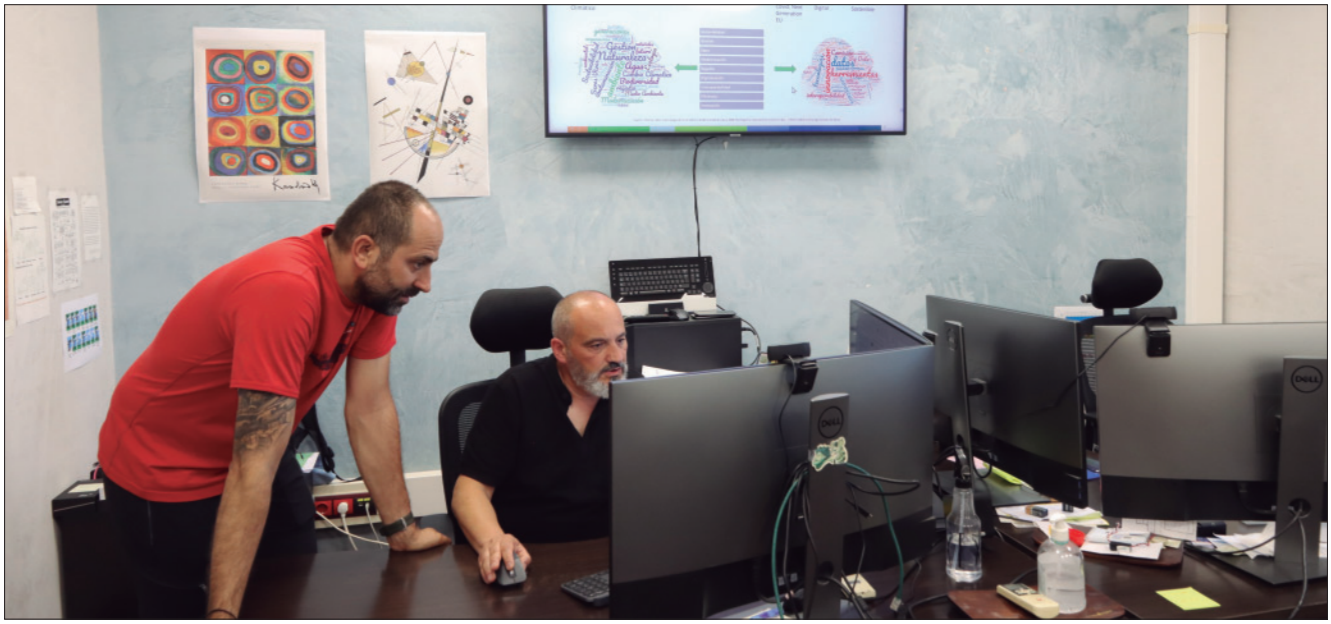


Alberto García Prats, Juan Manuel Carricondo-Antón, Dariana Isamel Ávila-Velasquez, Héctor Macián-Sorribes y Manuel Pulido-Velázquez
IIAMA - Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia

Proyecto WATER4CAST: predicciones meteorológicas y teledetección para una gestión eficiente del agua de riego

El proyecto WATER4CAST, financiado por la Generalitat Valenciana, busca mejorar la gestión del agua de riego mediante predicciones meteorológicas, inteligencia artificial y técnicas avanzadas de teledetección. La plataforma web desarrollada integra predicciones en tres horizontes temporales: corto (15 días), sub-estacional (8 semanas) y estacional (6/7 meses). Utilizando el método FAO-56, calcula las necesidades de riego, empleando datos meteorológicos y coeficientes de cultivo obtenidos de índices espectrales como NDVI. Además, monitorea el estrés hídrico mediante análisis de temperatura superficial con datos satelitales y predice sequías mediante el índice SPI y SPEI.

Palabras clave:
Predicción meteorológica | Teledetección | Gestión del agua | Evapotranspiración | Estrés hídrico.

La agricultura es la actividad que más agua consume en multitud de cuencas hidrográficas, llegando en climas mediterráneos al 80% del total del recurso renovable. En España la superficie regada ocupa el 23% de la superficie agraria total, generando el 65% de la producción agraria vegetal (MAPA, 2024)[1]. Esto le asigna un rol crucial en aspectos tan importantes como la seguridad alimentaria, el mantenimiento de paisajes y ecosistemas o la fijación de población en el entorno rural. Pero al mismo tiempo, supone una gran responsabilidad que nos obliga al empleo de las mejores técnicas disponibles en cada momento para garantizar el uso eficiente de un recurso tan escaso y necesario como el agua, además de hacerlo de forma respetuosa con el medio ambiente.

