



Universidad  
de Alcalá



Universidad  
Rey Juan Carlos

**ESTADO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS  
TÉCNICAS EMERGENTES PARA LA MEDICIÓN DE  
LA HUMEDAD Y LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS  
DEL SUELO (PHS)**

**STATUS OF IMPLEMENTATION OF EMERGING  
TECHNIQUES FOR THE MEASUREMENT OF SOIL  
MOISTURE AND HYDROLOGICAL PROCESSES  
(SHP)**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:**

**D. XABIER FERNÁNDEZ OREGI**

**Dirigido por:**

**Dr. FRANCISCO JAVIER LILLO RAMOS**

**Alcalá de Henares, a 26 de junio de 2023**

## ÍNDICE

Resumen .....	4
1. INTRODUCCIÓN .....	5
2. OBJETIVO DEL TRABAJO.....	6
3. METODOLOGÍA .....	6
4. LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS DEL SUELO Y SU ESTUDIO A DIFERENTES ESCALAS .....	8
4.1 Los Procesos Hidrológicos del Suelo y la Zona No Saturada .....	8
4.1.1 Ecuaciones para la parametrización de los PHS .....	11
4.1.2 La escala espacial, la importancia de comprender los Procesos Hidrológicos del Suelo en la Zona No Saturada y la retroalimentación climática a escala cuenca .....	13
4.2 Técnicas <i>in situ</i> y proximales para la medición de la humedad (HS) y la modelación/evaluación de los procesos hidrológicos del suelo (PHS). .....	15
4.2.1 Técnicas <i>in situ</i> y proximales .....	15
4.2.2 Sensores <i>in situ</i> y redes de monitoreo inalámbricos .....	18
4.2.3 Evaluación y modelización a escala de pedón de los PHS y la ZNS.....	20
4.3 Técnicas emergentes para la medición de la HS y la evaluación/modelización de los PHS a escala cuenca .....	21
4.3.1 Los sensores remotos (SR).....	21
4.3.2 Ciencia ciudadana y redes de observación.....	26
4.3.3 Análisis de datos, ciberinfraestructuras y <i>Big Data</i> .....	28
4.4 Transferencia de los modelos de PHS a escala local a la modelización y evaluación a escala de cuenca.....	29
5. ESTADO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS EMERGENTES EN EL ESTUDIO DE LOS PHS A ESCALA DE CUENCA .....	32
6. CONCLUSIONES .....	46
7. BIBLIOGRAFÍA .....	48

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Procesos hidrológicos de la ZNS .....	8
Figura 2 Relación $\Psi$ vs $\theta$ para un punto en un perfil de textura areno limosa. Modelización con Hydrus-1D. ....	11
Figura 3 Relación $K$ vs $\theta$ para un punto en un perfil de textura areno limosa. Modelización con Hydrus-1D. ....	11

## ÍNDICE TABLAS

Tabla 1 Escalas para los sensores. Tabla adaptada de Babaeian et al. (2019) .....	19
Tabla 2 Resumen de ventajas y limitaciones aplicadas a los tipos de sensores óptimos, térmicos y de microondas. Tabla adaptada de Babaeian et al. (2019) .....	38
Tabla 3 Coeficientes de determinación de la relación entre los valores del sensor y los valores observados ( $R^2$ ) de satélites microondas. Tabla adaptada de Babaeian et al. (2019) .....	39

## ABREVIATURAS

BIAS	Sesgo medio relativo	MRI	Resonancia magnética nuclear
EEUU	Estados Unidos	NDMI	Normalized Difference Moisture Index
ERT	Tomografía Eléctrica	NDSI	Normalized Difference Snow Index
ESA	Agencia Espacial Europea	NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
ET	Evapotranspiración	NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ET	Evapotranspiración	NSE	Nash Sutcliffe-Efficiency
ETR	Evapotranspiración real	OMM	Organización Meteorológica Mundial
FDR	Reflectometría en el dominio de la frecuencia	PHS	Procesos hidrológicos del suelo
GPR	Radar de penetración del suelo	PTF	Funciones de pedotransferencia
GRDC	Centro Mundial de Datos de Escorrentía	$R^2$	Coefficiente de determinación
GWP	Global Water Partnership	RMSE	Error cuadrático medio
HS	Humedad del suelo	RRHH	Recursos hídricos
IA	Inteligencia Artificial	SIG	Sistemas de Información Geográfica
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático	SR	Sensores remotos
ISMN	Red Internacional de Humedad del Suelo	TDR	Reflectometría en el dominio del tiempo
KGE	Kling Gupta-Efficiency	UE	Unión Europea
LIDAR	Light Detection and Ranging	ZN	Zona Saturada
		ZNS	Zona no saturada

