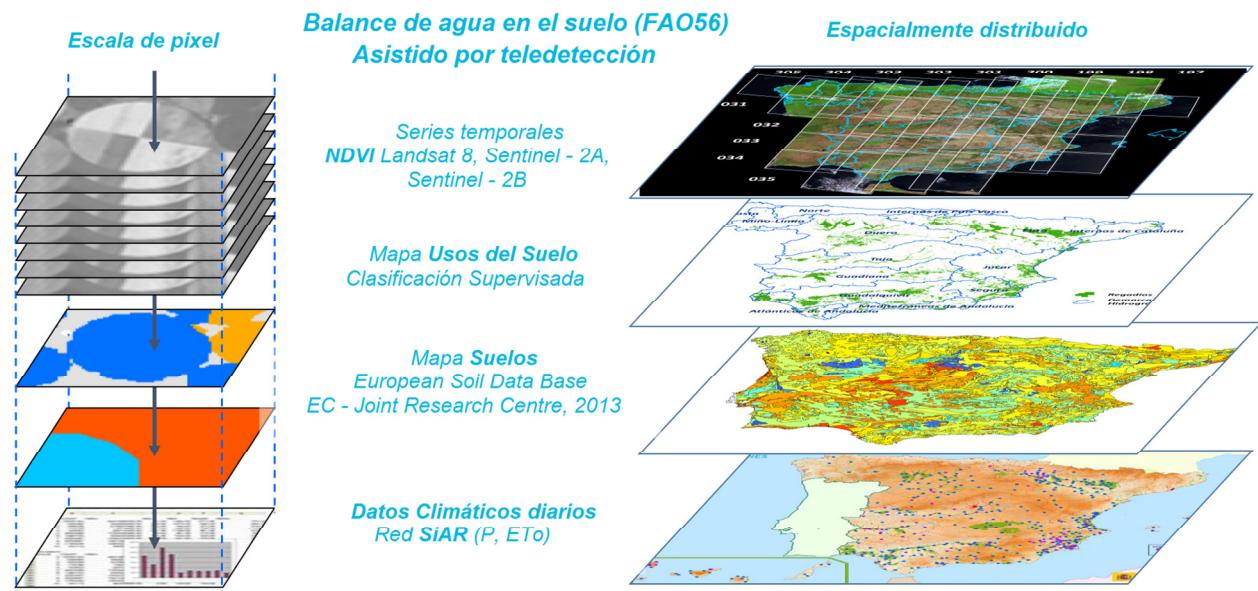
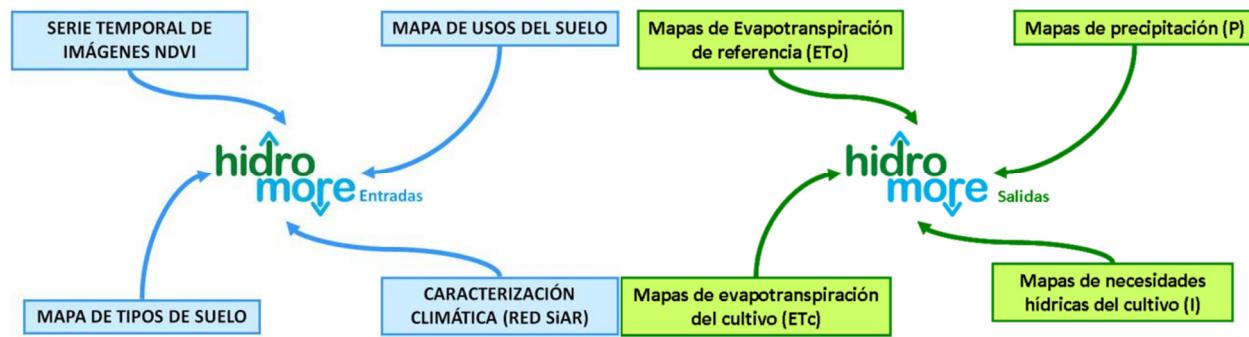


Figura 20. Representación esquemática de las entradas y salidas a HidroMORE®.

Tabla 18. Parámetros de configuración de HidroMORE® y sus fuentes de información.

PARAMETROS DE ENTRADA	FUENTE DE DATOS
Coeficiente basal de cultivo, Kcb (adimensional)	Secuencias temporales de imágenes NDVI procesadas desde la información proporcionada por el satélite Landsat 8, Sentinel – 2A y Sentinel – 2B
Fracción de suelo cubierta por la vegetación, fcv (adimensional)	Clasificación temporal supervisada basada en secuencias temporales de imágenes NDVI y cartografía de apoyo
Mapa anual de usos del suelo en regadío	Redes agroclimáticas de la Red nacional SIAR (MAPA, 2018), Rural Cat (2018) y la Rioja ¹ (Rioja, 2018)
Precipitación diaria, P (mm/día)	European Soil Database (ESDB) v2.0 (Panagos et al., 2012) y European Soil Derived Data (Hiederer, 2013)
Evapotranspiración de referencia diaria, ET ₀ (mm/día)	
Capacidad de campo, Θ _{cc} (m ³ /m ³)	
Punto de marchitez, Θ _{cc} (m ³ /m ³)	
Profundidad del suelo, Z _{max} (m)	
Fracción de agotamiento permisible por tipo de uso en regadío, p (adimensional) ²	
profundidad radicular mínima por tipo de uso en regadío, Z _r min (m)	
profundidad radicular máxima por tipo de uso en regadío, Z _r max (m)	
Coeficiente de estrés por tipo de regadío ⁴ , K _s (adimensional)	Manual FAO-56 (Allen et al., 1998a)
Dosis máxima de riego por tipo de uso en regadío, R (mm/d)	
fracción de suelo mojada por lluvia o riego por tipo de uso en regadío, fw (adimensional)	
Periodo de riego por tipo de uso en regadío (días)	

1. Información climática generada por el Gobierno de La Rioja. Consejería de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente. Acceso público y gratuito a través de la web: <http://www.larioja.org/siar>

2. Adoptamos un parámetro *p* estándar de 0,5 para cítricos y frutales, 0,7 para viña y olivo y 0,55 para cultivos herbáceos

3. La ecuación Z_r se emplea para cultivos anuales y responde a Z_r = 1,053 NDVI – 0,06

4. Aplicamos un coeficiente de estrés de 0,5 para la viña y olivo

4.3. RESULTADOS DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS POR DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS

En este apartado se presentan los resultados anuales y mensuales de las necesidades netas de riego (sin tener en cuenta las diferentes eficiencias), obtenidas tras realizar con HidroMORE® el balance de agua en el suelo asistido por teledetección espacial y temporalmente distribuido. Además, en el visor Web EPACIO SiAR se puede acceder a las series temporales de necesidades de riego agregadas mensualmente.

Los resultados se entregan en dos formatos:

- Capas correspondientes a los valores agregados mensuales y al acumulado anual de la zona de estudio, año 2018, cargadas en la página web de ESPACIO SiAR.
- Agregación de los resultados de necesidades netas de riego por demarcación hidrográfica (ver Tabla 199 y 20).

Tabla 19. Volumen neto anual de riego (hm³/año) originado por demarcaciones hidrográficas en 2018

Demarcación Hidrográfica	Volumen de riego neto (hm ³)
	2018
Ebro	2.836
Duero	1.554
Guadalquivir	1.448
Júcar	1.193
Guadiana	1.151
Tajo	724
Segura	642
Cuencas Med. Andaluzas	291
Cuencas Internas de Cataluña	193
Guadalete y Barbate	175
Tinto, Odiel y Piedras	73
Tenerife	29
Islas Baleares	26
Cantábrico Oriental	21
La Palma	20
Gran Canaria	19
Miño – Sil	13
Galicia – Costa	5
Cantábrico Occidental	3
La Gomera	2
El Hierro	1

Demarcación Hidrográfica	Volumen de riego neto (hm ³)											
	2018											
Fuerteventura												0
Lanzarote												0

Tabla 20. Volumen de riego neto mensual (hm³/mes) en demarcación hidrográfica, 2018

Demarcación hidrográfica	Volumen de riego neto (hm ³) en 2018											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ebro	29,5	16,2	69,4	111,2	431,2	478,9	666,3	540,7	372,3	117,3	1,3	1,8
Duero	23,8	19,9	10,2	38,2	265,7	235,1	334,1	328,5	203,1	95,4	0,2	0,2
Guadalquivir	8,1	14,7	1	26,1	125,2	184,2	358,2	404,3	256,4	67,5	1,1	1,2
Júcar	39,5	6,4	47,2	128,5	200	172,7	277,1	206,6	76	35,4	1,2	2,4
Guadiana	6,6	11,3	4,4	57,6	129	138,3	316,1	319,1	140,4	27,3	0,5	0,3
Tajo	7,3	8,7	2,1	23,9	104,4	114,7	181,4	157,5	95,8	27,4	0,5	0,3
Segura	21,8	7	48,8	75,2	87,6	89,4	118,2	83	46,2	40,6	14,6	9,9
Mediterráneas Andaluzas	5,9	9,5	4,1	11,4	32,3	57,2	67,6	54,4	31,7	12,3	2,5	2,6
Internas de Cataluña	8,3	0,4	2,6	10	20	38,7	51,5	31,2	23,5	6,7	0	0,2
Guadalete y Barbate	1,1	2,3	0	2,5	24,7	25,3	40,9	41,2	27,9	8,6	0	0,1
Tinto, Odiel y Piedras	0,6	0,9	0,1	0,3	3,2	12,1	20,1	18,4	12,8	4,4	0,2	0
Tenerife	2,7	0	0,8	2,1	2,7	3,6	3,9	3,5	4	2,3	1,1	2,7
Islas Baleares	0	0	0,7	5,6	4,7	3,9	4,6	2,2	3,3	1,4	0	0
Cantábrico Oriental	0	0	0	0,1	0,5	2,9	4,9	6,9	4,1	1,6	0	0
La Palma	1,1	0	0,3	1,6	1,1	3,3	3,4	2,9	3,2	1,3	0,4	1,1
Gran Canaria	1,2	0	0,5	1,3	1,2	3,2	2,7	2,6	3,1	1,5	0,3	1,2
Miño – Sil	0	0	0	0,5	1,9	1,3	2,7	3,4	2,2	0,6	0	0
Galicia – Costa	0	0	0	0,2	0,9	0,6	0,8	1,1	0,9	0,2	0	0
Cantábrico Occidental	0	0	0	0	0,3	0,4	0,6	1,2	0,7	0,2	0	0
La Gomera	0,2	0	0	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	0,1	0,2
El Hierro	0,1	0	0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Fuerteventura	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
Lanzarote	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0

4.4. INTEGRACIÓN DE LA RED SIAR EN LA ESTIMACIÓN DIARIA DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS

En este apartado se realiza una referencia a las estaciones del SIAR del MAPA, la red de estaciones agrometeorológicas de la Comunidad Autónoma de La Rioja y RuralCat, de donde se obtienen los parámetros de precipitación y evapotranspiración de referencia (ETo) diaria, información imprescindible para la estimación de las necesidades hídricas netas de riego. Dichas redes de estaciones espacialmente distribuidas sobre el territorio nacional proporcionan a escala diaria ambos parámetros; su especial ubicación en las zonas regables hace que sus datos sean especialmente adecuados a los objetivos de determinación de las necesidades de agua y de riego de los cultivos.

En el trabajo se contó con un total de 565 estaciones repartidas sobre el territorio según la siguiente tabla (en el anexo 3 se recoge el listado de estaciones agrometeorológicas que se han tenido en cuenta para efectuar los cálculos en cada demarcación hidrográfica).

Tabla 21. Estaciones empleadas por demarcación hidrográfica y sistema de explotación.

Demarcación hidrográfica	Nº de estaciones agrometeorológicas
Ebro	92
Guadalquivir	53
Júcar	53
Duero	50
Segura	44
Cuencas Internas de Cataluña	128
Guadiana	33
Tajo	33
Canarias	31
Cuencas mediterráneas andaluzas	19
Baleares	10
Tinto, Odiel y Piedras	8
Guadalete y Barbate	6
Miño-Sil	3
Galicia-costa	2
TOTAL GENERAL	565

5. CONTROL DE CALIDAD EN EL PROCESADO DE IMÁGENES

Los controles de calidad se han desarrollado de forma individual e integrada en la serie temporal, de manera que en un primer lugar se analizó un muestreo de, aproximadamente, un 5% de las imágenes capturadas (escenas L8 o gránulos S2A y S2B) y, posteriormente, se analizó la imagen en el visor **ESPACIO SiAR** dentro de la serie temporal de los productos básicos para garantizar la consistencia temporal de los valores publicados.

5.1. CONTROLES DE CALIDAD SOBRE LA IMAGEN

Del total de imágenes procesadas automáticamente se tomaron un 5% de ellas (escenas L8 o gránulos S2A y S2B) para llevar a cabo los siguientes controles de calidad:

- Verificación en la imagen combinación color que el automatismo ha generado dicha imagen con las bandas correctas.
- Verificación de errores groseros en la imagen NDVI producida por el automatismo mediante la identificación de los valores máximos (vegetación densa) y de los valores mínimos (suelo desnudo).
- Verificación en la imagen Kcb que la ecuación utilizada por el automatismo ha generado una correcta transformación lineal desde la imagen NDVI

A continuación, se recoge el formato de las imágenes de salida tras el procesado básico (ver Tabla 22)

Tabla 22. Formato de salida de los productos básicos

Producto Básico	Tipo de dato	Rango de datos	No Data	Formato de salida
Imagen color RGB	Byte	[0, 255]	0	*.img
Imagen NDVI	Float	[-1, 1]	9999	*.img
Imagen Kcb	Byte	[0, 200]	255	*.img

5.2. CONTROLES DE CALIDAD SOBRE LA SERIE TEMPORAL

Los productos básicos, son cargados en el visor Web ESPACIO SiAR como servicios. Con el fin de obtener unas series temporales consistentes, los siguientes procesos de control de calidad son llevados a cabo sobre las series temporales:

- Comprobación que todos los productos básicos generados por el último procesado automático han sido cargados y se visualizan correctamente en **ESPACIO SiAR**.
- Comprobación de tendencias en las series temporales: supervisión de valores de los productos básicos cargados en **ESPACIO SiAR** utilizando la serie temporal para explotar el hecho de que las cubiertas vegetales evolucionan suavemente (zonas de vegetación natural, cubiertas de cultivos perennes,...)

5.3. OTROS CONTROLES DE CALIDAD

Además de los controles rutinarios anteriormente especificados, se han llevado a cabo trabajos de validación de los productos generados por la ESA y el USGS. Son los siguientes:

- Evaluación de los diferentes modelos de detección de nubes/sombras en las imágenes de Sentinel 2A. Se ha investigado diferentes aproximaciones a la detección de nubes y sombras según los modelos disponibles Fmask, Sen2Cor y SNAP, tras comprobar que durante 2016, la máscara automáticamente descargada no ofrecía la mínima calidad deseable. En consecuencia, se ha optado por generar una máscara de nubes y sombras siguiendo la metodología Sen2Cor (ver apartado procesado de nubes/sombras) por ofrecer mejores resultados que las demás en calidad y tiempo de procesados (ver Figura 21, en la que a la izquierda se aprecia la imagen combinación color y en la derecha la imagen NDVI resultante tras eliminar las nubes/sombras).