Un hito para lograr esta eficiencia se produjo a finales de los años 90 del siglo XX, cuando se desplegó a lo largo de todo el territorio nacional la red SIAR. Se trata de una red de estaciones meteorológicas con los sensores necesarios para determinar y servir de inmediato *online* la evapotranspiración de referencia (ETo). El Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR)[2] cuenta a día de hoy con casi 500 estaciones, y los datos son accesibles para su descarga manual, o puede ser automatizado mediante el servicio API-SIAR, que permite alimentar directamente aplicaciones que requieran dichos datos.

La red SIAR está coordinada por el Ministerio de Agricultura, delegando el papel de la instalación y el mantenimiento a las Comunidades Autónomas, las cuales suelen realizar dicha tarea a través de sus centros de investigación agraria.

Si bien el cálculo de las necesidades de riego con base en la ETo estimada ha permitido ajustar con razonable precisión el riego aplicado a las necesidades reales de los cultivos, dicho cálculo debe hacerse siempre basándonos en datos de periodos pasados. Es decir, la red estima la evapotranspiración de un periodo, por ejemplo, una semana, y en base a dichos registros se programa el riego del siguiente periodo, la semana próxima en el ejemplo utilizado.

En periodos con mucha estabilidad atmosférica el error cometido es pequeño; sin embargo, en fases del ciclo de cultivo en los

que la atmósfera es cambiante, este método pierde buena parte de su eficacia. Por otro lado, en zonas regables en las que se depende de aguas superficiales almacenadas en embalses, no es posible planificar la temporada de riego más allá de la opción de usar los valores medios de años pasados. Es por ello que en el ámbito de la investigación estamos poniendo el foco en las posibilidades que ofrecen los modelos numéricos de predicción meteorológica. En lugar de trabajar con datos registrados pasados, el riego se planifica basándonos en el pronóstico meteorológico del periodo programado a futuro. El modelo meteorológico predice las mismas variables que una estación SIAR registraría y, con dichas predicciones, se programa el riego.

Modelos de predicción meteorológica

El avance en el terreno de la predicción meteorológica ha sido notable en los últimos años, pero sobre todo se ha avanzado en la democratización del servicio. Actualmente es posible acceder a datos de predicciones por distintas vías. Sin embargo, dichas predicciones no son directamente utilizables. Para entender el proceso es necesario previamente definir algunos conceptos.

La dinámica de la atmósfera es global, por lo que el punto de partida de una predicción meteorológica es siempre lo que conocemos como modelos numéricos de macroescala o modelos globales. Dividen el globo en celdas tanto horizontales como verticales, y tras la asimilación de los datos referentes al estado actual de la atmósfera y del océano, simulan mediante ecuaciones matemáticas y físicas la circulación atmosférica y las dinámicas oceánicas, así como su evolución en el tiempo. Se requieren supercomputadores para su ejecución. En el caso de las predicciones estacionales de 6 a 7 meses, el modelo más utilizado es el SEAS5[3] del Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (ECMWF) de la Unión Europea, y a corto plazo, para los próximos 15 días, el Sistema de Predicción Global (GFS, en sus siglas en inglés)[4] de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, en sus siglas en inglés) de la administración estadounidense. Los centros de ECMWF y la NOAA tienen predicciones gratuitas en abierto con distintos horizontes temporales.

Los modelos de macroescala reproducen muy bien la circulación global, sin embargo, no capturan adecuadamente los procesos físicos locales y el efecto de la orografía. Para ello, es habitual utilizar los denominados modelos de mesoescala. Estos modelos parten del resultado del modelo global y resuelven de nuevo las ecuaciones con mayor resolución espacial en una región concreta. Estos modelos solo están al alcance de grandes corporaciones y organismos meteorológicos nacionales, como por ejemplo AEMET, que utiliza los modelos HARMONIE-AROME[5] y una adaptación del Sistema Integrado de Previsión de Alta Resolución (HRES) del ECMWF. Los datos en bruto no suelen estar disponibles en abierto, y las empresas u organismos que los tienen cobran por suministrarlos.

Una alternativa para solucionar la falta de resolución espacial, eliminar los sesgos y adaptar los resultados de los modelos globales a las condiciones locales, aumentando así su fiabilidad, es recurrir a técnicas matemáticas y estadísticas. Actualmente se está explorando y aplicando el uso de la inteligencia artificial en el área de predicción meteorológica. Utilizando registros históricos reales y predicciones pasadas, es posible encontrar patrones que permiten postprocesar los datos crudos de los modelos globales y obtener buenas predicciones locales. Técnicas como mapeo de cuantiles (*quantile mapping*), escalado lineal (*linear scaling*) o lógica difusa (*fuzzy logic*) nos resultan útiles para esta tarea.