## Resumen

Este trabajo revisa las técnicas para la estimación de la humedad del suelo (HS) y los procesos hidrológicos del suelo (PHS), poniendo el énfasis en la implantación de las técnicas emergentes tales como, los sensores remotos, las redes de observación, la ciencia ciudadana y las ciberinfraestructuras. Se discuten tres aspectos clave para mejorar el modelado hidrológico a escala de cuenca: (a) mejorar la comprensión de los PHS de la Zona No Saturada (ZNS) a escala de pedón y su transferencia a modelos de cuenca, (b) la generación de dato de calidad a través de las técnicas emergentes y la integración de la información a diferentes escalas y (c) mejorar la accesibilidad a la información, capacidad de procesamiento e integración de la información en las plataformas de gestión de los recursos hídricos (RRHH). Está demostrado que las propiedades del suelo a escala de pedón tienen su impacto en las sequías severas y las inundaciones a escala cuenca, así como, en la retroalimentación climática a escala regional. En este trabajo se revisan las herramientas que actualmente son utilizadas para la mejor caracterización de los PHS a escala local, tales como, las funciones de pedotransferencia, la modelización inversa y la evaluación de los modelos de flujo mediante datos observados reales. También se analizan diferentes métodos que han sido utilizados empleando el modelado inverso para la validación de los modelos hidrológicos a escala cuenca. Se revisan las limitaciones temporales y espaciales de las redes de monitoreo y sensores remotos para la estimación de la HS, así como las desviaciones de los resultados de las mediciones de la HS según la geomorfología del terreno, las propiedades del suelo y la cobertura vegetal. Aunque actualmente la ciencia ciudadana es una técnica incipiente para la estimación de la HS, se mencionan los retos y las debilidades aportadas por el proyecto GROW de la Unión Europea (UE) y otros en curso. En este trabajo se mencionan los centros de adquisición de datos hidrológicos y las redes de observación actuales, se discute la necesidad de realizar esfuerzos para aumentar e integrar las redes de monitoreo *in situ* y facilitar el acceso a una información fiable y de calidad. Por último, se discute sobre el horizonte de la gestión de los RRHH a escala cuenca basada en los modelos que generan pronósticos hidrológicos y los llamados gemelos digitales orientados a los modelos hidrológicos. Estos últimos están experimentando un gran desarrollo que actualmente tienen como objetivo integrar las técnicas emergentes, el modelado del sistema terrestre de alta resolución, el modelado hidrológico, la inteligencia artificial y las tecnologías de la información.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático está provocando cambios rápidos en el ciclo del agua terrestre. Esto conduce a un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos como sequías, inundaciones y olas de calor que pueden provocar incendios forestales y amenazar a las comunidades en regiones áridas (Vereecken et al., 2022).

Los procesos hidrológicos del suelo constituyen el soporte para los ecosistemas de la Tierra, modulan y a su vez son afectados por el cambio climático y son los mecanismos que controlan la relación entre el agua, la energía y los ciclos biogeoquímicos. Los PHS son procesos que ocurren en el suelo y afectan la forma en que el agua se mueve y se almacena. Estos procesos incluyen la infiltración de agua en el suelo, la escorrentía, la retención o almacenamiento de agua, la evapotranspiración y la redistribución del flujo de agua. A su vez, los PHS son fundamentales para mantener la vida en ecosistemas naturales y controlar los mecanismos de retroalimentación entre los ciclos del agua, energía, carbono y nitrógeno. A nivel local, regulan los efectos climáticos en el ciclo del agua terrestre al controlar los flujos de energía y gases de efecto invernadero. Las propiedades del suelo (como textura, materia orgánica y estructura), su distribución espacial y la cubierta vegetal afectan a los PHS. A nivel regional y cuenca hidrográfica, la hidrología del suelo está influenciada por el uso de la tierra y los efectos del cambio climático sobre la estructura del suelo. Además, los PHS son importantes a nivel local para comprender cómo las raíces absorben el agua y cómo interactúan dinámicamente la vegetación y las aguas subterráneas. También juegan un papel importante en controlar y modular el impacto de eventos extremos como sequías e inundaciones. Las nuevas tecnologías están avanzando en el campo de la hidrología del suelo a nivel mundial, pero aún enfrenta desafíos relacionados con las propiedades del suelo como parámetros hidráulicos y como se transfieren estos a los modelos hidrológicos a escala de cuenca. Debido a la dificultad de parametrizar con éxito algunos procesos se emplean las funciones de pedotransferencia (PTF), que se encuentran en permanente revisión. En resumen, los procesos hidrológicos del suelo son fundamentales para entender cómo funciona nuestro planeta. Los cambios rápidos que está experimentando el ciclo del agua terrestre debido al cambio climático hacen aún más importante mejorar nuestra comprensión sobre estos procesos (Vereecken et al., 2022).

## **2. OBJETIVO DEL TRABAJO**

Este trabajo tiene como objetivo realizar una revisión del estado de la implementación de las técnicas emergentes para la medición de la humedad del suelo y estudio de los procesos hidrológicos del suelo y su transferencia a los modelos hidrológicos de cuenca.

Para entender mejor el impacto del cambio climático en los recursos hídricos y gestionarlos de manera sostenible, es necesario profundizar en el conocimiento de la humedad del suelo y los procesos hidrológicos tanto a nivel local (de pedón) como regional y cuenca.

Objetivos específicos:

- Identificar el potencial y limitaciones de las técnicas emergentes para la medición de la HS y la evaluación/modelización de los PHS.
- Identificar las limitaciones de las técnicas de transferencia de los modelos locales de PHS y HS a los modelos a escala de cuenca.