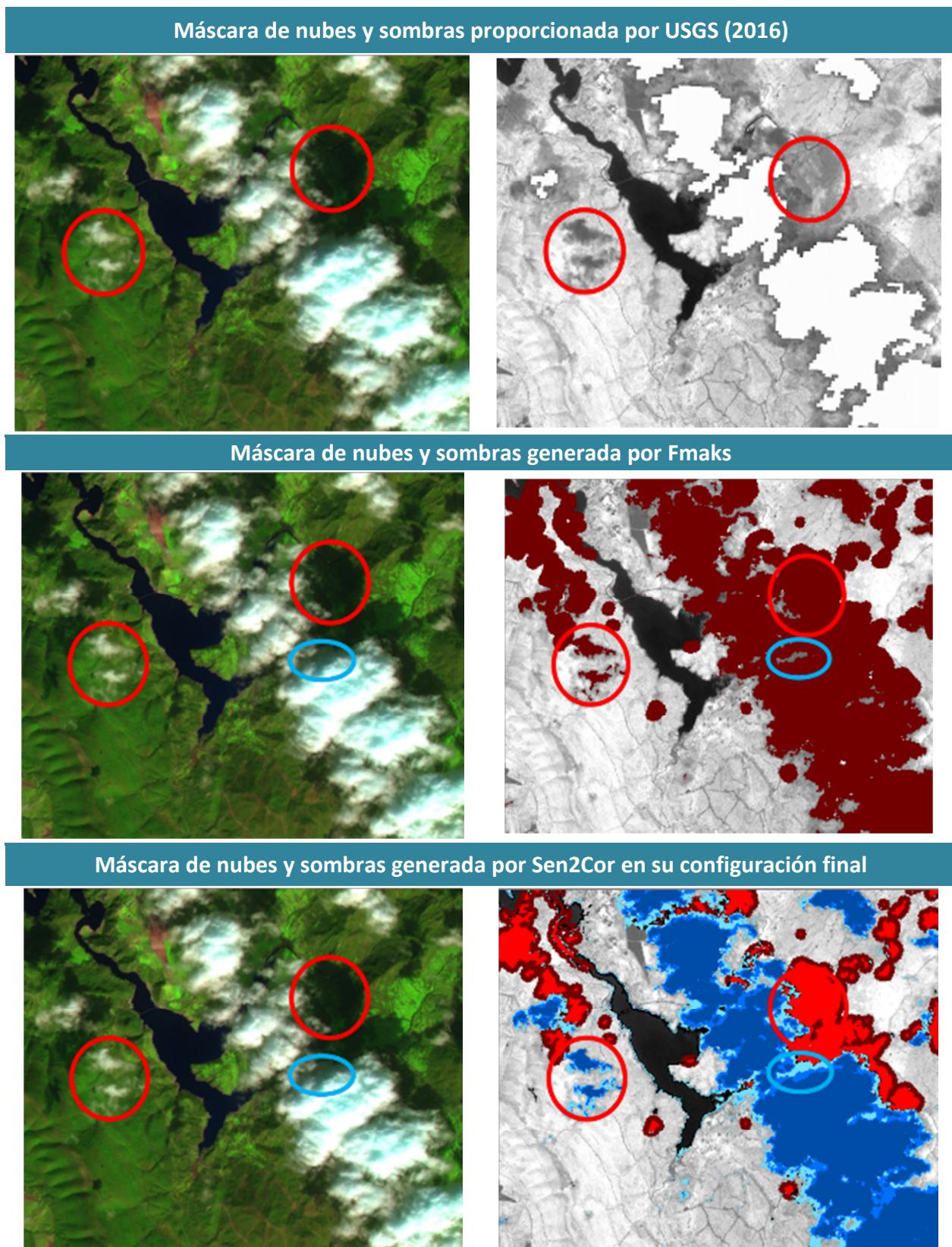
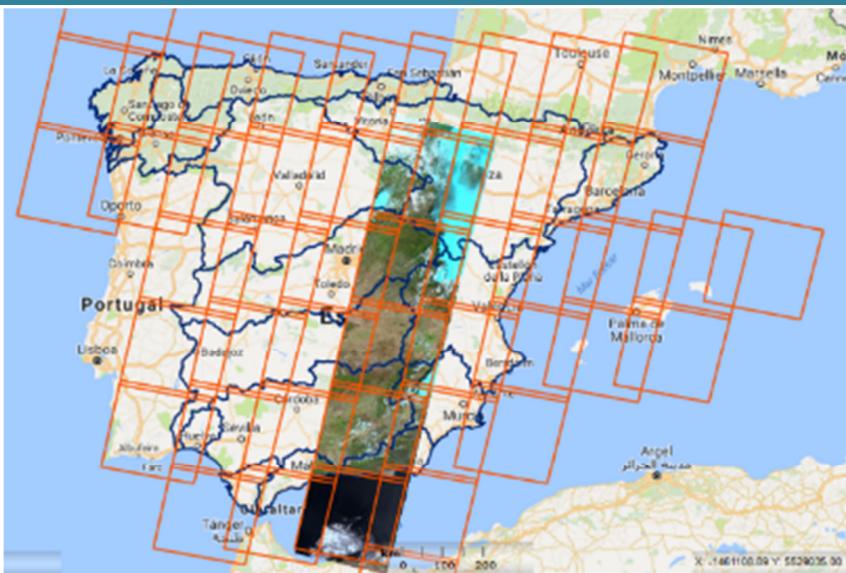


Figura 21. Algunos ejemplos de máscara de nubes y sombras testeadas (Fmask, SNAP, Sen2Cor).

- Revisión de la máscara de nubes/sombras proporcionada por USGS (L8): Se ha observado cómo en las zonas de solape vertical para unas imágenes de una misma pasada y fecha, la máscara de nubes y sombras proporcionada por el USGS es en ocasiones diferente. Hasta la fecha no se conoce la razón. En la siguiente imagen (ver Figura 22) se aprecia dichas diferencias encontradas en dos imágenes consecutivas

Imágenes capturadas por L8 en una misma pasada y detalle de la zona de solape vertical donde se ha observado diferentes máscaras de nubes y sombras proporcionadas



Máscara de nubes y sombras generada y aplicada sobre el NDVI para la imagen L8 200-032 (izquierda) y 200-033 (derecha)

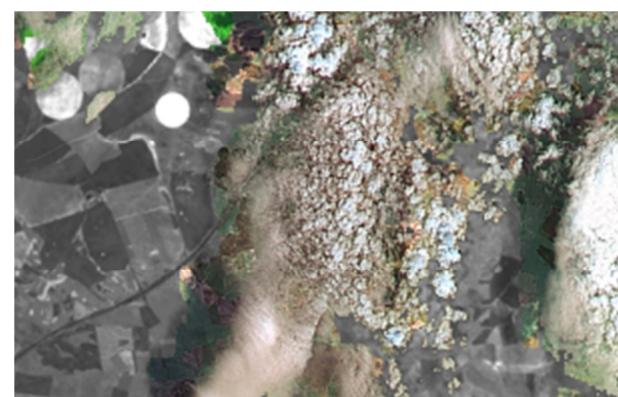
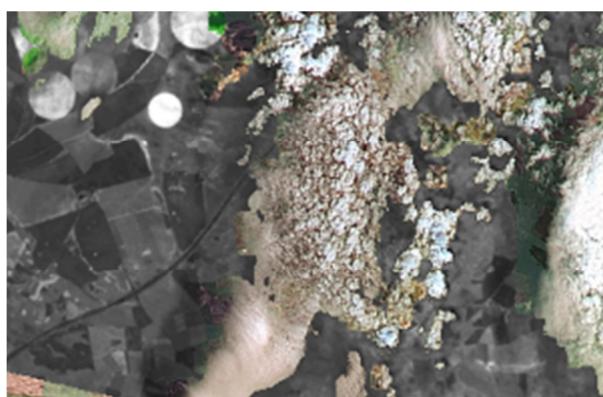


Figura 22. Diferencias en la máscara de nubes y sombras generada por L8.

- Desplazamiento geográfico en los bordes de las órbitas: en aquellos gránulos S2A procesados en 2016 se observa un ligero movimiento de la imagen en la zona del extremo del barrido que realiza el sensor para adquirir las imágenes de la órbita correspondiente. A continuación se expone un caso de estudio.

Las imágenes de 2016, gránulo TXM, presentan un desplazamiento entre diferentes fechas sean o no de la misma órbita (094 vs. 051). Para su confirmación se han descargado nuevamente las bandas originales viendo que existe un claro desplazamiento en la imagen (no en la geometría/alignación de los píxeles). Sin embargo, para la misma zona de análisis, las imágenes procesadas en 2017 no muestran tal desplazamiento (al menos no tan evidente), por lo que pensamos que la ESA ha podido trabajar en este aspecto. En consecuencia, concluimos que este desplazamiento ocurrido para 2016 puede ser debido a que la zona de estudio se encuentra en los márgenes de las órbitas 051 y 094. Para confirmar doblemente este aspecto, se han visualizado imágenes RGB en el centro de la órbita y no hemos encontrado tal desplazamiento.

Detalle de las imágenes combinación color S2A con fechas 2016/01/05 (izquierda) y 2016/01/12 (derecha)



Figura 23. Ligero desplazamiento en los bordes de las órbitas para las imágenes S2A descargadas desde el servidor de la ESA.

6. ACCESO A LAS SECUENCIAS TEMPORALES DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y LOS PRODUCTOS

Como se ha reseñado anteriormente, la consulta de los productos generados por el proyecto **ESPACIO SiAR** es libre y gratuita. Basta con acceder a través del visor Web SIG de ESPACIO SiAR.

Web ESPACIO SiAR	Web propia del SIAR
www.espaciosiar.es	www.siar.es

6.1. SECUENCIAS TEMPORALES DE IMÁGENES DE SATÉLITE.

- **RGB**: secuencia temporal de imágenes combinación color.
- **NDVI**: secuencia temporal de imágenes de índice de vegetación NDVI sin nubes y sombras.
- **Kcb**: secuencia temporal de imágenes coeficiente basal de cultivo sin nubes y sombras.

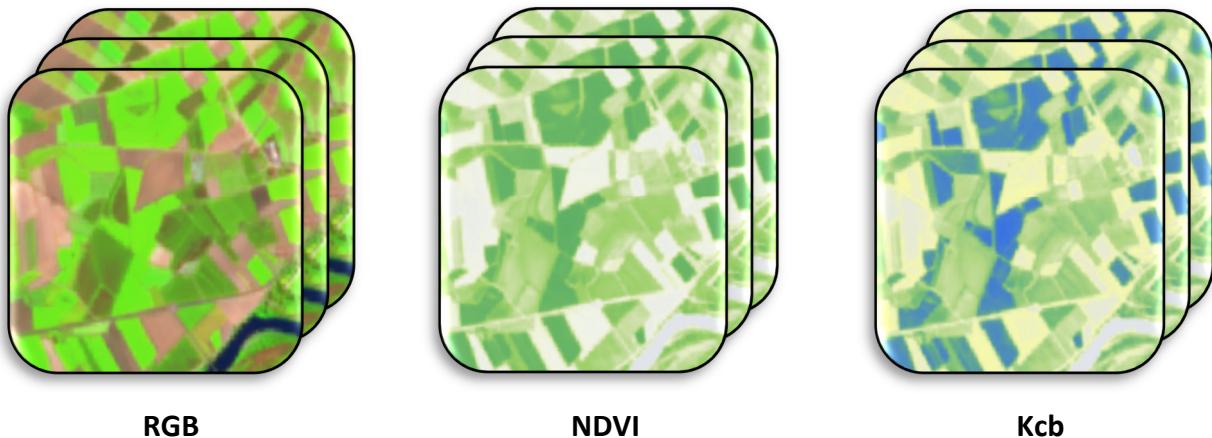


Figura 24. Conjunto de productos básicos tras el procesado de las imágenes Landsat 8 y resolución espacial generados en ESPACIO SiAR

6.2. USOS DEL SUELO.

- **Usos del suelo [en regadío]:** mapas descriptivos de usos de suelo en regadío clasificados según la secuencia temporal de NDVI. Divididos en diferentes clases según la leyenda:

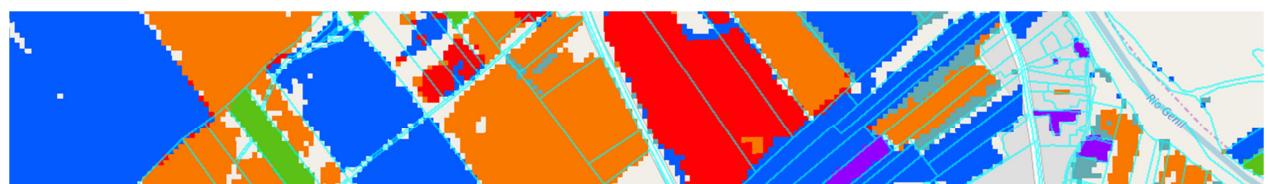
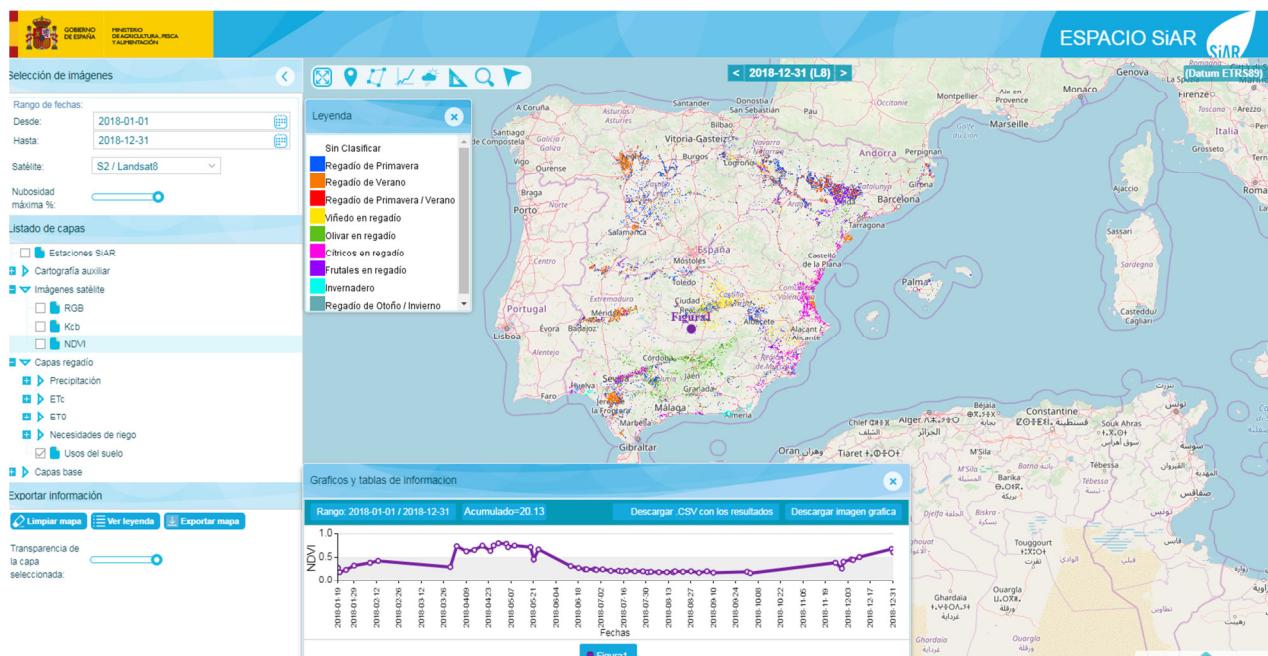
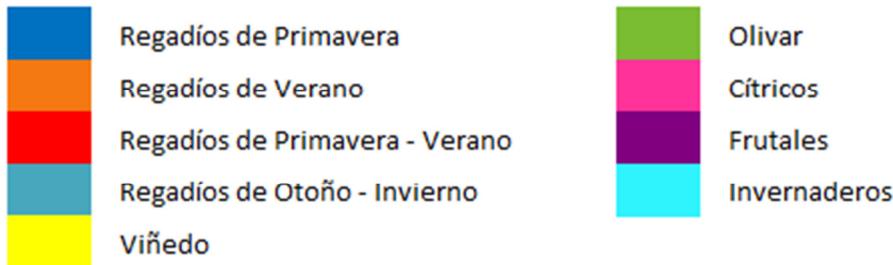


Figura 25. Imagen general y detalle de cómo se observan los distintos cultivos en regadíos según las clases de la leyenda en los mapas anuales de usos del suelo en regadío en ESPACIO SiAR

6.3. MAPAS TEMÁTICOS DE VARIABLES AGROCLIMÁTICAS Y BALANCE DE AGUA EN SUELO.

- **Evapotranspiración actual [mm/mes y mm/año]:** secuencia temporal de imágenes que describen las necesidades hídricas acumuladas mensual y anualmente de las cubiertas vegetales en regadío.
- **Necesidades netas de riego [mm/mes y mm/año]:** secuencia temporal de imágenes que describen la dosis de riego neto acumulado mensualmente de las cubiertas vegetales en regadío.
- **Evapotranspiración de referencia [mm/mes y mm/año]:** secuencia temporal de imágenes que describen la demanda evaporativa de la atmósfera acumulada mensual y anualmente.
- **Precipitación [mm/mes y mm/año]:** secuencia temporal de imágenes que describen la precipitación acumulada mensual y anualmente.