El proyecto de investigación WATER4CAST

WATER4CAST[6], "Sistema Integrado de Predicciones para el Agua y el Medio Ambiente", es un proyecto de investigación financiado por la Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital de la Generalitat Valenciana. Arrancó en 2021 con un horizonte de 4 años (PROMETEO/2021/074), continuando desde 2024 con una segunda fase (CIPROM/2023/5) que culminará en 2028.

El objetivo del proyecto es el desarrollo de una plataforma web visual que, además de proporcionar predicciones meteorológicas postprocesadas, las utilice para generar variables e indicadores útiles a la hora de apoyar la toma de decisiones en la cuenca del Júcar. Proporciona, pues, información útil tanto para agricultores como para autoridades encargadas de la gestión del agua. Las predicciones meteorológicas producidas son las siguientes, tal y como se aprecia en la Figura 1:

- Predicciones a corto plazo (hasta 15 días): Se trata de predicciones diarias de precipitación, temperatura media, máxima y mínima, radiación solar y velocidad del viento. El resultado es una sola serie determinista.
- Predicciones subestacionales (semanales hasta 8 semanas): Se trata de los mismos datos que para la predicción a corto plazo, pero se agrupan por semanas. El resultado es también una sola serie determinista.
- Predicciones estacionales (mensuales hasta 6/7 meses): Estas predicciones se basan en patrones climáticos a largo plazo como la probabilidad de que una temporada sea más cálida, fría, seca o húmeda que la media histórica. En este caso el resultado son 51 trayectorias que permiten mostrar la incertidumbre, presentando los resultados mensuales en forma de diagramas de cajas y bigotes.

Necesidades de riego y teledetección

La plataforma WATER4CAST calcula las necesidades de riego para los tres horizontes temporales de predicción empleando el método FAO-56. En cada pixel de predicción, empleando las variables meteorológicas de temperatura, radiación solar, velocidad del viento y déficit de presión de vapor, se obtiene la evapotranspiración de referencia (ETo). La ETo es una medida de la demanda evaporativa de la atmósfera. Dicha demanda es a continuación multiplicada por un coeficiente de cultivo (Kc) para convertirla en la demanda del cultivo. Dichos coeficientes es habitual obtenerlos de los centros de investigación agraria de cada región. Para un cultivo concreto, el Kc evoluciona a lo largo de la temporada con el desarrollo del dosel o cubierta vegetativa y, por tanto, con su índice de área foliar y con la actividad transpirativa de la misma. Por tanto, los valores de Kc en realidad son específicos, no solo del cultivo, sino de la parcela. Incluso si és-

La plataforma WATER4CAST calcula las necesidades de riego para los tres horizontes temporales de predicción empleando el método FAO-56. En cada pixel de predicción, empleando las variables meteorológicas de temperatura, radiación solar, velocidad del viento y déficit de presión de vapor, se obtiene la evapotranspiración de referencia (ETo). La ETo es una medida de la demanda evaporativa de la atmósfera. Dicha demanda es a continuación multiplicada por un coeficiente de cultivo (Kc) para convertirla en la demanda del cultivo

ta abarca cierta superficie con distintos tipos de suelos y distintos grados de desarrollo del cultivo será específico de cada recinto diferenciado. Para tener en cuenta esta especificidad, entra en juego otra herramienta que está ganando protagonismo: la teledetección.

Existen constelaciones de satélites para distintos fines. En agricultura y medioambiente son de interés aquellos que van equipados con cámaras multiespectrales o hiperespectrales, y que van registrando la radiación reflejada por la superficie en las distintas longitudes de onda. De la misma forma que ocurre con las predicciones meteorológicas, una condición importante, además de cumplir con los requisitos técnicos acerca de la información espectral que suministran y las resoluciones espacial y temporal, es la gratuidad del servicio. De esta forma, la misión Sentinel 2[7] de la Agencia Espacial Europea (ESA) y la misión Landsat[8] de la NASA estadounidense son los productos que cumplen estos requisitos.