## **3. METODOLOGÍA**

En la realización del trabajo se han llevado a cabo las siguientes tareas:

a) Obtención de la información:

- Revisión bibliográfica del estado del arte de las técnicas emergentes, la evaluación y modelización de los PHS a escala de pedón y cuenca: consulta de artículos en revistas, congresos, biblioteca virtual de la Universidad de Alcalá de Henares, Google Scholar y Mendeley.
- Búsqueda de centros de información y *websites* públicos (organismos oficiales y corporaciones privadas) de acceso a datos relativos a la HS y los PHS.
- Revisión de modelos hidrológicos para la escala cuenca y las técnicas para la integración de información proveniente de diferentes fuentes.
- Revisión de experiencias sobre ciencia ciudadana y redes de observación relativas a la HS y los PHS.
- Revisión de las misiones satelitales actuales y futuras relacionadas con la generación de información para la estimación de la HS.

- Informes de organismos públicos relacionados con la participación pública en el ámbito del medioambiente y el agua y el sexto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).
- Seminarios y jornadas relacionados con la hidrología del suelo.

b) Análisis de la información:

En esta revisión se empleará la categorización de escalas partiendo del trabajo de Vereecken et al. (2022):

**Escala local (escala de pedón o de campo):** Los efectos del cambio climático, así como el ciclo del agua de la tierra, quedan determinados por los procesos que suceden a esta escala, tales como los flujos de energía (fundamentalmente térmica) y transferencia de materia.

- **Escala de pedón:** la mínima unidad o volumen de descripción y muestreo de un suelo completo, con dimensiones laterales suficientes para poder caracterizar la naturaleza, disposición y variabilidad de los horizontes.
- **Escala campo:** área de estudio limitado espacialmente dentro de una cuenca o limitado a un uso del suelo como, por ejemplo, una zona de regadío.

**Gran escala (escala cuenca o regional):** Los efectos del cambio climático o el uso del suelo modifican la estructura del suelo a gran escala, modificando los procesos del suelo y generando una retroalimentación climática. Las técnicas emergentes tienen gran potencial de desarrollo a esta escala. Se encuentran dificultades para la parametrización de las propiedades del suelo.

- **Escala cuenca:** área que comprende una cuenca hidrográfica.
- **Escala regional:** área mayor que la escala cuenca sin ser continental.

**Escala continental/mundial:** Las técnicas emergentes y el *big-data* ofrecen una novedosa oportunidad para la parametrización de las propiedades del suelo. Se enfrenta aún a grandes desafíos para una mirada a nivel de sistema-tierra.

## 4. LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS DEL SUELO Y SU ESTUDIO A DIFERENTES ESCALAS

### 4.1 Los Procesos Hidrológicos del Suelo y la Zona No Saturada

La ZNS es la capa de materiales que se encuentra entre la superficie del terreno y el nivel freático (Fig.1). Esta zona es un medio poroso donde el agua se mueve y se almacena. La característica principal de esta zona es que sus poros no están completamente llenos de agua y hay aire en ellos. El grado de saturación varía con el tiempo y puede haber episodios de saturación y no saturación en diferentes grados. Esto afecta a parámetros como el contenido de agua, la conductividad hidráulica y el potencial hidráulico. La ZNS se divide en tres zonas. La primera es la capa edáfica o suelo en sentido estricto, que es la capa más superficial y donde las raíces de las plantas absorben agua. La segunda es la subzona intermedia de la ZNS. La tercera es la subzona capilar, que es la interfase entre la ZNS y la Zona Saturada (ZS), donde es importante el proceso de ascenso capilar del agua. En la ZNS se dan procesos como infiltración, escorrentía, almacenamiento de agua, evapotranspiración, evaporación, ascenso capilar y flujos de recarga de acuíferos y flujos subsuperficiales. En la ZNS también se da el almacenamiento de agua aunque, a diferencia de la Zona Saturada, ese almacenamiento es variable (Fig.1). A continuación, se describen los procesos hidrológicos del suelo más detalladamente. Para ello se han utilizado los trabajos de Kunkel y Tindal (1999) y Puyol y Jacobo Villa (2006).

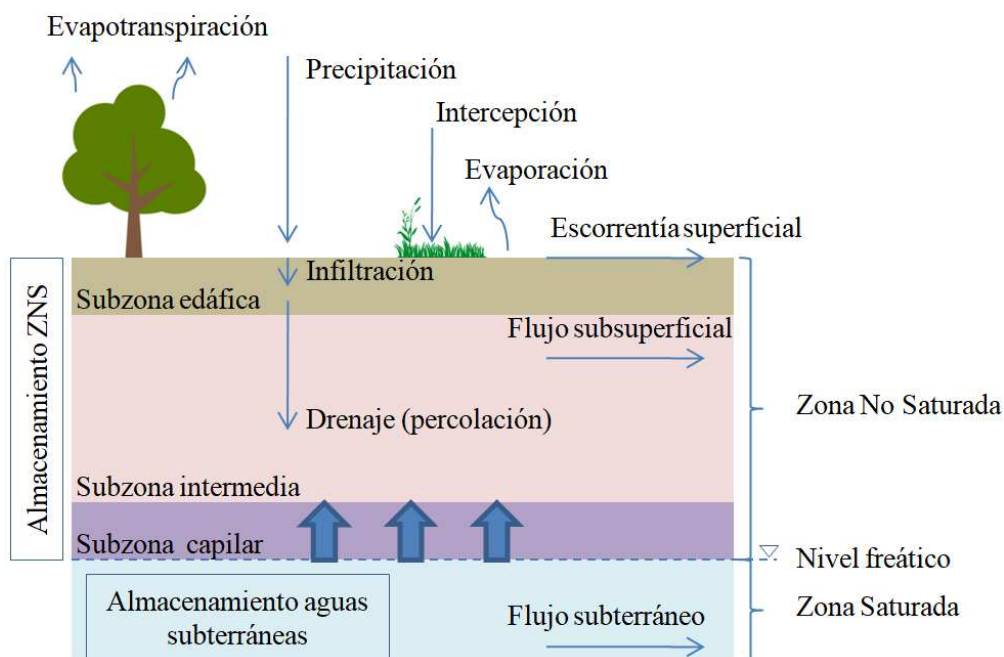


Figura 1. Procesos hidrológicos de la ZNS



El conocimiento de su dinámica espacial y temporal es fundamental para una buena aproximación sobre los recursos hídricos disponibles.