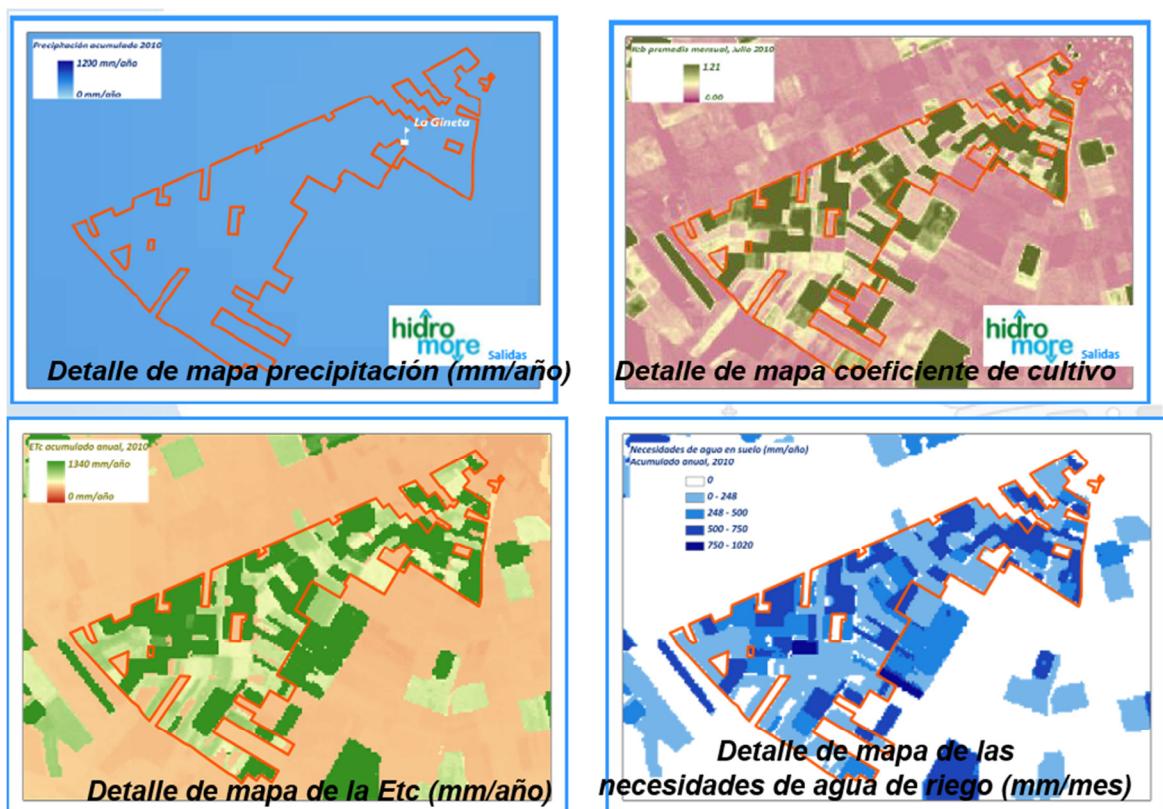


Figura 26. Imagen de cómo se observan los distintos cultivos en regadíos según las clases de la leyenda en los mapas anuales de usos del suelo en regadío

6.4. CONTROLES DE CALIDAD SOBRE MAPAS TEMÁTICOS DE VARIABLES AGROCLIMÁTICAS Y BALANCE DE AGUA EN EL SUELO

Se comparan puntualmente los valores agroclimáticos obtenidos de base de datos para cada estación meteorológica de la red SIAR con los valores de los mapas temáticos de variables agroclimáticas.

6.5. CARTOGRAFÍA AUXILIAR.

- **Red SiAR:** capa vectorial de puntos que indica la posición de cada estación agroclimática que forma parte del SiAR.
- **Demarcaciones hidrográficas:** Capa que contiene los límites de las Demarcaciones hidrográficas
- **Recintos SIGPAC:** Capa que contiene los recintos del Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas, SIGPAC. Esta capa únicamente es visible a un nivel de zoom de 200 m
- **Catastro:** Capa que contiene los bienes inmuebles rústicos, urbanos y de características especiales
- **Nomenclador Geográfico:** Registro dinámico de información del Instituto Geográfico Nacional, que recoge las denominaciones oficiales referenciadas geográficamente que deben utilizarse en la cartografía oficial. Está constituido por la armonización del Nomenclátor Geográfico Básico de España y los Nomenclátores Geográficos de cada una de las Comunidades Autónomas
- **Divisiones Administrativas:** Unidades administrativas y límites administrativos de España con tres niveles de administración (comunidad autónoma, provincia y municipio) en función del zoom aplicado.
- **MTN IGN:** Mapa topográfico nacional procedente del instituto geográfico nacional. Las escalas representados en función del nivel de zoom son: 1:500.000, 1:200.000, 1:100.000 y 1:25.000.
- **Ortofotos (PNOA):** Imágenes procedentes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con resolución de 25 o 50 cm
- **Fechas Ortofotos:** Fecha de captura de las ortofotos
- **Open Street Map:** Mapa básico procedente de Open Street Maps

7. CONCLUSIONES

Gracias al proyecto ESPACIO SiAR, llevado a cabo por la Subdirección General de Regadíos e Infraestructuras Rurales del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, MAPA, el empleo de imágenes de satélite junto con la información ofrecida por el SiAR del MAPA permite conocer a escala de píxel la evolución de las cubiertas vegetales en regadío.

Toda la información generada por el proyecto ESPACIO SiAR se pone a disposición de los diferentes usuarios, tanto en el ámbito del sector agroalimentario como de la gestión de los recursos hídricos que realizan las administraciones públicas, de forma libre y gratuita en la página web del proyecto en el ámbito nacional.

El estudio de las secuencias temporales de Kcb aporta beneficios relevantes en diferentes niveles de gestión.

Por un lado, el regante o el asesor pueden ser capaces de monitorizar el estado de sus cubiertas vegetales en regadío y, estimar las necesidades hídricas de sus cultivos. Por otro lado, el gestor de una comunidad de regantes es capaz de acceder a valores promedio agregados a la escala espacial de la propia comunidad de regantes y efectuar la comparación con la de otras campañas de riego.

De manera adicional, la estimación de las superficies de los cultivos en regadío por demarcaciones hidrográficas y por comunidades autónomas, así como de sus necesidades hídricas netas, resultan de gran relevancia para la gestión de los recursos hídricos y la planificación estratégica que realizan las administraciones públicas, en el marco del ciclo de planificación hidrológica.

Por todo ello, se puede afirmar que el proyecto ESPACIO SiAR contribuye a la mejora de la eficiencia en el uso del agua del regadío y, por lo tanto, a la eficiencia energética, además de permitir una planificación adecuada de los recursos hídricos por parte de los gestores del agua, al contar con información espacialmente agregada de la situación y evolución de los cultivos en regadío sobre grandes áreas.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998a. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Roma, Italy.
- Allen, R.G., 2011. Skin layer evaporation to account for small precipitation events—An enhancement to the FAO-56 evaporation model. Agricultural Water Management 99, 8-18.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A., Jensen, M.E., 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. Agricultural Water Management 98, 899–920.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998b. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.
- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J., Makin, I.W., 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. Agricultural Water Management 46, 137-155.
- Calera, A., Castaño Fernández, S., Quintanilla, A., Odi, M., Belmonte, M., Arellano, I., Jiménez-Martínez, N., 2011. Estudio sobre la Evapotranspiración y el agua de Riego aplicada sobre las superficies de regadío mediante teledetección en los acuíferos sobreexplotados del Alto Guadiana. Años 2005, 2009 y 2010. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Albacete, p. 131.
- Calera, A., Castaño Fernández, S., Quintanilla, A., Torres, E.A., Campos, I., Belmonte, M., Arellano, I., Garrido-Rubio, J., 2009a. Estudio sobre la Evapotranspiración y el agua de Riego aplicada sobre las superficies de regadío mediante teledetección en las masas 04.04 y 04.06. Alto Guadiana. Años 2007 y 2008. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), Albacete, p. 98.
- Calera, A., Garrido-Rubio, J., Saiz, J., Sánchez, J., 2009b. Interpolación normalizada de imágenes procedentes de múltiples sensores. Sección de Teledetección y SIG. IDR-Albacete (UCLM). Albacete, p. 48.
- Calera, A., Jochum, A., García, A., Rodríguez, A., Fuster, P., 2003. Irrigation management from space: Towards user-friendly products. Irrig Drainage Syst 19, 337-353.
- Calera, A., Vela Mayorga, A., Castaño Fernández, S., 1999. GIS tools applied to the sustainable management of water resources: Application to the aquifer system 08-29. Agricultural Water Management 40, 207-220.
- Campos, I., Calera, A., Balbontín, C., Torres, E.A., González-Piqueras, J., Neale, C.M.U., 2010a. Basal crop coefficient from remote sensing assessment in rain-fed grapes in southeast Spain, Remote sensing and hydrology. IAHS, Jackson Hole (WY). USA, pp. 397-400.
- Campos, I., Calera, A., Balbotín, C., Torres, E.A., González-Piqueras, J., Neale, C.M.U., 2010b. Basal Crop Coefficient From Remote Sensing Assessment in Rain-Fed Grapes in Southeast Spain, in: Sciences), I.I.A.o.H. (Ed.), Remote Sensing and Hydrology 2010 Symposium, Jackson Hole, Wyoming, pp. 397-400.
- Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010c. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). Agricultural Water Management 98, 45-54.
- Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontín, C., González-Piqueras, J., 2010d. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). Agricultural Water Management 98, 45-54.
- Consoli, S., Barbagallo, S., 2012. Estimating Water Requirements of an Irrigated Mediterranean Vineyard Using a Satellite-Based Approach. Irrig Sci 138, 896-904.
- Cuesta, A., Montoro, A., Jochum, A.M., López, P., Calera, A., 2005. Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. ITEA : Información Técnica Económica Agraria 101, 212-224.

- Chen, X., Vierling, L., Deering, D., 2005. A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensors and across time. *Remote Sensing of Environment* 98, 63-79.
- Choudhury, B.J., Ahmed, N.U., Idso, S.B., Reginato, R.J., Daughtry, C.S.T., 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment* 50, 1-17.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 24*, FAO, Rome, Italy.
- European Commission, 2012. REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL on the Implementation of the Water Framework Directive (2000/60/EC) River Basin Management Plans.
- Forney, W.M., Raunikar, R.P., Bernknopf, R.L., Mishra, S.K., 2012. An economic value of remote-sensing information -- Application to agricultural production and maintaining groundwater quality. *Professional Paper* 1796, 60.
- Garrido-Rubio, J., Campos, I., Villa, G., Plaza, N., Calera, A., 2011. INTERPOLA. Herramienta para la generación de imágenes sintéticas y sustitución de valores reales con presencia de nubes-sombras por valores interpolados, XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Mieres, Asturias, Spain, p. 4.
- Garrido-Rubio, J., Rodriguez, J., Madurga, C., Fraile, L., Calera, A., González, L., Jiménez-Martinez, N., Arellano, I., Campos, I., Odi, M., Moreno-Rivera, J.M., 2012. Integración de la red SiAR e imágenes de satélite en la estimación de las necesidades de agua de riego. Aplicación al Center y su extensión a grandes áreas, XXX Congreso Nacional de Riegos, Albacete, p. 10.
- Glenn, E.P., Neale, C.M.U., Hunsaker, D.J., Nagler, P.L., 2011a. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrological Processes* 25, 4050-4062.
- Glenn, E.P., Neale, C.M.U., Hunsaker, D.J., Nagler, P.L., 2011b. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrological Processes* 25, 4050-4062.
- Gonzalez-Dugo, M.P., Neale, C.M.U., Mateos, L., Kustas, W.P., Prueger, J.H., Anderson, M.C., Li, F., 2009. A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1843-1853.
- González-Piqueras, J., 2006. Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por Teledetección. Extensión a escala regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental.
- Heilman, J.L., Heilman, W.E., Moore, D.G., 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal* 74, 967-971.
- Hiederer, R., 2013. Mapping Soil Properties for Europe - Spatial Representation of Soil Database Attributes, Publications Office of the European Union, Scientific and Technical Research series. Joint Research Center, Luxembourg, p. 47.
- MAPA, 2018. SiAR, Sistema de información Agroclimática para el Regadio (<http://www.siar.es>).
- Martínez, C., 2014. Observación multiespectral de la cubierta vegetal mediante Teledetección. Aplicación a Castilla-La Mancha. UCLM (Universidad de Castilla-La Mancha), Albacete.
- Miller, H.M., Sexton, N.R., Koontz, L., Loomis, John, Koontz, S.R., Hermans, C., 2011. The users, uses, and value of Landsat and other moderate-resolution satellite imagery in the United States. Executive report. Open-File Report 2011-1031, 43.
- Moran, M.S., Inoue, Y., Barnes, E.M., 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment* 61, 319-346.

- Moreno, R., Arias, E., Sánchez, J.L., Cazorla, D., Garrido-Rubio, J., González-Piqueras, J., 2015. HidroMORE 2: An Optimized and Parallel Version of HidroMORE. Environmental Modeling & Software, 16.
- Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heerman, D.F., 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn Transactions of the ASAE 32, 1891-1899.
- Panagos, P., Van Liedekerke, M., Jones, A., Montanarella, L., 2012. European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements. Land Use Policy 29, 329-338.
- Rioja, G.d.L., 2018. Consejería de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente. Servicio de Información Agroclimática de La Rioja (<http://www.larioja.org/siar>).
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Deering, D.W., Schell, J.A., 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. Remote Sensing Center. College Station.
- Sánchez, N., Martínez-Fernández, J., Calera, A., Torres, E., Pérez-Gutiérrez, C., 2010. Combining remote sensing and in situ soil moisture data for the application and validation of a distributed water balance model (HIDROMORE). Agricultural Water Management 98, 69-78.
- Schroeder, T.A., Cohen, W.B., Song, C., Canty, M.J., Yang, Z., 2006. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. Remote Sensing of Environment 103, 16-26.
- Serbina, L., Holly, M.M., 2014. Landsat and Water — Case Studies of the Uses and Benefits of Landsat Imagery in Water Resources. 61.
- SMC, S.M.d.C., 2018. RuralCat, Datos agrometeorológicos (<http://www.ruralcat.net/>).
- Torres, E.A., 2010. El modelo FAO-56 asistido por satélite en la estimación de la evapotranspiración en un cultivo bajo estrés hídrico y en suelo desnudo. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM).
- Torres, E.A., Calera, A., 2010. Bare soil evaporation under high evaporation demand: a proposed modification to the FAO-56 model. Hydrological Sciences Journal 55, 303-315.
- Van Leeuwen, C., Tregot, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D., Gaudillère, J.-P., 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? International journal of vine and wine sciences 43, 121-134.
- Villa, G., Moreno, J., Calera, A., Amorós-López, J., Camps-Valls, G., Domenech, E., Garrido, J., González-Matesanz, J., Gómez-Chova, L., Martínez, J.Á., Molina, S., Peces, J.J., Plaza, N., Porcuna, A., Tejeiro, J.A., Valcárcel, N., 2012. Spectro-temporal reflectance surfaces: a new conceptual framework for the integration of remote-sensing data from multiple different sensors. International Journal of Remote Sensing 34, 3699-3715.
- Williams, L.E., Ayars, J.E., 2005. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. Agricultural and Forest Meteorology 132, 201-211.
- Wright, J.L., 1982. New Evapotranspiration Crop Coefficients. Journal of the Irrigation and Drainage Division 108, 57-74.