Cada superficie, en este caso cada cultivo, tiene lo que se denomina una firma espectral, es decir, una cantidad de radiación reflejada (reflectancia) en cada franja de longitud de onda (llamadas bandas). Combi-

Figura 1
Predicción de la precipitación en la plataforma W4C en sus 3 horizontes temporales

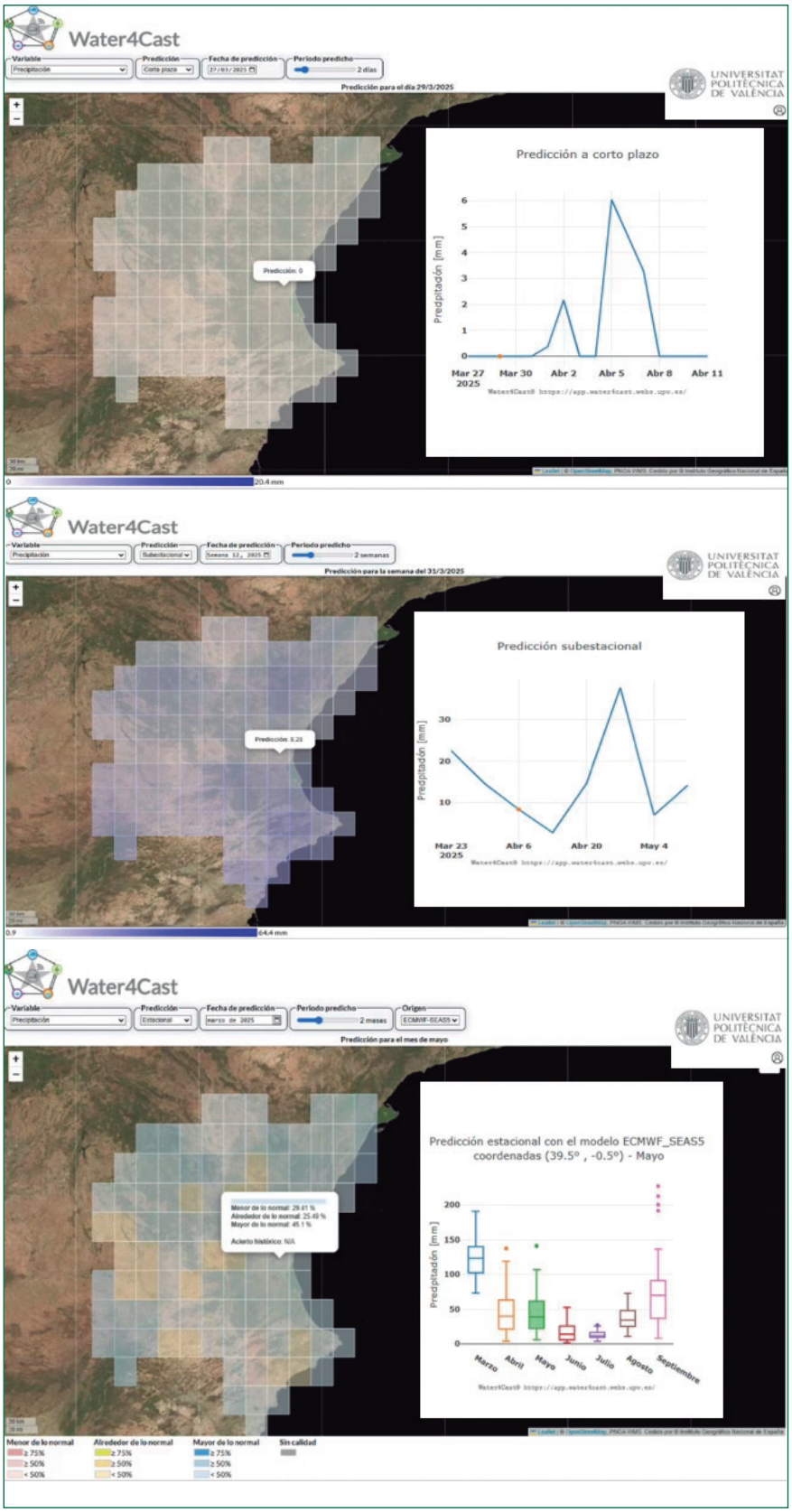


Figura 2
Predicción de las necesidades de riego en parcela a corto plazo

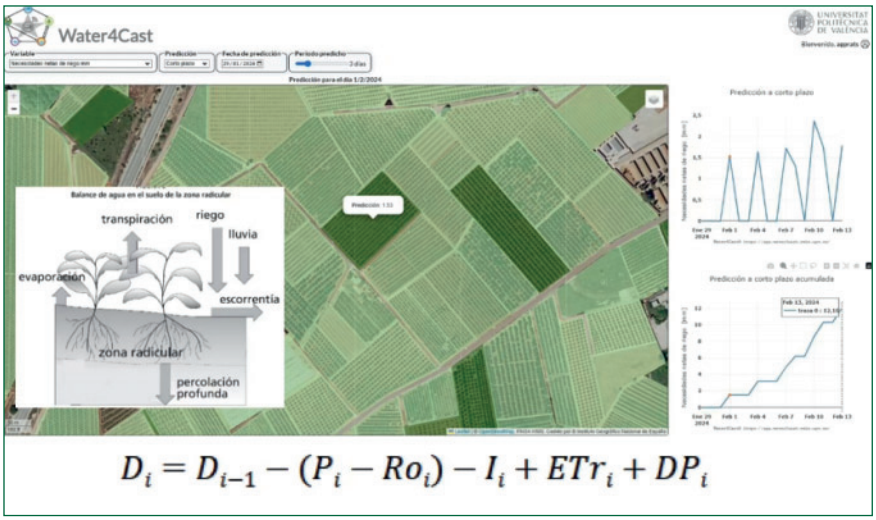
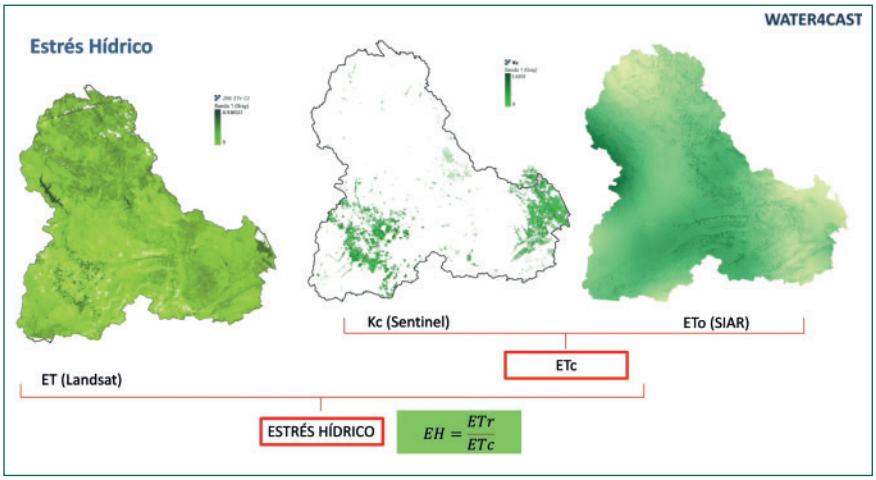


Figura 3
Procedimiento de obtención del estrés hídrico



nando la reflectancia de bandas concretas se obtienen los denominados índices espectrales de vegetación, los cuales basan su interés en que presentan una alta correlación con algún aspecto de interés del cultivo.

Es el caso del índice NDVI o índice de vegetación de las diferencias normalizadas. El NDVI se calcula como (NIR-RED)/(NIR+RED), siendo NIR la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano, y RED la reflectancia en la banda del rojo. Su valor oscila entre -1 y 1 y es un índice de verdor. Está relacionado con una vegetación sana, en desarrollo y crecimiento activo. Valores de -1 a 0.2 indican suelos desnudos con poca cobertura vegetal o vegetación muerta, y desde 0.2 a 1 indican mayor cobertura vegetativa del suelo y con más actividad. Numerosas investigaciones han puesto de manifiesto la relación existente entre el valor del NDVI y el valor del coeficiente de cultivo Kc.

WATER4CAST utiliza las relaciones publicadas en la literatura científica para generar mapas de Kc. De esta forma, para cada parcela definida en el parcelario SIGPAC se realiza un balance de agua en el suelo para el horizonte de predicción de 15 días. El agotamiento del agua en el suelo de un día (Di) es el agotamiento del día anterior (Di-1) al que añadimos o sustraemos las entradas y salidas: demanda del cultivo (ETri = ETo·Kc), lluvia neta, (precipitación total menos escorrentía, Pi – Roi) y percolación profunda (Dpi). Cuando el agua en el suelo está por debajo de un determinado umbral, se repone agua mediante un riego (Ii). En la Figura 2 podemos ver el riego requerido de una parcela para el horizonte de predicción a corto plazo de 15 días.