La evapotranspiración (ET) es un proceso combinado de transferencia de agua desde el terreno a la atmósfera y depende de las condiciones atmosféricas y relaciona la humedad del suelo y el desarrollo vegetal de la planta. Thornthwaite (1948) introdujo el concepto de evapotranspiración potencial (ETP), que se basa en el desarrollo óptimo de un vegetal y marca el límite superior de la evapotranspiración real (ETR). La ETR varía dependiendo de factores como la especie vegetal, su fase vegetativa, la estructura del suelo, sus propiedades químicas y la humedad del suelo en la zona no saturada en diferentes profundidades del perfil (Esteller et al., 2005).

Parte de la precipitación se pierde por evaporación directa del suelo, las abstracciones y las intercepciones (el agua que queda sobre la superficie de las plantas y elementos del terreno). El agua infiltrada en la capa más superficial del suelo puede evaporarse. La infiltración es el movimiento del agua desde la superficie del terreno hacia el suelo y la ZNS. Este proceso determina la cantidad de agua almacenada y disponible para el crecimiento vegetal. También es el principal proceso de recarga de las aguas subterráneas y condiciona las proporciones de agua que se mueven por flujo superficial (escorrentía) y subsuperficial.

La escorrentía superficial es el flujo de agua que se desplaza por la superficie hasta concentrarse en los cauces y ser drenada hacia la salida de una cuenca, que puede terminar en el mar, alimentar un lago o evaporarse/infiltrarse. Su velocidad es alta, siendo de horas a días. El flujo subsuperficial es el flujo de agua en la zona no saturada que vuelve enseguida a la superficie o descarga en las masas de agua superficiales. Su velocidad, menor que la escorrentía superficial, es de días a semanas. También existe el flujo preferencial, que es aquel flujo que por macroporos o por fisuras del suelo toma el agua.

El ascenso capilar es un proceso que ocurre en la ZNS, donde el agua asciende debido a las fuerzas capilares. Este proceso es importante en la interfase entre el nivel freático y la ZNS. Este ascenso depende de la textura del suelo y para el ascenso en la interfase entre el nivel freático y la ZNS puede variar desde unos pocos centímetros en caso de texturas gruesas hasta metros en el caso de suelos arcillosos.

El flujo de recarga de acuíferos o de percolación es el agua que se mueve gravitacionalmente en la ZNS y alimenta los acuíferos.

El almacenamiento de agua en el suelo y en la ZNS, es decir, el contenido de humedad, se expresa como una relación de la masa de agua en una muestra y la masa de la muestra seca (Eq. 1).

$$(Eq. 1) \quad \theta_m = \frac{M_w}{M_s} \times 100$$

con  $M_w$  = masa de agua de la muestra y  $M_s$  = masa de la parte sólida de la muestra, o como una relación del volumen de agua en una muestra con respecto al volumen de la muestra seca (Eq. 2),

$$(Eq. 2) \quad \theta = \frac{V_w}{V_s} \times 100$$

con  $V_w$  = volumen de agua de la muestra y  $V_s$  = volumen total de la parte sólida de la muestra.

El contenido de humedad del suelo ( $\theta$ ) es la variable de estado más importante en la ZNS. Se emplean también otras expresiones relacionadas con el contenido de agua en la ZNS como la capacidad máxima, capacidad de retención, capacidad de campo y punto de marchitamiento (Sánchez, 2022).

El tamaño y volumen de los huecos depende del tamaño de las partículas (textura), su distribución y cómo están agregadas (estructura). Por ejemplo, una matriz homogénea de partículas pequeñas tendrá poros más pequeños que una matriz de partículas grandes. Esto afecta a las fuerzas de cohesión y adhesión del agua, la velocidad del flujo de agua a través del material (conductividad hidráulica) y la porosidad total. La porosidad total no es equivalente a la porosidad eficaz, que es la que controla la conductividad hidráulica del suelo. Para que el agua pueda fluir a través del suelo, los huecos deben estar interconectados y para esto se emplea el parámetro de la porosidad eficaz.