**ANEXO I. DETERMINACIÓN DE LAS
NECESIDADES DE AGUA Y DE RIEGO
MEDIANTE ESTACIONES
AGROMETEOROLÓGICAS Y SERIES
TEMPORALES DE IMÁGENES
MULTIESPECTRALES**

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La gestión adecuada del riego requiere la estimación precisa de las demandas hídricas de los cultivos y la adecuación de los volúmenes de riego a las mismas para conseguir el mejor uso del agua desde el punto de vista productivo y medioambiental. Para ello, han de considerarse las características específicas de manejo de cada cultivo, los aportes por precipitación y el contenido de agua en la capa de suelo explorado por las raíces.

En este anexo se considera la estimación de las necesidades de agua y de riego mediante secuencias temporales de imágenes multiespectrales de satélite y estaciones meteorológicas; se describe también el procedimiento para estimar las necesidades de agua y riego mediante la integración de las series de imágenes en el modelo FAO-56. Dadas las diferentes características de cultivo y manejo, se analiza la aplicación del procedimiento descrito por separado a cultivos herbáceos y leñosos, y dentro de estos últimos específicamente a la viña, y se discute su aplicabilidad. Así pues, se estructura con una parte metodológica general aplicable a todo tipo de cultivos y cubiertas, y una parte específica para cultivos herbáceos y para cultivos leñosos, donde se describen aproximaciones operativas.

2. DETERMINACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS: METODOLOGÍA KC-ETO BASADA EN TELEDETECCIÓN

Una metodología ampliamente utilizada y comúnmente aceptada para la estimación de las necesidades hídricas de la cubierta vegetal, que vienen determinadas por la evapotranspiración ET, es aquella denominada Coeficiente de cultivo-Evapotranspiración de referencia K_c -ET₀, que se describe de forma detallada en el manual de FAO-56 (Allen et al., 1998a).

El procedimiento K_c -ET₀ considera que la ET es el producto de dos factores, el primero de ellos la demanda evaporativa de la atmósfera o evapotranspiración de referencia, ET₀, en la que se engloban parámetros meteorológicos como la radiación, la velocidad del viento y la sequedad del aire, y el segundo, un coeficiente de cultivo, que indica el estado de desarrollo de la cubierta frente a aquella que se considera patrón o de referencia, en FAO56 una gramínea como la festuca.

La formulación más avanzada del procedimiento FAO-56 incorpora al tradicional uso de coeficiente de cultivo “único” K_c el denominado coeficiente de cultivo “dual” (Wright, 1982), el cual permite acercarnos a la estimación de la evapotranspiración como suma por un lado de la transpiración, o flujo de agua a través de la planta, y por otro de la evaporación desde la fracción de suelo desnuda. Para ello se introduce el coeficiente de cultivo basal, K_{cb} , como el cociente entre la transpiración de una cubierta en ausencia de estrés y la evapotranspiración de referencia, así como un coeficiente evaporativo, K_e , que recoge la evaporación desde el suelo desnudo.

La estimación de la ET para cultivos en ausencia de estrés hídrico se realiza mediante las ecuaciones (1) y (2) usando el coeficiente único y dual, respectivamente:

- 1) $ET = K_c ET_o$
- 2) $ET = K_{cb} ET_o + K_e ET_o$

donde:

ET: evapotranspiración del cultivo

ET_o: evapotranspiración de referencia

K_c: coeficiente de cultivo “único”

K_{cb}: coeficiente de cultivo basal o coeficiente de transpiración

K_{cb} · ET_o es la componente de la transpiración en ausencia de estrés

K_e: coeficiente evaporativo

K_e · ET_o es la componente de evaporación desde el suelo

La disponibilidad de agua en el suelo suele ser el factor limitante en el desarrollo de la cubierta vegetal en condiciones semiáridas típicas del clima mediterráneo. Cuando el contenido en agua de la capa de suelo explorada por las raíces cae por debajo de un cierto valor umbral, la planta no puede extraer agua al ritmo que demanda el sistema planta-atmósfera, y entra en estrés hídrico. La aparición de estrés hídrico causa diferentes efectos sobre el desarrollo de las plantas: valores bajos de estrés causan disminución del crecimiento vegetativo, lo que se traduce en un menor crecimiento y desarrollo de las hojas. Grados de estrés más elevado causan cierre estomático y si el grado de estrés crece, las hojas pueden morir.

El efecto del estrés hídrico en la metodología K_c-ET_o se considera introduciendo un coeficiente de estrés K_s, tal y como se indica en la ecuación (3). Este coeficiente K_s puede tomar valores en el rango de 0 a 1; Un valor de K_s igual a 1 indica ausencia de estrés, y en este caso la ecuación (3) se transforma en la ecuación (2); mientras que un valor igual a 0 para K_s corresponde a máximo estrés.

$$3) \quad ET = K_s K_{cb} ET_o + K_e ET_o$$

En el caso de utilizar el coeficiente único K_c, el coeficiente de estrés se introduce en la formulación FAO-56 como se muestra en la ecuación (4).

$$4) \quad ET = K_s K_c ET_o$$

Las ecuaciones (3) y (4) se transforman en las ecuaciones (1) y (2) en el caso de ausencia de estrés, esto es K_s =1. El cálculo del coeficiente de estrés K_s se hace en FAO-56 estimando el contenido de agua de la capa de suelo en la que se encuentran las raíces a través de un balance de agua, tal y como se describe en el Anexo I. La determinación del estrés hídrico permite el uso de técnicas de riego como las denominadas de riego deficitario controlado, en las que se aplica la cantidad de agua precisa que permite un manejo del cultivo bajo un determinado estrés sin merma apreciable en la producción.

El coeficiente de cultivo basal Kcb desde imágenes multiespectrales: El modelo FAO56 basado en Teledetección

Para obtener el valor de ETo se dispone en España de una red de estaciones agroclimáticas del MAPA que permiten conocer de manera precisa y en tiempo real su valor diario, calculado a partir de datos agrometeorológicos medidos en la zona y públicamente disponibles mediante el Sistema de información Agroclimática para el Regadío (SiAR), cuya información se puede consultar en la página web www.siar.es

La determinación del coeficiente de cultivo Kc es el segundo paso para calcular la ET. El parámetro Kc varía a lo largo del ciclo de crecimiento y depende del desarrollo concreto de cada cubierta.

Aunque en las últimas décadas se ha realizado un gran esfuerzo para tabular valores típicos del coeficiente de cultivo y del coeficiente de cultivo basal, estos dependen fuertemente de la arquitectura de la cubierta y de la cobertura vegetal alcanzada. Su determinación concreta es a veces compleja y requiere de un intensivo y costoso trabajo de campo por lo que limita la aplicación generalizada del modelo FAO-56.

En el marco conceptual del procedimiento FAO-56, la metodología Kc-ETo basada en teledetección deriva el valor del coeficiente de cultivo desde las imágenes multiespectrales adquiridas por sensores a bordo de plataformas espaciales, aerotransportadas o en tierra (Calera et al., 2003). La estimación del coeficiente de cultivo desde estas imágenes aparece cada vez más como una herramienta operativa, basada en una amplia evidencia experimental (Allen et al., 2011; Glenn et al., 2011b), lo que a su vez permitiría generalizar la aplicación precisa del procedimiento FAO-56.

El uso de series temporales de imágenes de satélite posibilita la descripción de la evolución del coeficiente de cultivo a lo largo del ciclo de crecimiento. Las imágenes proporcionan además la descripción espacial de la cubierta, la cual puede presentar y presenta variaciones notables de unas zonas a otras, permitiendo el cálculo de las necesidades de agua espacialmente distribuidas de acuerdo a las demandas de la cubierta.

Relación entre el coeficiente de cultivo basal Kcb y el índice de vegetación NDVI

La abundante literatura científica desde (Heilman et al., 1982) a Neale (Neale et al., 1989), pone de manifiesto la buena relación lineal existente entre el coeficiente de cultivo basal de una cubierta, análogo a un coeficiente de transpiración, y los índices de vegetación, como el Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado, NDVI, así como con otros índices como el SAVI. Desde trabajos teóricos (Choudhury et al., 1994), a experimentales (Gonzalez-Dugo et al., 2009) esta relación se ha analizado para una amplia gama de cultivos y vegetación natural (Glenn et al., 2011a).

El NDVI es un parámetro que se obtiene de forma robusta, simple y directa desde las imágenes multiespectrales mediante una combinación algebraica de las reflectividades en el

rojo e infrarrojo cercano. El NDVI, sobre el que se cuenta con gran experiencia en teledetección, mide el tamaño fotosintético relativo de la cubierta, y recoge cómo la cubierta vegetal absorbe la radiación solar fotosintéticamente activa.

La relación propuesta entre el valor del coeficiente Kcb, tal y como se define en FAO56 y el índice NDVI se presenta en la ecuación (5) (Campos et al., 2010c), que es muy similar a la encontrada por Neale et al. (1989).

$$5) \quad K_{cb} = 1.44 \text{ NDVI} - 0.1$$

donde:

K_{cb}: coeficiente de cultivo basal, con valores que oscilan entre 0.15 y 1.15

NDVI: Índice de Vegetación por Diferencias Normalizado, obtenido desde imágenes multiespectrales corregidas atmosféricamente y normalizado a las bandas espectrales LandsatETM+; sus valores oscilan entre aproximadamente 0.14 (suelo desnudo) y 0.91 (cubiertas verdes muy densas)

La ecuación (5) permite obtener valores de Kcb desde una imagen en la que se ha calculado el valor del NDVI para cada pixel y asignarlos a los distintos puntos de una parcela en concreto. Además puede obtenerse la evolución temporal del coeficiente Kcb si se cuenta con una serie temporal de imágenes. La secuencia de imágenes permite pues describir la evolución de la cubierta concreta, atendiendo a sus características específicas de siembra y crecimiento y muestra la variabilidad espacial y temporal que los distintos factores de suelo y manejo pueden introducir. El procedimiento basado en la relación descrita por la ecuación (5) ha sido también desarrollado sobre viña y produce resultados comparables a aquellos que calculan el coeficiente de cultivo para viña mediante la medida de la fracción sombreada (Campos et al., 2010b) como se hace en Williams, L.E. and Ayars, J.E. (Williams and Ayars, 2005).

Necesidades de agua y necesidades de riego. Determinación directa de la transpiración de una cubierta

La evapotranspiración de la cubierta en un intervalo temporal es el ritmo al que el vapor de agua sale de la cubierta por los procesos de transpiración y evaporación. Las necesidades de agua de la cubierta son aquellas que reponen el agua intercambiada con la atmósfera. Cuando el suelo explorado por las raíces tiene suficiente humedad la cubierta transpira al máximo ritmo posible. Una vez que el contenido en agua en el suelo cae por debajo de un cierto umbral el cultivo entra en estrés hídrico y el ritmo de transpiración se reduce.

El producto del coeficiente de cultivo basal derivado de las imágenes multiespectrales y la ETo obtenida desde estaciones del SIAR, permite estimar directamente la transpiración máxima actual que la cubierta puede alcanzar bajo las condiciones de demanda evaporativa indicadas por la ETo. El conocimiento de esta transpiración máxima, que no requiere de ningún dato

adicional a las imágenes y a las estaciones meteorológicas, puede revestir un gran valor para muchas aplicaciones.

Las ecuaciones (3) y (5) conforman el modelo completo FAO-56 basado en teledetección que permite determinar de forma precisa las necesidades de agua, y al incorporar un detallado balance de agua en suelo permite también calcular cuándo esta agua debe ser aplicada. La estrategia de riego para un determinado cultivo suele requerir como un primer paso determinar el agua a aplicar necesaria para que el cultivo crezca al máximo ritmo posible, y por tanto evitar el estrés hídrico. En muchos casos esta puede ser el agua que finalmente se aplique, pero en otros puede interesar un riego deficitario controlado, en el que se maneje el cultivo con un grado de estrés determinado en función de las fases del ciclo de crecimiento para obtener así un óptimo rendimiento.

Un punto crucial en la aplicación del modelo FAO-56 reside en las incertidumbres asociadas al balance de agua en la capa de suelo explorada por las raíces y en la modelización de la evaporación del suelo desnudo, como también sucede en otros modelos similares. Esto es intrínseco al propio modelo, más allá de la fiabilidad de la determinación de K_{cb} mediante imágenes multiespectrales, lo cual descansa en la sencilla relación expresada en la ecuación (5), que obviamente requiere posteriores trabajos de investigación. En especial, el parámetro capacidad de almacenamiento de agua en el suelo es intrínsecamente difícil de conocer incluso con medidas *in situ*, pues este parámetro integra las características hidráulicas del suelo, el volumen que es explorado por las raíces y la propia capacidad de la planta para extraer el agua; además puede presentar y presenta una alta variabilidad espacial dentro de la misma parcela.

3. DISPONIBILIDAD DE IMÁGENES DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN

El acceso a las series temporales de índices de vegetación (IV) es, obviamente, necesario para la aplicación de la metodología aquí descrita. Dichas series temporales tienen que ser lo suficientemente densas, esto es la frecuencia de imágenes suficiente, para describir adecuadamente la evolución temporal de la cubierta vegetal.

La frecuencia ideal es la de, al menos, una imagen por semana, siendo este intervalo temporal el que es también frecuentemente utilizado tanto en la planificación del riego como en la toma de decisiones de manejo del cultivo. Hasta con una frecuencia de 15 días la interpolación lineal entre imágenes consecutivas permite acercarnos con suficiente precisión a los valores diarios (Calera et al., 2009b; Garrido-Rubio et al., 2011) y obtener así también valores semanales. Diversos procedimientos de procesado de imágenes permiten obtener series densas homogéneas de imágenes de IV utilizando la constelación de sensores actualmente en órbita, como son Landsat, DEIMOS, SPOT, ... (Martínez, 2014; Villa et al., 2012). De esta forma es posible reducir la limitación que la frecuente presencia de nubes en ciertas zonas y épocas impone.

En la actualidad, existen suficientes sensores en órbita para conseguir una buena frecuencia de imágenes con resolución espacial entre 5 y 30 m, suficiente para la mayor parte

de las aplicaciones en agricultura. Sin embargo la adquisición de estas imágenes tiene un coste difícilmente asumible por usuarios particulares.

Desde el lanzamiento en 2013 de Landsat 8, las imágenes ya georreferenciadas son accesibles prácticamente en el día de su adquisición a través del portal GLOVIS, operado por el USGS (<http://glovis.usgs.gov/>). En esta misma dirección está definiendo su política la agencia espacial europea ESA, que ha lanzado Sentinel 2A y Sentinel 2B, con una política de descarga gratuita.

Considerando que las imágenes estén disponibles, aún es necesario un procesado básico para construir las secuencias temporales de índices de vegetación en forma que asegure la homogeneidad y consistencia de los datos. Finalmente el desarrollo de las tecnologías de la información, y concretamente las plataformas webGIS, hace posible acceder a estas imágenes vía internet.

Gracias al proyecto ESPACIO SiAR de la Subdirección General de Regadíos e Infraestructuras Rurales del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, se dispone de acceso libre y gratuito a las imágenes procesadas de los satélites Landsat 8, Sentinel 2A y Sentinel 2B, a través de la página web del proyecto, así como a todos los productos generados.