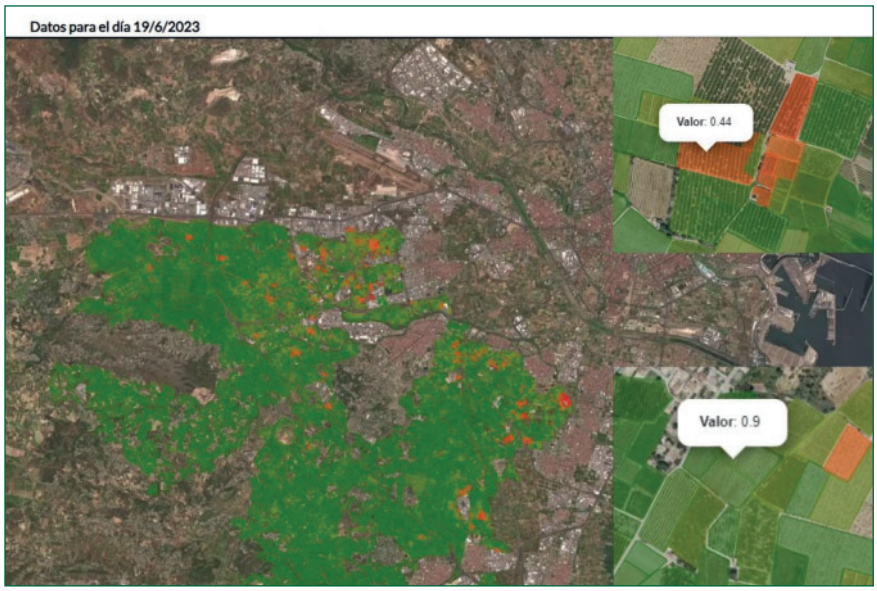
Para el horizonte de predicción de medio (8 semanas) y largo plazo (6 meses), la mecánica es la misma, con la diferencia de que los coeficientes de cultivo ya no pueden ser obtenidos de imágenes satelitales en tiempo quasi-real, y se recurre a valores estándar recomendados por los centros de investigación para la región o comarca. Los valores de riego obtenidos por parcela se integran por zonas de interés para facilitar la toma de decisiones del usuario: por zona regable, por unidad de demanda, etc.

Monitorización del estrés hídrico. Un poco más de teledetección

Algunas de las misiones satelitales (Landsat en nuestro caso) registran, además de los valores de radiación reflejada, una banda térmica con la que se puede obtener la temperatura de la superficie. Utilizando esta temperatura como principal variable, es posible encontrar en la literatura especializada distintos métodos (SEBAL, METRIC, SSEBop, SIMS, PT-JPL, ALEXI/DisALEXI, etc.) que desarrollan un balance de energía en superficie. A partir del mismo se puede estimar la evapotranspiración instantánea en el momento de la captura de la imagen, y, de ahí, extrapolar lo ocurrido en el día completo y en los días siguientes hasta la captura de la siguiente imagen. Si bien son métodos con un alto grado de complejidad computacional y con cierto grado error en la estimación, también resultan muy útiles para monitorizar el estado hídrico de la vegetación.

El objetivo no es cuantificar exactamente la cantidad de agua consumida, sino establecer si la parcela se está regando de forma suficiente. Para ello, WATER4CAST compara la evapotranspiración potencial obtenida por el método descrito en el apartado anterior usando datos reales registrados en la red SIAR, con la que el satélite estima mediante el balance de energía en superficie. El cociente es un valor que va de 0 a 1, indicando 0 para estrés hídrico absoluto y

Figura 4
Parcelas en las que se detecta estrés hídrico



1 para parcelas que transpiran un valor similar al teórico. La Figura 3 nos muestra el procedimiento de obtención para la cuenca del Júcar, mientras que la Figura 4 nos indica el resultado sobre la plataforma web.

El procedimiento puede resultar especialmente útil para distritos de riego con gestión comunitaria a la hora de detectar parcelas infra-regadas por averías, obstrucciones u otros problemas técnicos involuntarios. También puede resultar útil en la detección de abandono de parcelas o de riegos no autorizados.

Monitorización de la sequía

Los periodos de sequía tienen una especial relevancia en la agricultura, pues suelen ir acompañados de restricciones en el uso del agua de riego. Una adecuada predicción es una herramienta fundamental, por ejemplo, a la hora de tomar decisiones en la siembra del siguiente año o en la gestión del agua de un embalse. WATER4CAST traduce las predicciones estacionales de lluvia en el índice de sequías SPI (*standardized precipitation index*). Dicho índice compara la precipitación ocurrida en los últimos 6, 12, 18 o 24 meses con el valor normal de lluvia para ese periodo, y lo expresa en número de veces la desviación típica. De esta manera, un SPI igual a 0 significa que lloverá lo normal en ese periodo, desde 0 hasta -3 nos habla de un periodo seco, tanto más cuanto más negativo sea el valor SPI, y de 0 a +3 nos indica un periodo húmedo usando esta misma escala.