El potencial y el gradiente energético del agua determinan la dirección y velocidad del flujo de agua en la ZNS (Kunkel y Tindal, 1999). Los potenciales energéticos más importantes en la ZNS son el potencial gravitacional ( $z$ ), que se debe a la diferencia de altura entre el punto de referencia y el punto considerado, y el potencial matricial ( $\psi$ ), que está definido por las fuerzas de adhesión y cohesión del suelo. El potencial hidráulico ( $h$ ) es el balance entre el potencial gravitacional, que tiene signo positivo, y el potencial matricial, que tiene signo negativo (Eq. 3). Cuando no hay flujo de agua, el potencial hidráulico es cero.

$$(Eq. 3) \quad h = z + \psi$$

Inmediatamente después de una precipitación, cuando la capa superficial del suelo está saturada, pero las capas inferiores no lo están, la tensión matricial es cercana a cero. Esto hace que el potencial hidráulico sea positivo ( $h > 0$ ), equivalente al potencial gravitacional, y la conductividad hidráulica sea alta en la capa superficial saturada. A medida que el frente de mojadura avanza en profundidad durante la precipitación, la tensión matricial tiende a cero en todo el perfil saturado y el potencial hidráulico aumenta. El potencial matricial es cero en el nivel freático (al estar en condiciones de saturación) y el ascenso del agua muestra la capacidad capilar y retención del suelo. La conductividad hidráulica está fuertemente relacionada con el contenido de humedad del suelo para un perfil dado. Existe una relación inversa entre el potencial matricial y la conductividad hidráulica frente al contenido de humedad del suelo (Fig. 2, Fig. 3). Así, cuando todos los poros están saturados, como sucede después de una precipitación en la zona superficial del suelo, la conductividad hidráulica es máxima mientras que el potencial matricial tiende a cero (Kunkel y Tindal, 1999).

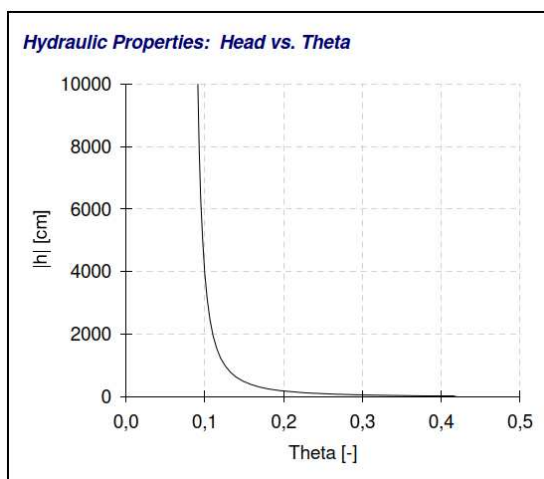


Figura 2 Relación  $\Psi$  vs  $\theta$  para un punto en un perfil de textura areno limosa. Modelización con Hydrus-1D.

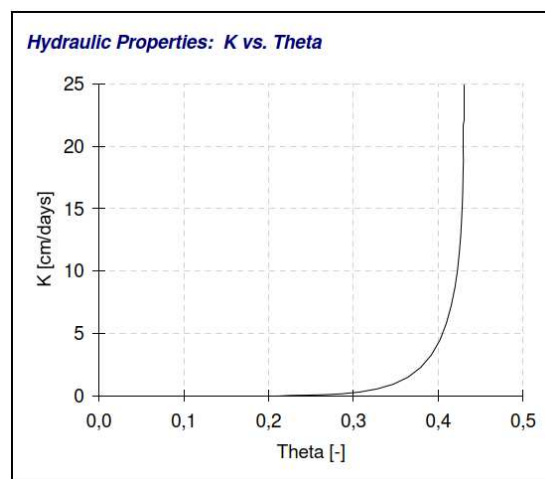


Figura 3 Relación  $K$  vs  $\theta$  para un punto en un perfil de textura areno limosa. Modelización con Hydrus-1D.

#### 4.1.1 Ecuaciones para la parametrización de los PHS

En la ZNS y el suelo, la conductividad hidráulica varía con el contenido en agua, y este no es constante. Por ello, los modelos hidrológicos de balance agua en el suelo se describen a través de la ecuación de Richards ( $L^3/L^2T$ ) (Eq. 6) que relaciona la ley de flujo de Darcy-Buckingham (Eq. 4) con la conservación de la masa (Eq. 5) (Celia et al., 1990):

$$(Eq. 4) \quad q = -K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} = -K(\theta) \frac{\partial}{\partial z} (\psi + z)$$

$$(Eq. 5) \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} q$$

$$(Eq. 6) \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[ K \frac{\partial h}{\partial z} \right] = -\frac{\partial}{\partial z} \left[ K \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{\partial z}{\partial z} \right) \right] = -\frac{\partial}{\partial z} \left[ K \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

donde  $t$  es el tiempo;  $h$  el potencial hidráulico igual a la suma del potencial de presión  $\Psi$  y del potencial gravitacional,  $z$  la coordenada vertical,  $q$  el flujo,  $K(\theta)$  la conductividad hidráulica como una función del contenido volumétrico de agua  $\theta$ . Debido a la dificultad de obtener una solución analítica de esta ecuación se emplean métodos numéricos como herramientas de aproximación. (Gottardi y Venutelli, 1993; Martínez et al., 2013).

El uso de la ecuación de Richards requiere un conocimiento profundo de las funciones hidráulicas (que son únicas para cada suelo): la retención de humedad del suelo que relaciona el contenido de agua  $\theta$  con el potencial hidráulico ( $h$ ) y la conductividad hidráulica  $K$ . Estas funciones características describen el contenido de agua o la  $K$ , como funciones de la tensión del agua del suelo (potencial matricial). No obstante, la determinación en laboratorio o *in situ* de estas funciones es costosa, difícil o inalcanzable en escalas espaciales más grandes por lo que se emplean métodos indirectos para su aproximación a partir de datos de características del suelo como la textura.