4. APPLICACIÓN A CULTIVOS HERBÁCEOS

En este apartado se describen aproximaciones operativas a la determinación de las necesidades hídricas y a las de riego con un mínimo de datos de entrada. La metodología rigurosa es la descrita anteriormente y en muchos casos se dispone del conocimiento de los suelos y los cultivos que junto al conocimiento técnico permiten su aplicación.

La Figura 27 describe la evolución de una cubierta de trigo en regadío mediante los valores del NDVI obtenidos de una serie temporal de imágenes de satélite. En ella se indican las diferentes fases del ciclo de crecimiento, separadas por líneas discontinuas, así como algunas fases fenológicas relevantes tales como la aparición de la hoja bandera y el punto en que el grano alcanza la madurez fisiológica. Esta curva corresponde a un trigo cuya producción se situó alrededor de los 10.000 kg/ha, siendo cercana a la curva “ideal”. Otra característica general a otros muchos cultivos, que se puede observar en la figura, es la suavidad con que la cubierta evoluciona a lo largo de su ciclo de crecimiento.

La clara diferenciación de las fases a efectos de la aplicación del coeficiente de cultivo en que clásicamente se diferencia el ciclo de crecimiento del cultivo (Allen et al., 1998a) permite contabilizar la duración de dichas fases para la cubierta especificada, lo que puede ser de interés en algunas aplicaciones.

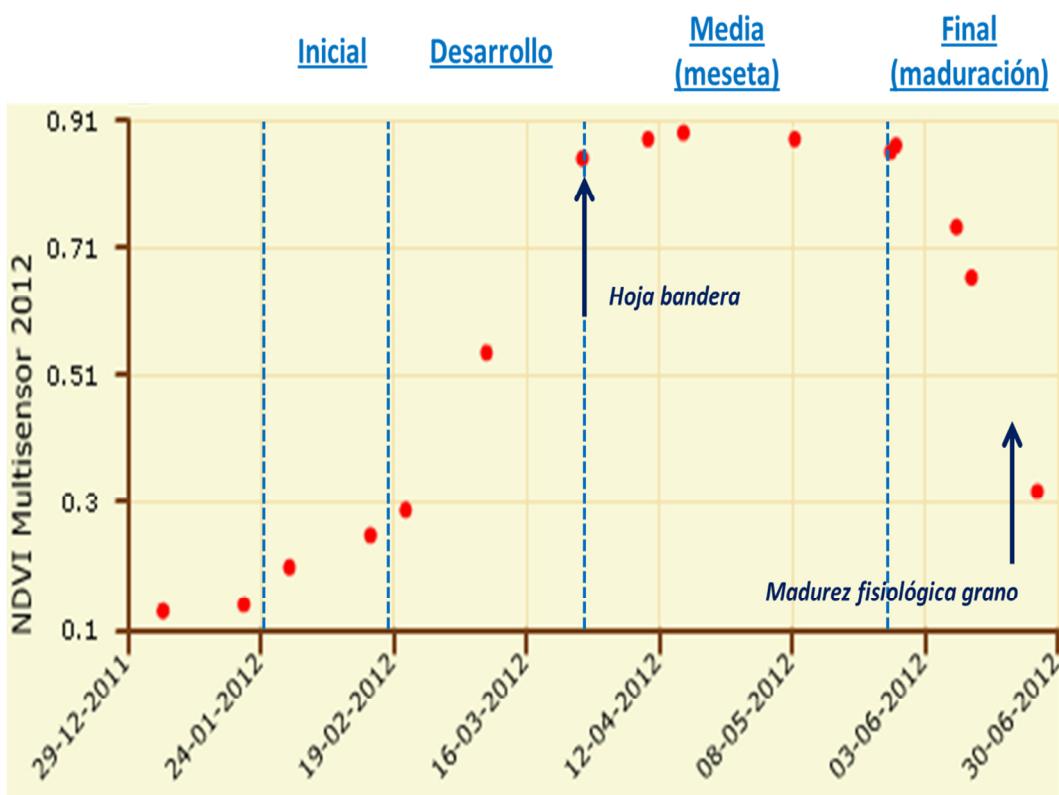


Figura 27. Evolución de una cubierta de trigo de regadío para el año 2012, descrita mediante el índice de vegetación obtenido desde una serie temporal de imágenes DEIMOS1. En la figura se muestran superpuestas las fases del ciclo de crecimiento separadas por líneas discontinuas y también algunas fases fenológicas relevantes.

Relación entre el coeficiente de cultivo único Kc y el índice de vegetación NDVI

En cultivos herbáceos se utiliza ampliamente el coeficiente de cultivo único Kc. Desde las imágenes multiespectrales se obtiene directamente el coeficiente de cultivo basal, por lo que para obtener el coeficiente de cultivo único Kc se ha de promediar la componente evaporativa de la fracción de suelo desnudo. Esta componente evaporativa es altamente dependiente de la superficie efectivamente mojada, esto es del sistema de riego y de la frecuencia, además del sombreado efectivo que la cubierta establezca sobre este suelo y de las propias características del suelo.

La ecuación (6) que se propone para la relación entre el coeficiente de cultivo Kc y el NDVI ha sido ampliamente validada en cultivos herbáceos como trigo, cebada, maíz, algodón, girasol,... que en su fase de máximo desarrollo alcanzan cobertura completa (Allen, 2011; Cuesta et al., 2005), suponiendo un manejo estándar para sistemas de riego como aspersión y pivot.

$$6) K_c = 1.25 \text{ NDVI} + 0.1$$

Para el establecimiento del cultivo después de siembra, en su fase inicial de nascencia, la relación (6) puede infraestimar el valor requerido del K_c , pues en estos casos el comportamiento evaporativo del suelo desnudo es muy dominante. En esta fase suelen ser necesarios riegos frecuentes para garantizar la nascencia e implantación, tal y como se describe en FAO-56.

Ocurre de forma semejante para cultivos que en su fase de máximo desarrollo no alcanzan cubierta completa y el porcentaje de suelo desnudo es elevado, como puede suceder en los casos de ajos, cebollas, y otros hortícolas, que además suelen requerir riegos frecuentes y cortos dado que tienen sistemas radiculares de escasa profundidad y requieren mantener elevados contenidos de agua en el suelo explorado por las raíces, pues son muy sensibles a la escasez de agua. Además, es necesario diferenciar si el sistema de riego moja o no completamente el suelo.

En general, cuando la fracción de suelo desnudo es importante suele ser preferible utilizar la formulación coeficiente dual y modelar así de forma independiente la evaporación del suelo desnudo de la componente de transpiración, lo que además permite tener en cuenta el sistema de riego y por tanto la superficie efectivamente mojada. La simulación de la evaporación desde el suelo desnudo es uno de los aspectos que más ha requerido desarrollo desde la publicación de FAO-56 (Allen, 2011; Torres and Calera, 2010). En muchos casos suele ser adecuado determinar la transpiración máxima de la cubierta mediante imágenes y aproximarse al análisis de la componente evaporativa del suelo específicamente y ganar experiencia suficiente para el uso de aproximaciones que pueden ser de carácter local.

Aproximación operativa a las necesidades de agua de riego en cultivos herbáceos

En una primera aproximación, sin tener en cuenta el agua almacenada en suelo y el posible ascenso desde capas freáticas, las necesidades de riego pueden calcularse simplemente como aquellas que reponen el agua extraída por la cubierta menos la aportada por precipitación, con un balance simplificado como el expresado por la ecuación (7).

$$7) \quad I_r = ET - P_p$$

donde:

I_r: necesidades netas de riego, cantidad de agua suministrada por riego que alcanza el suelo y se infiltra en él

ET: evapotranspiración de la cubierta

P_p: precipitación efectiva, parte de la precipitación que alcanza el suelo y se infiltra en él

En muchos casos la gestión del riego se establece en el intervalo temporal de una semana, que sería el adecuado para utilizar la ecuación (7). La precipitación debiera ser medida in situ, pues su variabilidad espacial puede ser elevada.

En un primer paso la ET sería aquella que corresponde a una cubierta en ausencia de estrés, que se calcularía combinando las ecuaciones (1) y (5), en la forma

$$8) \quad ET = (1.25 \text{ NDVI} + 0.1) \text{ ET}_0$$

La ecuación (8) está afectada por las mismas limitaciones de manejo que la ecuación (6), y proporciona las necesidades netas de agua, que minoradas por la precipitación efectiva, estiman las necesidades netas de agua de riego. La determinación de las necesidades brutas de riego requiere del conocimiento de la denominada eficiencia del sistema de riego, que recoge las características del sistema de riego utilizado y su manejo.

En muchos casos y, fundamentalmente cuando el agua es escasa y/o su coste es muy alto, obtener un óptimo de producción puede requerir que el agua de riego ha de ser aplicada una vez que se ha desarrollado un grado de estrés entre suave y moderado en las fases de crecimiento adecuadas, de tal forma que no supongan una merma apreciable en la producción, siguiendo las técnicas de riego deficitario controlado. También es frecuente si se tiene disponibilidad el aplicar un riego de apoyo que puede incrementar o asegurar la producción esperable.

5. APLICACIÓN A LA VIÑA Y CULTIVOS LEÑOSOS

Los cultivos leñosos se diferencian de los cultivos herbáceos fundamentalmente en que sus sistemas radiculares son capaces de explorar volúmenes de suelo mayores que en el caso de cultivos anuales, siendo en muchos casos la fracción de suelo desnudo mucho mayor. El papel del almacenamiento del agua en suelo es pues muy relevante, siendo capaz de utilizar el agua recogida en estaciones anteriores a la de crecimiento.



Figura 28. Evolución de la cubierta vegetal en dos puntos de una viña representativa de la zona Mancha, descrita mediante el índice de vegetación obtenido desde una secuencia de imágenes de satélite SENTINEL.

La viña es un cultivo leñoso en el que el riego se ha incorporado recientemente permitiendo asegurar la producción y, también, incrementarla sustancialmente. A diferencia de otros cultivos anuales y leñosos, en el caso de la viña es bien conocido el incremento de la calidad del fruto cuando la planta transpira en ciertas fases del ciclo de crecimiento a un ritmo menor del máximo que la cubierta vegetal puede transpirar, esto es cuando se induce en la planta un cierto grado de estrés hídrico (Van Leeuwen et al., 2009). Por ello la descripción que sigue se centra en el caso de la viña, aunque las relaciones y conceptos se pueden extender y utilizar en otros cultivos leñosos.

La Figura 28 muestra la evolución del NDVI para dos puntos de una parcela de viña de tempranillo en espaldera en regadío. En ella se muestra el patrón temporal típico de la evolución de la viña en la zona de La Mancha, así como son evidentes las diferencias espaciales de vigor en una misma parcela.

Necesidades de agua de la viña y necesidades de riego

La transpiración máxima de la cubierta actual de la viña bajo unas determinadas condiciones de demanda atmosférica puede ser calculada directamente desde el coeficiente de cultivo basal y la ETo. Este valor permite aproximarnos de forma sencilla y directa al valor de las necesidades netas de agua de riego, respondiendo a la pregunta de cuánto regar.

Para ello, es preciso determinar en primer lugar bajo qué restricciones se desea aplicar el agua de riego, a lo que se suele denominar riego deficitario controlado, teniendo en cuenta que en el caso de la viña es deseable un determinado grado de estrés hídrico una vez la baya ha alcanzado un tamaño umbral para obtener el grado óptimo de calidad del fruto. Cifras del 60-70% de restricción son mencionadas frecuentemente en la literatura.

Como ejemplo, se presenta la estimación de las necesidades netas de riego en ausencia de precipitación para las viñas cuya evolución se indica en la Figura 28. Como se puede observar en dicha figura, a partir de la floración, la arquitectura de las viñas se mantiene constante con un valor de NDVI de, aproximadamente, 0,4 y 0,32, respectivamente, lo que aplicando la ecuación (4) conduce a valores de coeficiente de cultivo basal dados por $Kcb1 = 0,4 \times 1,44 - 0,1 = 0,48$ y $Kcb2 = 0,32 \times 1,44 - 0,1 = 0,36$, respectivamente.

Para este ejemplo asumimos un valor de ETo promedio de 6,5 mm/día (se podría consultar el valor en la página web del SIAR de la estación más cercana a la ubicación de la parcela), valor típico de los meses de julio y agosto de amplias zonas del centro de la Península Ibérica; así la transpiración máxima de estas cubiertas en ausencia de estrés hídrico sería $0,48 \times 6,5 = 3,12$ mm/día, y $0,36 \times 6,5 = 2,34$ mm/día. En un caso específico el valor de ETo sería el proporcionado por la estación meteorológica cercana a la localización de la viña concreta, siendo el período razonable de manejo el de la semana.

Si asumimos un riego deficitario del 70%, las necesidades netas de riego serán $0,7 \times 3,12 = 2,2$ mm/día, y $0,7 \times 2,34 = 1,64$ mm/día, respectivamente. Estas necesidades netas de agua de riego se refieren a cantidades de agua puestas en suelo donde pueden ser tomadas por las

raíces. Para calcular las necesidades brutas es necesario tener en cuenta la eficiencia y uniformidad del sistema de riego, incluyendo la evaporación desde la superficie del suelo, lo que a su vez depende de la superficie de la zona mojada y frecuencia de riego. Para un sistema de goteo usual y un riego semanal, el componente evaporativo Ke puede estimarse alrededor de 0,05. El coeficiente de cultivo para las dos viñas consideradas para el período en que la arquitectura de la cubierta está bien establecida sería de acuerdo con la ecuación (2): $Kc1 = Kcb1 + Ke = 0,48 + 0,05 = 0,53$ y $Kc2 = Kcb2 + Ke = 0,32 + 0,05 = 0,37$. Así pues, las necesidades brutas de riego, considerando una alta uniformidad del sistema de riego serían 2,53 mm/día y 1,94 mm/día, respectivamente. En caso de ocurrir precipitación, las necesidades de agua de riego han de minorarse en la precipitación efectiva.

Obtener un óptimo de producción y calidad requiere en el caso de la viña que el agua de riego ha de ser aplicada una vez que se ha desarrollado un grado de estrés entre suave y moderado en las fases de crecimiento adecuadas, de tal manera que se eviten crecimientos de hojas jóvenes y manteniendo elevada la actividad fotosintética de las hojas maduras; habitualmente este grado de estrés es deseable una vez que el tamaño de la baya alcanza un umbral crítico pues un estrés temprano puede reducir el número y tamaño de las bayas. Un exceso de agua a lo largo del ciclo de crecimiento lleva a un crecimiento vegetativo excesivo, y a un empobrecimiento de la calidad del fruto. Un estrés demasiado severo puede primero reducir la actividad fotosintética de las hojas maduras por cierre estomático, y posteriormente provocar defoliación, lo que se traducirá en una disminución de la producción y también de la calidad.

Pero determinar cuándo es preciso aplicar agua porque la planta llega al grado de estrés deseado depende del vigor y desarrollo del propio cultivo, de la cantidad de agua almacenada en el estrato de suelo utilizable por la planta, de las condiciones meteorológicas, esto es de la precipitación y demanda atmosférica, de las condiciones climáticas a las que la cubierta se ha aclimatado semiárido, influencias marítimas,..., de las variedades en cuestión y de los propios objetivos de manejo. Multitud de procedimientos se viene utilizando para determinar el grado de estrés óptimo.

La ecuación (3) integra gran parte de los factores mencionados anteriormente a través de los parámetros utilizados en dicha ecuación. El papel relevante del suelo lo considera a través del parámetro coeficiente de estrés, Ks , que requiere de la aplicación de un balance de agua a la capa de suelo explorada por las raíces. Cuando el contenido de agua utilizable en el estrato de suelo explorado por las raíces cae por debajo de un cierto valor umbral, para la viña típicamente el 55% del valor total, ver FAO-56 para otros cultivos, el coeficiente de estrés es menor que la unidad, indicando que el ritmo de ET disminuye.