Veamos una muestra de la utilidad de WATER4CAST. Antes de las recientes lluvias de este otoño de 2024 y primavera de 2025, parte de la cuenca del Júcar se encontraba en periodo de sequía prolongada, tal y como podemos ver en la Figura 5.

A la izquierda podemos ver el indicador de sequía que ofrecía la Confederación Hidrográfica del Júcar en su página web en septiembre de 2024. A la derecha, una predicción de SPI-12 meses hecha en WATER4CAST en esa misma fecha para los 6 meses siguientes. Nótese como el SPI de septiembre tenía un valor medio de -2 en las mismas regiones que el mapa de la CHJ indicaba sequía prolongada, pero la predicción anunciaba una salida gradual de la misma a lo largo de los meses de oto-

Figura 5
Predicción de la sequía en la plataforma W4C en septiembre de 2024 para los 6 meses siguientes.

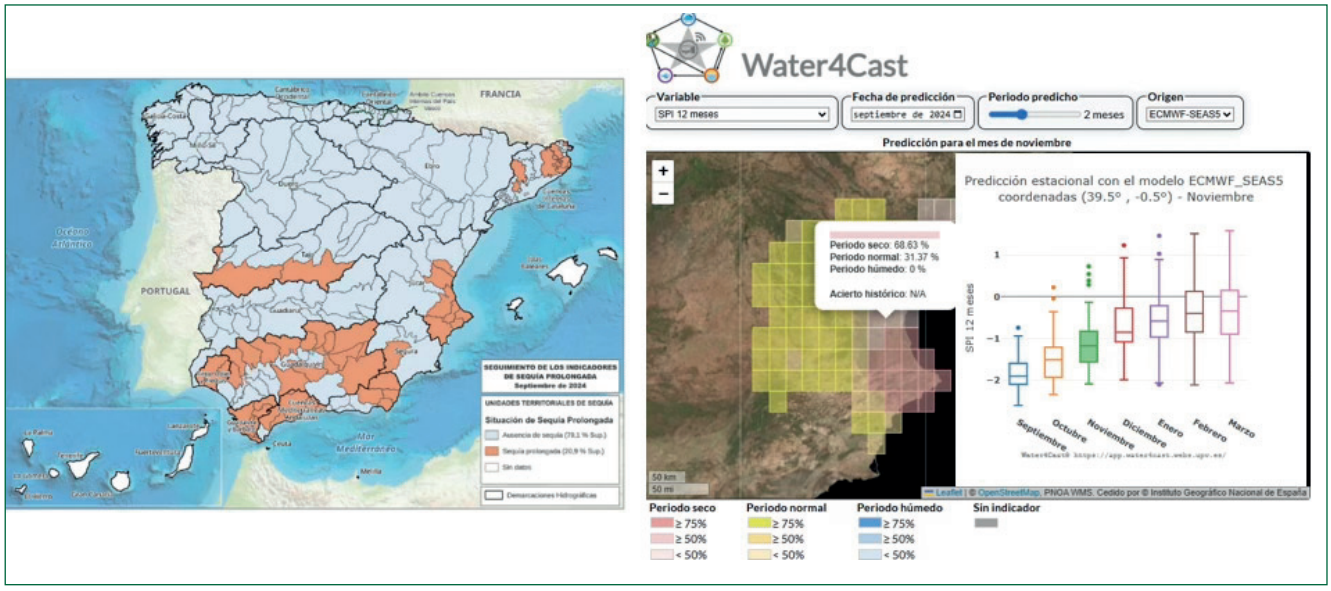
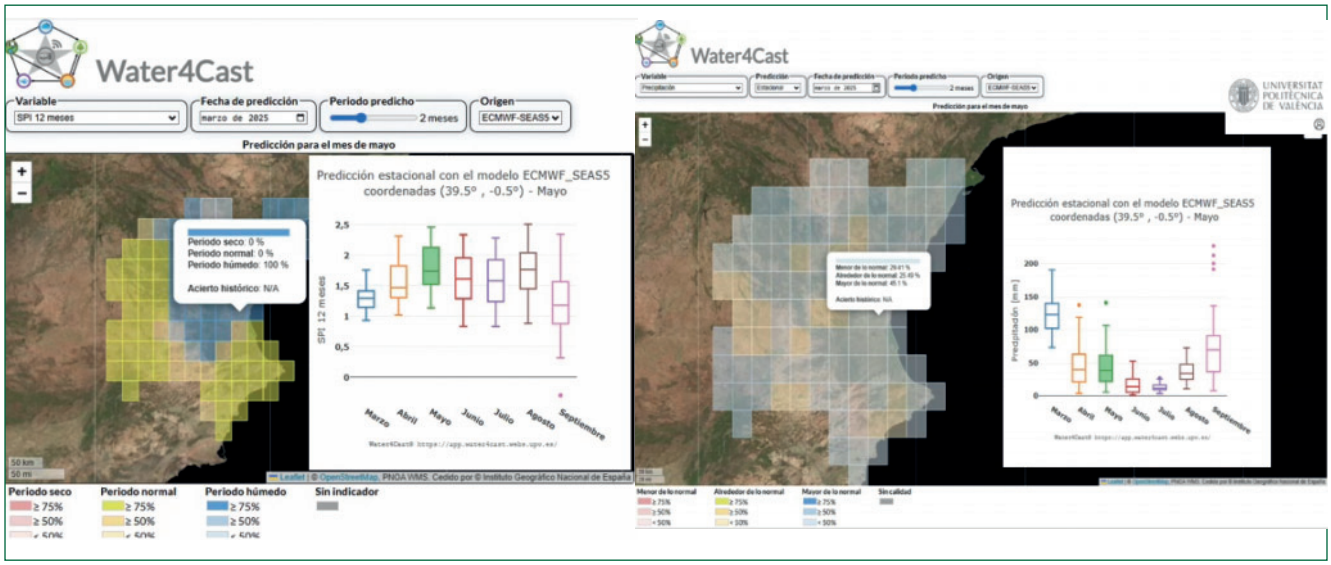