### **Las funciones de pedotransferencia**

Las características del suelo que están ligadas a sus propiedades hidráulicas constituyen las llamadas funciones de pedotransferencia (PTF), las cuales permiten estimar los parámetros hidráulicos del suelo y otros parámetros relacionados como el flujo de calor, etc.

Debido a que los datos requeridos sobre las propiedades hidráulicas del suelo para trabajar con modelos de flujo transitorios en la ZNS, a menudo, no están disponibles o son difíciles de medir, se emplean las PTF para estimar los parámetros hidráulicos del suelo a partir de la información básica del suelo, como la textura del suelo, el contenido de carbono orgánico, la densidad aparente, etc. (Van Looy et al., 2017).

Sin embargo, existe una continua revisión de estas funciones (Tóth et al., 2015) debido al fracaso de muchas de ellas por los sesgos sistemáticos derivados de los diferentes métodos de medición, por ejemplo, en el efecto de los macroporos o bioporos y la pobre representación de algunas propiedades del suelo. Algunos de estos aspectos se revisarán en el siguiente apartado.

#### **4.1.2 La escala espacial, la importancia de comprender los Procesos Hidrológicos del Suelo en la Zona No Saturada y la retroalimentación climática a escala cuenca**

La Zona No Saturada contiene menos del 0,05% del agua dulce total de la Tierra. A pesar de esto, en esta zona ocurren procesos importantes que afectan al ciclo hidrológico y a los ecosistemas. Por ejemplo, la evapotranspiración puede afectar hasta el 60% de la precipitación total. Es importante entender que los procesos del suelo a nivel de pedón y a nivel de cuenca son diferentes, pero que interactúan entre sí. Las propiedades y características del suelo a nivel de pedón pueden influir en procesos climáticos más amplios a nivel de cuenca (Vereecken et al., 2022).

Actualmente existen PHS en la ZNS a escala de pedón que no se comprenden (ni se modelizan) bien, tales como: la redistribución de la humedad del suelo a través de las raíces, la interfaz de la raíz-suelo en periodos secos, la infiltración y los bioporos/macroporos, los cambios en la cubierta vegetales y la retroalimentación con las aguas subterráneas. Todos estos aspectos, junto a características como la estructura del suelo, el uso del suelo y la vegetación, se relacionan entre sí y se retroalimentan. Son procesos que deben ser comprendidos a pequeña escala, pero que impactan en la retroalimentación climática y almacenamiento de agua a escala cuenca, regional y continental (Vereecken et al., 2022). La predicción de eventos extremos como sequías e inundaciones depende de una buena comprensión de estos procesos (Coumou y Rahmstorf, 2012).

#### **Aspectos para comprender mejor los PHS a escala de pedón**

La humedad del suelo no se distribuye de manera uniforme en la zona de raíces debido a la alternancia de la infiltración y evaporación en la superficie del suelo. La distribución de raíces y agua en esta zona afecta la absorción total de agua por las raíces. Está demostrado que las

raíces pueden redistribuir el agua de zonas húmedas del suelo a zonas secas a través de las raíces. Estos procesos son impulsados por gradientes de potencial hidráulico y dependen de las propiedades hidráulicas del suelo y las raíces (Katul y Siqueira, 2010).

Las parametrizaciones de las propiedades hidráulicas de las raíces en los modelos hidráulicos utilizan una serie de suposiciones y simplificaciones. Por ejemplo, la absorción de agua por las raíces profundas no aumenta con la longitud de la raíz. Por lo que la absorción de agua por las raíces está sobreestimada (Landsberg y Fowkes, 1978). Además, se ha visto que cuando el suelo se seca y tanto las raíces como el suelo se contraen, la conductividad hidráulica en la interfase raíz-suelo disminuye debido a la pérdida de contacto con el suelo (Carminati et al., 2013). A su vez, las propiedades del suelo y el clima están relacionadas con las propiedades de la vegetación y la humedad del suelo en la zona de raíces. La infiltración de la escorrentía superficial y el ascenso capilar del agua subterránea contribuyen a este estado de humedad. Así, un estudio ha determinado que la profundidad del nivel freático es importante para predecir la distribución de las raíces (Ying et al., 2017).

Por otro lado, en regiones áridas y semiáridas, la destrucción de agregados y la formación de costras por salpicaduras de lluvia en suelos con poca vegetación reducen la capacidad de infiltración y aumentan la escorrentía superficial. En cambio, en zonas con vegetación y macroporos creados por las raíces y fauna del suelo, la capacidad de infiltración es mayor y hay menos pérdidas de agua por evaporación en la superficie del suelo (Robinson et al., 2019).

Los cambios en la vegetación y la cubierta terrestre afectan el intercambio de agua, energía y carbono entre la superficie terrestre y la atmósfera. La reducción de la cubierta vegetal aumenta la evaporación del suelo. Dado que el agua tiene que recorrer una mayor distancia para llegar a la superficie donde se evapora, el almacenamiento de agua que puede agotarse por evaporación es menor que el que puede extraer una planta. Por lo tanto, una disminución en la cubierta vegetal conduce a una disminución en las pérdidas por evapotranspiración y un aumento en la recarga y escorrentía de aguas subterráneas (Vereecken et al., 2022).