El balance de agua en suelo, que incorpora como una entrada más la precipitación registrada, permite determinar el coeficiente de estrés y el coeficiente de evaporación desde el suelo desnudo, el cual a su vez considera el sistema de riego utilizado y la frecuencia de aplicación. Este balance requiere del conocimiento de la cantidad máxima de agua que puede almacenar la capa de suelo donde se alojan las raíces, que a su vez depende de la profundidad

de raíces y de la capacidad de retención de agua del suelo. Finalmente, se determina la necesidad de agua de riego a aplicar para mantener un coeficiente de estrés adecuado.

El modelo presentado ha sido validado frente a datos medidos durante sucesivas campañas de campo en viñedos en La Mancha (Campos et al., 2010a; Campos et al., 2010c) y del sur de Italia (Consoli and Barbagallo, 2012). La Figura 29.a muestra la comparación de los valores simulados de evapotranspiración frente a valores medidos por una estación de covarianza de torbellinos en un cultivo de viñedo en regadío manejado mediante sistema de espaldera vertical y con una densidad de plantación de 2.200 plantas/ha. En la Figura 29.b se presentan los datos experimentales obtenidos en un viñedo en régimen de secano, manejado mediante el sistema tradicional de viña en vaso y con una densidad de plantación de 1100 plantas/ha. El acuerdo general obtenido indica que el modelo permite reproducir la evapotranspiración del viñedo con una precisión superior a 0,5 mm/día.

Las necesidades de agua netas, evapotranspiración, del viñedo en regadío en La Mancha en la campaña de 2007 se estimaron en 350 mm desde el 1 de mayo hasta el 30 de septiembre de 2007; en ese período la precipitación registrada fue de 45 mm y el riego aplicado fue de 143 mm. Esto significa que 162 mm (un 46%) fueron extraídos del almacenamiento en el suelo. El viñedo en vaso consumió un total de 265 mm de mayo a octubre de 2009, y la precipitación registrada en ese período fue de 68 mm. Por tanto, alrededor de 197 mm se extrajeron desde el almacenamiento en suelo. Estos datos indican el relevante papel del almacenamiento de agua en suelo y la capacidad de extracción de la viña.

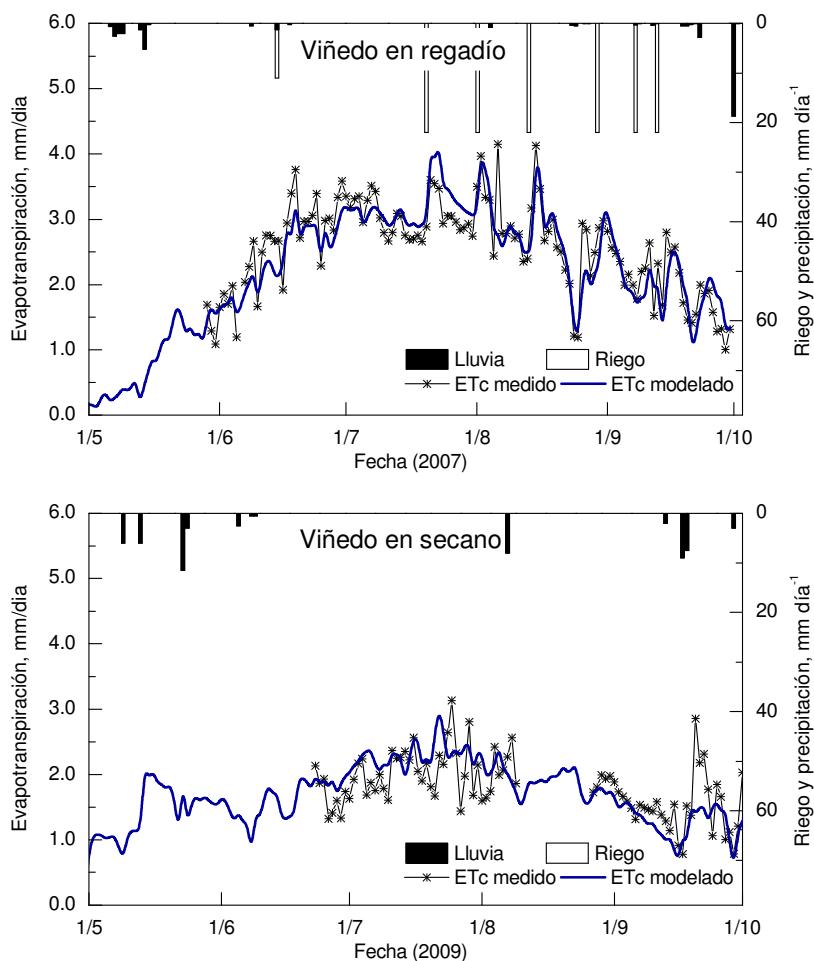


Figura 29. Comparación de los valores medidos y modelados de evapotranspiración para un cultivo de viñedo en regadío (año 2007), caso a, y viñedo en secano (año 2009), caso b. Adaptado de (Campos et al., 2010c) y (Campos et al., 2010a).

La dificultad en disponer de datos precisos sobre el papel del almacenamiento en suelo es por lo que los mejores métodos de determinación del estado hídrico de la viña miden directamente sobre la planta, pues es la planta y su ritmo de transpiración el mejor indicador acerca del sistema planta-suelo-atmósfera. Ampliamente reconocidos entre estos métodos están es el potencial hídrico en tallo (Van Leeuwen et al., 2009), dendrómetros, etc. Estos sistemas tienen la limitación de su representatividad, pues suelen ser datos puntuales. El acoplamiento de la metodología basada en imágenes multiespectrales con las características conocidas de la parcela y con los datos puntuales procedentes de sensores en tierra puede ser un camino práctico que conduce a buenos resultados. Las imágenes recogen el vigor de la vegetación de la cubierta de la viña y su distribución espacial como ningún otro procedimiento puede hacer (Martínez-Casasnovas et al., 2012). Y dado que la viña es un cultivo multianual puede darse una acumulación de conocimiento de gran interés práctico para el mejor manejo.

Variabilidad de la cubierta de la viña y de las necesidades de agua

La dificultad de cuantificar la variabilidad de la cubierta vegetal de la viña lleva en muchas ocasiones a tratar la viña de forma simplificada. Por ejemplo, asignando un único valor de las necesidades de agua de riego dentro de una misma parcela o bien a todas las parcelas de viña.

Las imágenes de índices de vegetación recogen el vigor de la vegetación, su evolución temporal y su distribución espacial, permitiendo cuantificar las diferencias dentro de una parcela o con otras parcelas. La Figura 30 muestra la evolución temporal en promedio del coeficiente de cultivo basal para la viña de regadío en el área de La Mancha Oriental, cerca de unas 21.000 ha, previamente identificada. En dicha Figura 30, puede apreciarse la dispersión de valores de K_{cb} , indicada por los histogramas representados que permiten cuantificar la variabilidad en el valor de este parámetro en el ámbito espacial estudiado.

Como se puede observar, en promedio la viña alcanza su máximo desarrollo en los meses de julio y agosto, con valores promedio de K_{cb} cercanos a 0,4 durante estos meses. Los valores mínimos, cercanos a 0,15, se obtienen durante el periodo de latencia y corresponden a suelo desnudo.

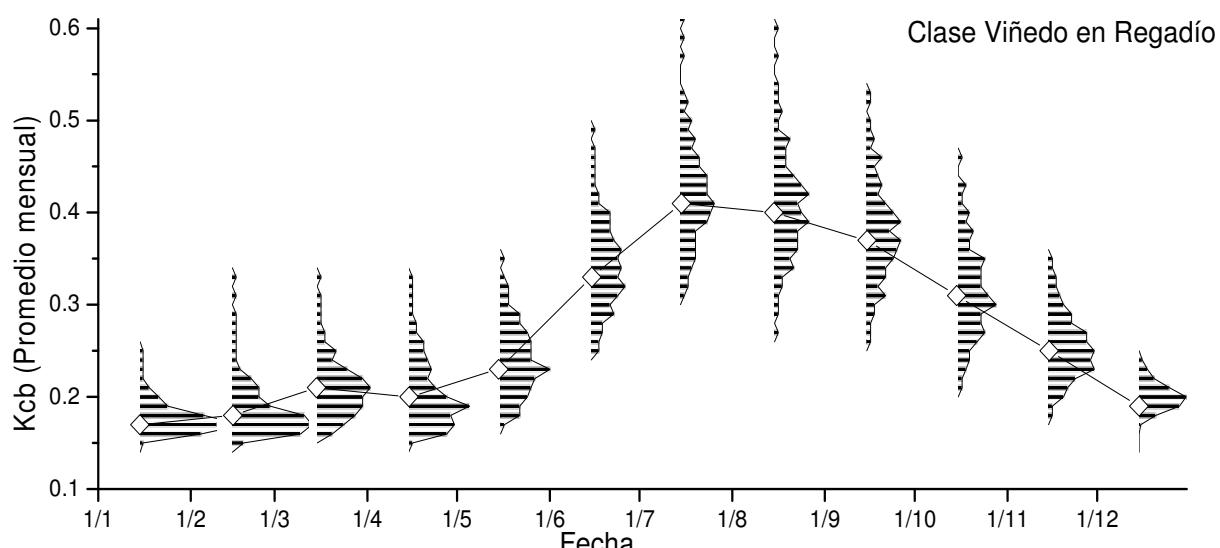


Figura 30. Evolución mensual del coeficiente K_{cb} promedio (\diamond) y diagramas mensuales de frecuencias de los valores obtenidos en toda la superficie estudiada durante el año 2009.

Se han calculado las necesidades de agua de riego, al objeto de estudiar su variación atendiendo solamente a la variabilidad indicada en el K_{cb} , teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas del año 2009 y considerando en primera aproximación el mismo suelo para todas las parcelas.

Las necesidades de riego estimadas oscilan entre 75 y 200 mm/año para la campaña con un valor promedio de 110 mm/año. Estos resultados están sujetos a las condiciones iniciales de simulación, en las que se ha supuesto que la viña brota en abril con el almacenamiento del

suelo lleno, estimado en 225 mm, y que se empieza a regar, aproximadamente en la primera quincena de julio, una vez que alcanza un estrés de 0,7 y se mantiene así hasta cosecha. El 2009 responde a un año típico del clima Mediterráneo continental de La Mancha: las lluvias de otoño y primavera suelen llenar el almacenamiento en suelo disponible para las plantas al final de la primavera, y el verano es seco y caluroso, a pesar de la escasez de precipitaciones, que se sitúan entre 350-400 mm/año en promedio. La variabilidad meteorológica condiciona estas cifras de necesidades de riego, incrementándolas si se produce sequía del otoño a la primavera, y disminuyéndolas si se produce un incremento de precipitaciones en verano. En el caso de la viña en secano es este almacenamiento en suelo el responsable de que la viña pueda completar su ciclo de crecimiento, por lo que parece ser el factor determinante para que este cultivo se haya desarrollado en esta área semiárida en ausencia de regadío.

6. BALANCE DE AGUA EN EL SUELO Y DEFINICIÓN DEL COEFICIENTE DE ESTRÉS HÍDRICO

La Figura A1 muestra las componentes del balance de agua en la capa de suelo explorado por las raíces. La ecuación A.I.1 muestra el balance simplificado, pues no se considera ni ascenso capilar ni escorrentía superficial; en ella, el agotamiento de agua en la zona radicular ($D_{r,i}$) depende del agotamiento de agua en el suelo en el día anterior ($D_{r,i-1}$), de la ET, del riego aplicado (Ir), de la precipitación (Pp) y de la percolación a capas más profundas (Dp). Según esta aproximación el valor de $D_{r,i}$ nunca negativo, puesto que el suelo drenará agua a capas más profundas cuando las entradas de agua, riego y precipitación, superan la capacidad de almacenamiento dada por la capacidad de campo y el volumen de suelo explorado por las raíces. El valor de $D_{r,i}$ es 0 cuando todo el perfil de suelo explorado por las raíces se encuentra a capacidad de campo.

$$A.I.1 \quad D_{r,i} = D_{r,i-1} + ET + Dp - Ir - Pp$$

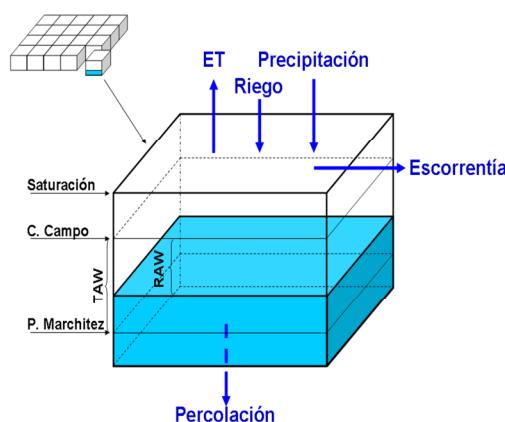


Figura A.1.- Componentes principales del balance de agua en el estrato de suelo explorado por las raíces

La formulación del coeficiente de estrés hídrico es la propuesta en el manual FAO56 tal y como se muestra en la ecuación A.I.2. Según esta formulación el estrés hídrico en el cultivo ocurre a partir de que el valor de $D_{r,i}$ supera un cierto umbral que se conoce como el agua fácilmente utilizable, RAW. El valor de RAW, esto es el valor de $D_{r,i}$ a partir del cual el cultivo sufre condiciones de estrés, es dependiente del cultivo. Los valores más usuales están tabulados en FAO56 como una fracción de los valores de TAW, que es el agua total almacenable en el estrato de suelo explorado por las raíces.

$$\text{A.I.2. } K_s = 1 \quad , \text{ Si } D_{r,i} < \text{RAW}$$

$$K_s = (TAW - D_{r,i}) / (TAW - \text{RAW}) \quad , \text{ Si } D_{r,i} \geq \text{RAW}$$

**ANEXO II. ESTACIONES
METEOROLÓGICAS EMPLEADAS EN EL
PROYECTO ESPACIO SiAR 2018**

A continuación, se especifican las estaciones agroclimatológicas que se han empleado para obtener las variables de precipitación y evapotranspiración de referencia (ETo) del SIAR del MAPA, de RuralCat y de la red SIAR de La Rioja.