Figura 6
Predicción de la sequía en la plataforma W4C en marzo de 2025 para los 6 siguientes meses



ño y primavera como finalmente así ha ocurrido.

En la Figura 6 podemos ver la predicción desde marzo de 2025 (fecha actual) hasta septiembre de 2025, lo que nos indica que tanto la primavera como el verano seguirán la tendencia iniciada un año antes, con precipitaciones por encima de lo normal.

Disponer de esta información en el verano de 2024 hubiera permitido hacer una gestión adecuada orientada a levantar algunas restricciones al riego, sabiendo que el otoño y la primavera iban a ser lluviosas y las reservas se repondrían, o a la siembra de determinados cultivos, pues su desarrollo no iba a estar condicionado por la falta de lluvias.

Futuros desarrollos

Tal y como se indicó anteriormente, el proyecto acaba de comenzar un segundo ciclo. En estos cuatro años se está trabajando en mejorar la plataforma, ampliarla a una mayor área geográfica y, sobre todo, habilitar una zona de usuarios. La información actualizada y fiable de los cultivos en una parcela son datos fundamentales. La plataforma en la actualidad funciona con la información pública en abierto contenida en SIGPAC, pero dicha información en la mayoría de los casos está desactualizada y no se corresponde a la realidad. Aún en los casos en los que el cultivo sea el correcto, no se dispone de datos importantes como el marco de plantación, la edad, la variedad, etc. Con un área privada en la que cada usuario pueda entrar y actualizar sus datos redundará en una mayor utilidad de la plataforma. Por otro lado, para que sirva como herramienta de trabajo para gestores responsable del agua (administraciones, comunidades de regantes, etc.), necesitamos generar máscaras que nos agrupen los resultados por zonas de interés para la planificación.

Si bien este artículo se ha centrado en las funciones de predicción de WATER4CAST referentes al uso del agua en la agricultura, la plataforma tiene otros ámbitos de uso. Es el caso del módulo Eco-Hidrológico aún por implementar, el cual utilizará las predicciones meteorológicas para predecir las aportaciones hídricas que recibirán los embalses mediante el uso de un modelo hidrológico. Disponer de predicciones con varios meses de antelación de la cantidad de agua almacenada en un embalse es, sin duda, una herramienta de gestión que ayudará a tomar las mejores decisiones relacionadas con la aplicación de restricciones al uso en cada momento para que el impacto negativo sea mínimo. ■

▼ ***Notas***

[1] MAPA (2024). *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Análisis de los regadíos en España*, Secretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación, MAPA. 43 pp.
[2] https://servicio.mapa.gob.es/websiar/Inicio.aspx
[3] https://www.ecmwf.int/
[4] https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast
[5] https://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/modelosnumericos/harmonie_arome
[6] Proyecto financiado por el programa para la promoción de la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación en la Comunitat Valenciana para grupos de investigación de excelencia de la Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital de la Generalitat Valenciana.
[7] https://sentinels.copernicus.eu/
[1] https://landsat.gsfc.nasa.gov/