### **Retroalimentación climática a gran escala**

En grandes ámbitos espaciales, como cuencas y regiones, se da una interdependencia entre los usos del suelo, sus modificaciones y la retroalimentación con el sistema climático. Por

ejemplo, un aumento en la humedad del suelo puede generar eventos de precipitación en áreas más secas. Además, la intensificación de la actividad agrícola en grandes extensiones mediante riegos puede disminuir la temperatura a nivel regional debido a una mayor evapotranspiración y cambios en el transporte de humedad atmosférica (Mueller et al., 2015).

Estas variaciones de la humedad pueden ser más persistentes en el tiempo que la causa que las origina. Por ejemplo, se ha demostrado que hay una fuerte correlación entre las olas de calor y la intensidad de las sequías en el Mediterráneo (Zittis et al., 2014).

Por otro lado, los Procesos Hidrológicos del Suelo a escala de pedón son fundamentales para controlar y modular los eventos extremos. Por ejemplo, los cambios en la tasa de infiltración del suelo, la pérdida de porosidad y la disminución de la materia orgánica pueden aumentar la probabilidad de inundaciones y erosión del suelo a gran escala. Sin embargo, las inundaciones en grandes cuencas están más relacionadas con precipitaciones menos intensas pero duraderas y el grado de saturación del suelo (Blöschl et al., 2015; Roger et al. 2017).

A su vez, los eventos extremos pueden cambiar las propiedades del suelo en la zona de raíces y modificar sus procesos hidrológicos. Por ejemplo, una sequía duradera puede crear macroporos en el suelo. A su vez, un evento de alta intensidad de precipitación podría sellar el suelo, disminuyendo su porosidad y la infiltración, lo que generaría mayor escorrentía y erosión del suelo (Vereecken et al., 2022).

En resumen, estos estudios indican que es necesario una mejor comprensión de los PHS a escala local (de pedón o de campo) para poder comprender las retroalimentaciones climáticas a gran escala (cuenca o regional) (Vereecken et al., 2022).

## **4.2 Técnicas *in situ* y proximales para la medición de la humedad (HS) y la modelación/evaluación de los procesos hidrológicos del suelo (PHS).**

### **4.2.1 Técnicas *in situ* y proximales**

El contenido de agua en el suelo se puede determinar de forma directa, como con la técnica gravimétrica, o de forma indirecta usando instrumentación específica, como las técnicas eléctricas, electromagnéticas, nucleares, tensiométricas o higrométricas. Los métodos

proximales son técnicas no invasivas que permiten la medición en una escala de campo. A continuación se describen las técnicas a partir del trabajo de Bittelli (2011).

### **Técnicas directas**

La técnica gravimétrica: mide el contenido de agua en el suelo. Se toma una muestra, se seca y se pesa. La diferencia de peso es el contenido de agua. No es automático y requiere 24 horas. Mide el contenido de agua en porcentaje de masa del suelo seco.

### **Técnicas indirectas**

#### **a) Sondas eléctricas y electromagnéticas**

- El Reflectómetro en el Dominio del Tiempo (TDR) mide el contenido volumétrico de agua en el suelo. Utiliza un impulso eléctrico y ofrece mediciones rápidas y precisas. El registro de datos se puede automatizar. Requiere calibración. Tiempo de respuesta < 1 min.
- La Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR) mide el contenido volumétrico de agua en el suelo. Utiliza una señal eléctrica de alta frecuencia y requiere calibración. El registro de datos se puede automatizar (Schilardi et al., 2015). Tiempo de respuesta < 1 min.
- Capacitancia: utiliza un circuito oscilador que genera una señal eléctrica que varía según la capacitancia del suelo, que a su vez, depende de la constante dieléctrica y por tanto de la humedad. Ofrece mediciones rápidas y continuas.
- El Georrádar (GPR) se emplea para mediciones a escala campo. Transmite señales electromagnéticas de alta frecuencia al subsuelo de manera no invasiva. Puede colocarse en el suelo, plataformas móviles, aerotransportadas o satélites. Mide el tiempo recorrido de una señal electromagnética para estimar la permitividad dieléctrica del suelo y luego transformarla en contenido volumétrico de la HS una vez calibrada (Babaeian et al., 2019).
- La Tomografía Eléctrica (ERT) es una técnica geofísica para estudiar el subsuelo. Determina la distribución de la resistividad con alta resolución espacial y se utiliza para la caracterización estratigráfica del subsuelo. Se emplea para mediciones a escala de campo y el proceso de adquisición de datos está totalmente automatizado.



## **b) Sensores nucleares**

- La dispersión de neutrones es una técnica no invasiva que utiliza una fuente radiactiva para medir el contenido volumétrico de agua en el suelo. Puede considerarse la técnica indirecta más precisa una vez calibrada. Ofrece mediciones rápidas pero no continuas y requiere medidas de seguridad. Tiempo de respuesta: 1-2 min.
- La atenuación gamma utiliza una fuente radiactiva para medir el contenido volumétrico de agua en el suelo. Ofrece mediciones rápidas pero no continuas y requiere medidas de seguridad. El registro de datos se puede automatizar. Tiempo de respuesta < 1 min.
- La resonancia magnética nuclear (MRI) utiliza un campo magnético para medir el contenido volumétrico de agua en el suelo. Ofrece mediciones precisas y continuas, pero es costosa y compleja. El registro de datos se puede automatizar. Tiene una escala espacial de unos pocos metros. Tiempo de respuesta < 1 min.