Tabla 23. Estaciones empleadas en la Demarcación Hidrográfica Cuencas Mediterráneas de Andalucía.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Adra	5	500683	4066780	Almería
Almería	8	553282	4076780	Almería
Cuevas de Almanzora	32	606367	4124030	Almería
Fiñana	958	514311	4112270	Almería
Huércal-Overa	303	598735	4141210	Almería
La Mojonera	140	526376	4071320	Almería
Tabernas	507	561998	4105230	Almería
Tíjola	778	547839	4137000	Almería
Jimena de la Frontera	56	286263	4032470	Cádiz
Cádiar	928	483613	4086360	Granada
Padul	752	446599	4097120	Granada
Zafarraya	893	397321	4094420	Granada
Cártama	79	350119	4064780	Málaga
Estepona	191	301937	4035540	Málaga
IFAPA Centro de Campanillas	60	360629	4065960	Málaga
IFAPA Churriana	19	365680	4059740	Málaga
Málaga	58	362741	4068970	Málaga
Pizarra	74	346918	4070360	Málaga
Vélez-Málaga	35	399039	4072850	Málaga

Tabla 24. Estaciones empleadas en la Demarcación Hidrográfica de las Islas Baleares

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Santa Eulalia	120	884487	4327280	Baleares
Inca	78	1009420	4409550	Baleares
Manacor	79	1030470	4395600	Baleares
Son Ferriol	8	992040	4394870	Baleares
Felanitx	82	1023670	4387260	Baleares
Sa Pobla	4	1017420	4423370	Baleares
Es Mercadal	40	1106140	4452380	Baleares
Artá	105	1045510	4413540	Baleares
Calviá	30	969620	4392240	Baleares
S' Estany des Peix	7	882360	4295680	Baleares

Tabla 25. Estaciones empleadas en la Demarcación Hidrográfica de las Islas Canarias

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Gáldar	7	-749129	3180320	Las Palmas
San Nicolás de Tolentino	55	-763154	3162680	Las Palmas
Santa Lucía - Vecindario	49	-729408	3142650	Las Palmas
Vega de San Mateo	762	-737581	3163610	Las Palmas
Arucas	220	-734400	3175760	Las Palmas
Haría	66	-522413	3264900	Las Palmas
Tinajo	254	-540927	3260900	Las Palmas
Antigua - Pozo Negro	68	-576210	3183210	Las Palmas
La Torrecilla	287	-521196	3273774	Las Palmas
Masdache	322	-540092	3255598	Las Palmas
La Degollada	244	-553139	3249329	Las Palmas
Barranquillo Frío	745	-744425	3172930	Las Palmas
Guía de Isora	89	-864627	3201440	Santa Cruz de Tenerife
Güímar	119	-818582	3206320	Santa Cruz de Tenerife
La Fuente - Buenavista del Norte	77	-865464	3217710	Santa Cruz de Tenerife
San Sebastián de la Gomera	47	-895263	3190670	Santa Cruz de Tenerife
Hermigua	146	-901714	3198770	Santa Cruz de Tenerife
Puerto de la Cruz	113	-832472	3218490	Santa Cruz de Tenerife

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Frontera	34	-988811	3164920	Santa Cruz de Tenerife
Los Llanos de Aridane	280	-967347	3262448	Santa Cruz de Tenerife
Los Llanos de Aridane II	383	-966726	3263790	Santa Cruz de Tenerife
Fuencaliente	73	-964006	3243120	Santa Cruz de Tenerife
Valle Guerra-Isamar	293	-816561	3228260	Santa Cruz de Tenerife
Valle Guerra-Pajarillos	110	-816381	3230020	Santa Cruz de Tenerife
El Socorro	177	-952327	3261040	Santa Cruz de Tenerife
El Pico	256	-814647	3229450	Santa Cruz de Tenerife
Garimba	493	-816791	3227540	Santa Cruz de Tenerife
Barlovento	110	-950524	3280510	Santa Cruz de Tenerife
Puntallana - Vivero	306	-947341	3270534	Santa Cruz de Tenerife
Tazacorte	70	-967281	3255890	Santa Cruz de Tenerife
Las Galletas	68	-851862	3178285	Santa Cruz de Tenerife

Tabla 26. Estaciones empleadas en la Demarcación Hidrográfica del Duero.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Losar del Barco	1028	285381	4472220	Avila
Muñogalindo	1131	336237	4493640	Avila
Nava de Arévalo	863	350145	4538230	Avila
Valle de Valdelucio	971	407277	4733270	Burgos
Lerma	823	436441	4654470	Burgos
Tardajos	824	433887	4688520	Burgos
Vadocondes	813	451952	4609650	Burgos
Quintana del Marco	749	265661	4677910	León
Mansilla mayor	791	300123	4708890	León
Zotes del Páramo	779	274230	4682010	León

Hospital de Orbigo	819	261828	4704910	León
Bustillo del Páramo	853	272071	4705080	León
Sahagún	837	333434	4693310	León
Santas Martas	876	314117	4701220	León
Cubillas de los Oteros	768	293277,99	4696998,6	León
Torquemada	741	392330	4656290	Palencia
Villaeles de Valdavia	885	369885	4713480	Palencia
Lantadilla	792	394739	4688970	Palencia
Villaluenga de la Vega	917	354225	4709940	Palencia
Herrera de Pisuerga	808	397065	4704900	Palencia
Villoldo	801	368709	4681140	Palencia
Villamuriel de Cerrato	736	376702	4644880	Palencia
Fuentes de Nava	741	357805	4660220	Palencia
Aldearrubia	797	291144	4540570	Salamanca
Arabayona	851	301287	4545470	Salamanca
Ejeme	813	286463	4517880	Salamanca
Ciudad Rodrigo	616	200526	4499280	Salamanca
Gomezserracín	813	391315	4573030	Segovia
Nava de la Asunción	802	376146	4558880	Segovia
Fuentecantos	1019	547013	4631260	Soria
Almazán	950	541685	4590000	Soria
Hinojosa del Campo	1038	575261	4620820	Soria
San Esteban de Gormaz	854	481714	4601560	Soria
Encinas de Esgueva	800	408359	4624500	Valladolid
Medina de Rioseco	731	328134	4636390	Valladolid
Rueda	752	334262	4585520	Valladolid
Medina del Campo	727	341205	4575270	Valladolid
Finca Zamadueñas	714	358739	4619050	Valladolid
Tordesillas	671	333146	4594720	Valladolid
Villalón de Campos	770	336578	4665760	Valladolid
Olmedo	743	358841	4574600	Valladolid
Torrecilla de la Orden	774	314411	4566400	Valladolid
Mayorga	746	310946	4669050	Valladolid
Valbuena de Duero	743	394425	4610960	Valladolid
Pozuelo de Tábara	701	259386	4629610	Zamora
Colinas de Trasmonte	707	267219	4653680	Zamora
Villalpando	687	301623	4638980	Zamora
Toro	649	302537	4597880	Zamora
Barcial del Barco	699	278887	4645820	Zamora
Villaralbo	657	279160	4595660	Zamora

Tabla 27. Estaciones empleadas en la Demarcación Hidrográfica del Ebro.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Condado de Treviño	562	517719	4732000	Burgos
Santa Gadea del Cid	525	493844	4727710	Burgos
Valle de Losa	635	480749	4757130	Burgos
Alcolea de Cinca	225	755554	4625580	Huesca
Alfántega	249	761432	4634800	Huesca
Banastón	560	760884	4697990	Huesca
Barbastro	409	757738	4655960	Huesca
Candasnos	307	758445	4594440	Huesca
Fraga	98	779969	4599160	Huesca
Grañén	323	719175	4646770	Huesca
Gurrea de Gállego	364	687923	4651470	Huesca
Huerto	415	737282	4647970	Huesca
Huesca	432	716821	4664810	Huesca
Lanaja	361	721218	4629490	Huesca
Monte Julia	274	768745	4626240	Huesca
San Esteban de Litera	316	774164	4642060	Huesca
Sariñena	291	734668	4628250	Huesca
Selgua	310	759185	4647810	Huesca
Sodeto	318	727565	4640530	Huesca
Tamarite de Litera	218	780662	4630970	Huesca
Tardienta	366	706522	4649380	Huesca
Valfarta	359	737942	4601690	Huesca
Zaidín	182	773947	4614720	Huesca
Agoncillo	342	558225	4701795	La Rioja
Albelda de Iregua	487	543371	4691977	La Rioja
Aldeanueva de Ebro	365	590273	4674863	La Rioja
Alfaro	315	600880	4667180	La Rioja
Arenzana de Abajo	523	522557	4693182	La Rioja
Ausejo		569654	4687765	La Rioja
Calahorra	328	582125	4687227	La Rioja
Casalarreina	510	508359	4709480	La Rioja
Cervera - Cabretón	495	591713	4651141	La Rioja
Foncea	669	496868	4717207	La Rioja
Igea	564	583260	4656678	La Rioja

Nombre de la Estación SiAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Leiva	595	495872	4704901	La Rioja
Logroño	465	539894	4698503	La Rioja
Pazuengos	1299	506993	4687608	La Rioja
Quel (Antes Autol)	430	579423	4678259	La Rioja
Rincón de Soto	277	594688	4678140	La Rioja
San Vicente de la Sonsierra	543	521845	4712548	La Rioja
Santa Engracia	570	560581	4690798	La Rioja
Santo Domingo de la Calzada	640	504745	4697860	La Rioja
Torremontalbo-Uruñuela	465	523509	4700894	La Rioja
Villar de Torre	727	511453	4691834	La Rioja
01 Arazuri	396	604373	4740490	Navarra
02 Adiós	443	602626	4726760	Navarra
03 Lumbier	484	641305	4725090	Navarra
04 Ancín	469	567870	4722910	Navarra
05 Artajona	360	599223	4715280	Navarra
06 Aibar	420	638209	4713140	Navarra
07 San Martín de Unx	446	614036	4707660	Navarra
08 Miranda de Arga	345	597865	4707230	Navarra
09 Lerín	354	584109	4706200	Navarra
10 Bargota	382	557601	4703050	Navarra
11 Olite	375	611150	4699250	Navarra
12 Falces	292	599348	4697420	Navarra
13 Murillo el Fruto	348	624531	4693630	Navarra
14 Traibuenas	312	614023	4690840	Navarra
15 Sartaguda	307	578128	4690400	Navarra
17 Bardenas Reales (El Plano)	437	622106	4683610	Navarra
18 Funes	391	598382	4682430	Navarra
19 Bardenas Reales (Barranco)	298	610873	4680000	Navarra
20 Cadreita	267	605802	4673640	Navarra
21 Corella	392	595908	4663260	Navarra
23 Fitero	436	595781	4655540	Navarra
24 Cascante	346	605623	4654380	Navarra
25 Ablitas	338	612249	4650270	Navarra
26 Los Arcos	421	566963	4709980	Navarra
27 Sesma	456	571792	4702710	Navarra

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Calanda	439	734842	4538190	Teruel
Híjar	306	707114	4565610	Teruel
Monreal del Campo	950	638782	4515730	Teruel
Puig Moreno	322	731894	4553190	Teruel
Villarquemado	990	644881	4487500	Teruel
Almonacid de la Sierra	384	639491	4590290	Zaragoza
Belchite	327	690604	4580150	Zaragoza
Boquiñeni	227	645315	4633850	Zaragoza
Borja	378	623871	4634770	Zaragoza
Caspe	175	745204	4576640	Zaragoza
Daroca	748	632270	4551950	Zaragoza
Ejea de los Caballeros	316	649166	4662200	Zaragoza
El Bayo	386	644635	4670770	Zaragoza
Épila	330	643204	4604930	Zaragoza
Fabara	253	764603	4562190	Zaragoza
Luna	409	670687	4662470	Zaragoza
Montañana	217	681037	4620270	Zaragoza
Osera de Ebro	251	705486	4602200	Zaragoza
Quinto	240	707465	4584840	Zaragoza
Sádaba	433	639427	4680840	Zaragoza
Santa Engracia (Tauste)	237	640172	4640690	Zaragoza
TARAZONA	522	604000	4641230	Zaragoza
Tauste	353	653808	4651470	Zaragoza

Tabla 28. Estaciones empleadas en la Demarcación Hidrográfica de Galicia-Costa.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
A Capela	374	90970,6	4822990	A Coruña
Boimorto	429	81094,2	4777420	A Coruña

Tabla 29. Estaciones empleadas en la Demarcación Hidrográfica de Guadalete y Barbate.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Basurta-Jerez de la Frontera	42	230650	4072170	Cádiz

Conil de la Frontera	24	218803	4025430	Cádiz
IFAPA Centro de Chipiona	7	196448	4072630	Cádiz
Jerez de la Frontera	19	230594	4059470	Cádiz
Vejer de la Frontera	14	244927	4019310	Cádiz
Villamartín	149	266049	4080680	Cádiz

Tabla 30. Estaciones empleadas en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Adamuz	145	373099	4206530	Córdoba
Baena	319	384851	4172400	Córdoba
Bélmez	504	306667	4236350	Córdoba
Córdoba	93	341399	4191480	Córdoba
El Carpio	170	367791	4197330	Córdoba
Hornachuelos	134	309617	4176930	Córdoba
IFAPA Centro de Cabra	547	373516	4151100	Córdoba
Santaella	199	333382	4154500	Córdoba
Baza	718	520514	4157520	Granada
Huéjana	1110	503240	4118727	Granada
IFAPA Centro Camino del Purchil	630	443311	4114150	Granada
Iznalloz	925	451202	4141210	Granada
Jerez del Marquesado	1200	486699	4116020	Granada
Loja	466	398957	4114260	Granada
Puebla de Don Fadrique	1017	554375	4192250	Granada
Almonte	12	191221	4116990	Huelva
Almonte bajo plástico	24	186434	4110360	Huelva
Alcaudete	639	404780	4159460	Jaén
Chiclana de Segura	488	500305	4239420	Jaén
Huesa	755	494567	4177790	Jaén
IFAPA Centro Mengíbar	292	430790	4199560	Jaén
Jaén	301	432183	4193960	Jaén
Jódar	488	470605	4192400	Jaén
La Higuera de Arjona	258	411463	4200610	Jaén
Linares	435	443002	4212540	Jaén
Mancha Real	413	447571	4196710	Jaén
Pozo Alcón	882	506163	4169420	Jaén

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Sabiote	800	479346	4214660	Jaén
San José de los Propios	503	479742	4190080	Jaén
Santo Tomé	537	492726	4209060	Jaén
Torreblascopedro	274	439469	4204790	Jaén
Torreperogil	536	478573	4203000	Jaén
Ubeda	344	473599	4199520	Jaén
Villacarrillo	650	482408	4212870	Jaén
Sierra Yeguas	470	336928	4111800	Málaga
Aznalcázar	4	209287	4116730	Sevilla
Ecija	113	316625	4162680	Sevilla
Guillena	50	229175	4156370	Sevilla
IFAPA Centro Las Torres-Tomejil	14	238016	4155860	Sevilla
IFAPA Centro de Los Palacios	12	238484	4119600	Sevilla
IFAPA Centro Las Torres-Tomejil. Finca Tome	79	270958	4142490	Sevilla
Isla Mayor	5	222653	4112040	Sevilla
La Luisiana	175	303108	4155460	Sevilla
La Puebla del Río	4	221954	4124550	Sevilla
La Puebla del Río II	3	229178	4108110	Sevilla
La Rinconada	27	241295	4149570	Sevilla
Las Cabezas de San Juan	15	243351	4100490	Sevilla
Lebrija I	5	221723	4096850	Sevilla
Lora del Río	47	275891	4171230	Sevilla
Los Molares	78	262696	4117760	Sevilla
Osuna	200	310675	4125300	Sevilla
Puebla Cazalla	194	291408	4121660	Sevilla
Sanlúcar La Mayor	66	211943	4146640	Sevilla

Tabla 31. Estaciones empleadas en la Demarcación Hidrográfica del Guadiana.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Juanaco	708	529582	4346370	Albacete
Arroyo	221	198644	4306780	Badajoz
Azuaga	540	263512	4252720	Badajoz

Nombre de la Estación SiAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Bercial	188	167915	4310100	Badajoz
Fuente de Cantos	600	210378	4234130	Badajoz
Jerez de los Caballeros	266	173113	4243640	Badajoz
LA ORDEN	188	181923	4307650	Badajoz
Mérida	265	211917	4304830	Badajoz
Monterrubio de la Serena	484	292404	4274150	Badajoz
Olivenza	202	147185	4293630	Badajoz
Palazuelo	269	262837	4331710	Badajoz
Puebla de Alcocer	500	318722	4327150	Badajoz
Rueda Chica	189	176326	4313750	Badajoz
Santa Amalia	248	241514	4322470	Badajoz
Villagonzalo	252	223468	4303540	Badajoz
Zalamea de la Serena	457	265910	4284560	Badajoz
Aliseda	327	186520	4353590	Cáceres
Guadalupe	740	297766	4362370	Cáceres
Madrigalejo	293	275671	4335060	Cáceres
Alcázar de San Juan	653	482729	4340120	Ciudad Real
Argamasilla de Alba	704	495018	4325230	Ciudad Real
Bolaños	642	446145	4311320	Ciudad Real
Ciudad Real	613	414362	4321940	Ciudad Real
Daimiel	631	440016	4317940	Ciudad Real
Herencia	641	471540	4358890	Ciudad Real
Montiel	887	510308	4283170	Ciudad Real
Porzuna	614	393782	4343510	Ciudad Real
IFAPA Centro de Hinojosa del Duque	543	315518	4263000	Córdoba
El Sanchón	717	560667	4357420	Cuenca
Pedernoso	700	520738	4369320	Cuenca
Aroche	291	153376	4208510	Huelva
La Puebla de Guzmán	251	124659	4164620	Huelva
La Puebla de Almoradiel	682	488335	4384360	Toledo

Tabla 32. Estaciones empleadas en la Demarcación Hidrográfica del Júcar.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Albacete	689	595166	4311730	Albacete
Almansa	681	664097	4307740	Albacete
Caudete	585	675585	4289270	Albacete
La Gineta	696	585237	4328310	Albacete
Motilleja	681	606281	4335780	Albacete
Pozo Cañada	829	608178	4295250	Albacete
Tarazona	722	593160	4345720	Albacete
Altea	78	754320	4276840	Alicante
Callosa d'en Sarrià	163	751970	4281914	Alicante
Callosa d'en Sarrià (malla)	163	751980	4281944	Alicante
Camp de Mirra	595	693720	4283550	Alicante
Dénia Gata	85	767731	4298290	Alicante
Elx EEA	62	701609	4235864	Alicante
Monforte del Cid	259	698193	4252510	Alicante
Ondara	39	761033	4300940	Alicante
Planes	438	729927	4296220	Alicante
Vila Joiosa	81	739183	4267960	Alicante
Benicarló	18	788624	4478990	Castellón
Burriana	98	747478	4419320	Castellón
Castelló Benadresa	88	745965	4430550	Castellón
Nules	35	742155	4417970	Castellón
Ribera de Cabanes	34	768076	4447370	Castellón
San Rafael del Río	205	784970	4499150	Castellón
Segorbe	348	715427	4410510	Castellón
Vall d'Uixó	107	737127	4408770	Castellón
Vila-real EEA	67	744577	4425569	Castellón
Cañete	1037	615188	4431790	Cuenca
El Picazo	705	578157	4367640	Cuenca
Mariana	941	573120	4445040	Cuenca
Villanueva de la Jara	780	599274	4362320	Cuenca
Teruel	914	655755	4467910	Teruel
Algemesí	19	721413	4343930	Valencia
Bélgida	281	720841	4306490	Valencia
Benavites	2	738572	4401540	Valencia

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Benifaió	44	718925	4350990	Valencia
Bolbaite	267	699829	4326990	Valencia
Carlet CE Coop	64	711835	4344773	Valencia
Chesté	322	693888	4376790	Valencia
Chulilla	378	685917	4394130	Valencia
Gandia Marxuquera	108	738207	4316410	Valencia
Godelleta	270	699949	4366120	Valencia
Lliria	244	703474	4396160	Valencia
Llutxent EEA	295	728810	4313267	Valencia
Manises	71	715439	4373565	Valencia
Moncada IVIA	58	723368	4385233	Valencia
Montesa	247	704640	4314380	Valencia
Pedralba	241	696061	4382190	Valencia
Picassent	92	715588	4359990	Valencia
Requena Cerrito	748	651972	4374274	Valencia
Sagunt	9	732200	4392210	Valencia
Tavernes de Valldigna	4	738862	4330980	Valencia
Villalonga	87	742476	4308520	Valencia
Villanueva de Castellón	40	714192	4326970	Valencia

Tabla 33. Estaciones empleadas en la Demarcación hidrográfica del Miño-Sil.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Carracedelo	480	195585	4719674	León
Castro de Rei	414	134760	4788070	Lugo
Monforte de Lemos	332	130127	4715890	Lugo

Tabla 34. Estaciones empleadas en la Demarcación hidrográfica del Segura.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Ontur	659	630946	4276000	Albacete
Almoradí	62	695318	4211640	Alicante
Catral	10	692275	4225080	Alicante
Crevillente	94	694006	4234860	Alicante
Pilar de la Horadada	55	692408	4193490	Alicante

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Pinoso	608	669278	4255020	Alicante
Virgen de Fátima-Cuevas de Almanzora	176	608847	4138750	Almería
Abanilla (La Jaira)	140	670466	4226410	Murcia
Alhama (La Calavera)	168	639382	4183910	Murcia
Beniel	29	675543	4211530	Murcia
Blanca (Estación de Blanca)	280	647927	4233290	Murcia
Calasparra (Rotas)	276	614200	4234750	Murcia
Caravaca (Barranda)	867	588685	4211200	Murcia
Cehegín (El Chaparral)	431	615442	4219040	Murcia
Cehegín (La Torrecita)	511	606971	4218100	Murcia
Charco de Taray	205	661845	4225290	Murcia
Cieza (La Carrichosa)	253	631283	4239070	Murcia
Finca experimental de Aguilas (CIDA)	35	624578	4142250	Murcia
Finca experimental de Totana (CIDA)	237	631022	4177170	Murcia
Finca Taray (Torres de cotillas)	165	649023	4207950	Murcia
Finca Venta de Ulea-Moratalla	458	603922	4228300	Murcia
Forja, S.A.-Fuente Alamo	137	664814	4179530	Murcia
Fuente Alamo (Campillo bajo)	175	655351	4173880	Murcia
Jumilla (C^a del Judío)	395	637693	4250800	Murcia
Jumilla (Las Encebras)	400	653748	4251050	Murcia
Jumilla (Roman)	340	646370	4242420	Murcia
La Aljorra	92	670131	4171690	Murcia
Librilla	166	646098	4195950	Murcia
Mazarrón (Cañada Gallego)	94	644683	4159260	Murcia
Molina de Segura (Campotejar)	146	655952	4221450	Murcia
Mula (Mula)	275	634434	4211270	Murcia
Murcia (Cabezo Plata)	128	677088	4205240	Murcia
Murcia (La Alberca)	54	663918	4200810	Murcia
Puerto Lumbreras	356	615445	4151560	Murcia

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Puerto Lumbreras (El Esparragal)	318	612404	4160930	Murcia
Purias-Lorca	325	620981	4162510	Murcia
San Javier (El Mirador)	93	686091	4190860	Murcia
San Javier (Santiago de la Ribera)	6	691865	4184730	Murcia
Torre Pacheco (Los Infiernos)	90	682044	4188290	Murcia
Torre Pacheco (Torre Blanca)	32	685067	4182780	Murcia
Torre Pacheco (Torre Pacheco)	56	677368	4179730	Murcia
Turilla: La Paca	693	604002	4190450	Murcia
Yecla	658	657845	4280490	Murcia
Yecla (Pinillos)	567	664448	4269940	Murcia

Tabla 35. Estaciones empleadas en la Demarcación Hidrográfica del Tajo.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Alcantara	327	165984	4406900	Cáceres
Aldehuela del Jerte	270	224276	4433680	Cáceres
Casatejada	267	270943	4416520	Cáceres
Coria-Puebla de Argeme	240	204857	4429512	Cáceres
Gargantilla	589	249780	4458440	Cáceres
Hurdes-Azabal	480	219034	4466140	Cáceres
Jarandilla de la Vera	493	274430	4442370	Cáceres
Madroñera	625	262362	4372010	Cáceres
Mirabel	541	225349	4416430	Cáceres
Peraleda de la Mata	321	289240	4415250	Cáceres
Talayuela	271	281141	4432150	Cáceres
Valdeiñigos-Tejeda de Tíetar	234	255708	4427240	Cáceres
Barajas de Melo	690	505412	4440510	Cuenca
Villaconejos de Trabaque	795	557292	4473880	Cuenca
Armuña de Tajuña	739	498822	4486630	Guadalajara
Illana	581	501171	4450960	Guadalajara

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Jadraque	785	504494	4530680	Guadalajara
Marchamalo	693	482270	4503340	Guadalajara
Prados Redondos	1129	601354	4516820	Guadalajara
Aranjuez	487	446220	4432570	Madrid
Arganda	531	457693	4462410	Madrid
Center Finca experimental	555	457867	4473610	Madrid
Chinchón	534	460101	4449200	Madrid
Fuentidueña de Tajo	558	485039	4439740	Madrid
San Martín de la Vega	516	452366	4453800	Madrid
Villa del Prado	465	391738	4456390	Madrid
Alcolea de Tajo	366	316736	4409360	Toledo
La Rinconada	432	379873	4410060	Toledo
Los Navalmorales	717	357973	4398280	Toledo
Magan	507	419484	4420980	Toledo
Recas	590	416575	4434450	Toledo
Vegas de San Antonio	388	354803	4424260	Toledo
Villarubia de Santiago	543	471476	4431690	Toledo

Tabla 36. Estaciones empleadas en la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras.

Nombre de la Estación SIAR	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
El Campillo	387	182491	4174300	Huelva
Gibraleón	148	140652	4148360	Huelva
IFAPA Centro Las Torres-Tomejil.	63	162674	4128310	Huelva
IFAPA El Cebollar Bajo plástico	63	162775	4128400	Huelva
La Palma del Condado	171	186354	4141470	Huelva
Lepe	53	123877	4136900	Huelva
Moguer	55	163137	4117860	Huelva
Niebla	28	169098	4139930	Huelva

Tabla 37. Estaciones empleadas en la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Internas de Cataluña.

Nombre de la estación	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Barcelona - el Raval	33	4594278	932159	Barcelona
Barcelona-Observatori Fabra	411,2	4597895	928262	Barcelona
Cabrils	81	4610212	948739	Barcelona
Caldes de Montbui	176	4619690	930687	Barcelona
Canaletes	325	4603264	891865	Barcelona
Castellbisbal	147	4603889	915465	Barcelona
Castellnou de Bages	507	4642375	902530	Barcelona
Dosrius	460	4621921	953723	Barcelona
el Pont de Vilomara	210	4628662	905457	Barcelona
El Prat de Llobregat	8	4589018	925120	Barcelona
Els Hostalets de Pierola	316	4608891	901165	Barcelona
Font-rubí	415	4597146	886371	Barcelona
Guardiola de Berguedà	788	4687291	902288	Barcelona
Gurb	509	4657734	933749	Barcelona
La Granada	240	4590209	895529	Barcelona
la Panadella	785	4615013	866758	Barcelona
La Quar	873	4670624	910510	Barcelona
Malgrat de Mar	2	4626626	979466	Barcelona
Muntanyola	816	4649229	929771	Barcelona
Òdena	333	4614325	887892	Barcelona
Orís	626	4671134	930926	Barcelona
Parets del Vallès	123	4614948	935813	Barcelona
PN del Garraf - el Rascler	573	4582394	911011	Barcelona
Puig Sesolles	1668	4638954	952010	Barcelona
Rellinars	421	4620707	909621	Barcelona
Sabadell	258	4613982	922755	Barcelona
Sant Llorenç Savall	528	4626613	918414	Barcelona
Sant Martí Sarroca	257	4590732	887256	Barcelona
Sant Sadurní d'Anoia	164	4598027	900610	Barcelona
Sant Salvador de Guardiola	349	4624575	896933	Barcelona

Nombre de la estación	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Santuari de Queralt	1167	4672982	899110	Barcelona
Vallirana	252	4592929	912754	Barcelona
Viladecans	3	4584238	921841	Barcelona
Anglès	150	4660801	966718	Girona
Banyoles	176	4678963	978696	Girona
Cabanes	31	4701007	990874	Girona
Cassà de la Selva	171	4652856	991914	Girona
Castell d'Aro	14	4646146	1001188	Girona
Das	1097	4704124	900623	Girona
Girona	72	4664141	981131	Girona
La Bisbal d'Empordà	28,6	4664931	1000114	Girona
La Tallada d'Empordà	15	4673582	1001709	Girona
La Vall d'en Bas	461	4680360	950767	Girona
Molló	1405	4705876	945825	Girona
Monells	60	4664679	996934	Girona
Núria	1971	4706910	924317	Girona
Olot	421,5	4685605	952764	Girona
Portbou	196	4716547	1007266	Girona
Roses	24	4698366	1009869	Girona
Sant Pau de Segúries	852	4692417	942519	Girona
Sant Pere Pescador	4	4687473	1003614	Girona
Santa Coloma de Farners	162	4650313	970192	Girona
Torroella de Fluvià	6	4687779	1000665	Girona
Viladrau	953	4646237	949965	Girona
Aitona	97	4598596	788910	Lleida
Albesa	267	4629683	805121	Lleida
Alcarràs	122	4607580	796041	Lleida
Alfarràs	268	4635926	797152	Lleida
Algerri	301	4634123	803084	Lleida
Alguaire	370	4627266	794024	Lleida
Baldomar	366	4648941	834112	Lleida
Cadí Nord	2143	4693046	888731	Lleida
Camarasa	668	4647941	821917	Lleida
Castelldans	228	4604301	813126	Lleida
Castellnou de Seana	264	4619198	829056	Lleida

Nombre de la estación	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Cervera	554	4622677	857633	Lleida
el Canós	429	4623835	849874	Lleida
El Poal	223	4620715	822787	Lleida
El Pont de Suert	823	4700772	808118	Lleida
Els Alamús	235	4611578	811309	Lleida
Espot	2519	4717055	833008	Lleida
Gimenells	259	4617385	782520	Lleida
Golmés	261	4616853	826888	Lleida
La Granadella	505	4585206	806818	Lleida
La Pobla de Segur	513,3	4683970	827109	Lleida
La Seu d'Urgell	849	4700476	865007	Lleida
Lac Redon	2247	4727582	809830	Lleida
Lladurs	785	4668981	866244	Lleida
Lleida - la Bordeta	165	4611602	804082	Lleida
Maials	350	4584282	791185	Lleida
Mollerussa	247	4614629	822594	Lleida
Montsec d'Ares	1572	4662205	808644	Lleida
Oliana	490	4667322	856953	Lleida
Oliola	443	4644463	844728	Lleida
Organyà	566,5	4682875	857525	Lleida
Raimat	286	4620361	787046	Lleida
Salòria (2.451 m)	2451	4716690	858655	Lleida
Sant Martí de Riucorb	413	4610374	840867	Lleida
Sant Romà d'Abella	690	4673136	833792	Lleida
Seròs	89	4595918	786262	Lleida
Solsona	691	4658261	873757	Lleida
Tàrrega	427	4621175	846542	Lleida
Tornabous	291	4623085	836639	Lleida
Torres de Segre	215	4602482	796491	Lleida
Vallfogona de Balaguer	238	4632984	818234	Lleida
Vilanova de Meià	594	4657116	833451	Lleida
Vilanova de Segrià	222	4624443	801858	Lleida
Alcanar	24	4495645	798315	Tarragona
Aldover	52	4529062	795449	Tarragona
Amposta	3	4512664	806841	Tarragona

Nombre de la estación	Altitud (m)	Coordenadas X	Coordenadas Y	Provincia
Ascó	257	4566513	794478	Tarragona
Batea	382	4553692	778774	Tarragona
Benissanet	32	4552108	805460	Tarragona
Constantí	112	4566152	849647	Tarragona
Cunit	17	4571528	888546	Tarragona
El Masroig	141	4559013	812461	Tarragona
el Perelló	179	4531295	813137	Tarragona
El Vendrell	59	4572549	879052	Tarragona
els Alfacs	0	4503820	809505	Tarragona
Falset	359	4562859	820513	Tarragona
Gandesa	349	4551733	788210	Tarragona
Horta de Sant Joan	515	4538620	778236	Tarragona
Isla de Buda	0,5	4513328	823946	Tarragona
l'Aldea	62	4519461	805228	Tarragona
L'Ametlla de Mar	93	4535510	817483	Tarragona
L'Espluga de Francolí	446	4590432	842711	Tarragona
Margalef	404	4577220	814367	Tarragona
Pantà de Riba-roja	69	4571545	787647	Tarragona
PN dels Ports	1055	4521528	779944	Tarragona
Prades	928	4581357	833296	Tarragona
Riudoms	158	4561796	837314	Tarragona
Torredembarra	2	4564468	870824	Tarragona
Torroja del Priorat	300	4569725	818359	Tarragona
Ulldecona - los Valentins	210	4502765	785136	Tarragona
Ulldeolins	687	4581569	825240	Tarragona
Vila-rodona	287	4582057	865238	Tarragona
Vinebre	108	4565523	801421	Tarragona
Vinyols i els Arcs	29	4555630	841632	Tarragona