La atenuación de neutrones, gamma y resonancia magnética nuclear se pueden utilizar en un vehículo o avión para medir la humedad del suelo a diferentes profundidades mientras recorre el área de interés (Plata, 2011).

## **c) Otras técnicas**

- La técnica tensiométrica mide directamente la tensión matricial del suelo. Utiliza un tubo con un extremo poroso que se introduce en el suelo y se llena de agua. Ofrece mediciones válidas para suelos húmedos y es posible automatizarlo con transductores de presión. Mide el potencial matricial del suelo y el tiempo de respuesta es aproximadamente 2-3 horas.
- La técnica higrométrica utiliza la relación entre el contenido de humedad en materiales porosos y la humedad relativa de la atmósfera inmediata. La temperatura de la superficie del suelo se puede utilizar como indicador del contenido de humedad. Mide el potencial hídrico y el tiempo de respuesta es aproximadamente < 3 seg.

Para la escala de campo entre 10 y 100.000 m<sup>2</sup> se emplean métodos geofísicos como ERT y GPR. Para la escala puntual (área menor de 0,1 m<sup>2</sup>) los métodos más empleados son los sensores dieléctricos y las sondas de neutrones. Los sensores dieléctricos permiten la automatización para la obtención de datos de forma continua aunque comportan dificultades para suelos arcillosos y salinos (Bittelli, 2011).

#### 4.2.2 Sensores *in situ* y redes de monitoreo inalámbricos

Las redes de monitoreo son la parte instrumental de las redes de observación. Consisten en una serie de sensores e instrumentos colocados en el terreno para recopilar datos sobre la humedad del suelo, otros parámetros hidrológicos y meteorológicos. Las redes están distribuidas espacialmente para la monitorización de las condiciones físicas del entorno. Actualmente, en su mayoría son inalámbricas, y envían los datos a una centralita.

Las redes de monitoreo se emplean para la validación de resultados de la HS de los sensores remotos, evaluar las tendencias climáticas a nivel regional y mundial (Babaeian et al., 2019), evaluar la modelización a escala local y cuenca, así como para validar los datos mundiales sobre el clima como, por ejemplo, los producidos a través de la Iniciativa sobre el Cambio Climático de la Agencia Espacial Europea (ESA) ([tereno.net](http://tereno.net)).

La poca profundidad de penetración en el suelo de los sensores remotos (unos pocos mm para sensores ópticos y unos pocos centímetros para los sensores de microondas) hace indispensable aplicar técnicas mediante sensores *in situ* para la calibración y evaluación de la información obtenida (Dumedah et al., 2015).

Así, las redes de monitorización se están empleando para mejorar la comprensión de los RRHH disponibles a escala cuenca ([tereno.net](http://tereno.net)), en aspectos como:

- La parametrización y validación de los modelos hidrológicos a escala cuenca y la modelización inversa de estas (se trata en el siguiente apartado).
- La evaluación de los resultados de la HS obtenidos a partir de los sensores remotos.
- La calidad y cantidad de información utilizada para la modelización a escala cuenca

Las desventajas actuales de las redes de sensores inalámbricos, distribuidas para obtener datos en varios lugares de un campo o una cuenca hidrográfica (Bittelli, 2011) son las siguientes:

- Se requiere calibrar los sensores para utilizarlos en distintos tipos de suelo.
- Las metodologías no están estandarizadas.
- La medición de la HS por el sensor solo se obtiene para áreas de suelo muy pequeñas (medición puntual).

Para obtener resultados confiables se necesita un buen grado de precisión en los datos y que las curvas obtenidas sean representativas de la unidad de estudio. La tabla 1 muestra la

extensión y resolución de algunas de las técnicas descritas en la revisión. El término "extensión" se refiere a la cobertura general y "Resolución/Soporte" al volumen o área de integración del modelo o medición.

Tabla 1 Escalas para los sensores. Tabla adaptada de Babaeian et al. (2019)

<b>Instrumento/red</b>	<b>Resolución/Soporte</b>	<b>Extensión</b>
Sonda de neutrones	Esfera (radio 15–40 cm)	1–20 m
Conjunto de sensores TDR	Radio de ~3 cm alrededor de la guía de ondas	1–20 m
TDR móvil invasivo	Radio de 3 cm alrededor de la guía de ondas	10 m a 1 km
EMI	0,5–2 m <sup>3</sup>	10 m a 10 km
GPR	0,5–2 m <sup>3</sup>	10 m a 10 km
Red de sensores	Radio de ~3 a 10 cm alrededor de los sensores	10 m a 10 km
Sensores remotos aerotransportados	1–100 m	50 m a 100 km
Sensores remotos satelitales	10 m–40 km	1–1000 km

Muchas redes han sido incorporadas a redes nacionales e internacionales. Por ejemplo, la Red Internacional de Humedad del Suelo (*International Soil Moisture Network*, ISMN) (<https://ismn.earth/en/>) incorpora información de redes de Estados Unidos, Europa, África, Asia y Australia. Son, por tanto, redes que procesan un gran número de datos, generando no solo los datos *in situ*, sino que además ofrecen productos derivados de los sensores remotos para la HS. Por este motivo, en muchos casos estas redes son a su vez centros de adquisición de datos para su uso público (*dataset* de ISMN) (<https://ismn.earth/en/>).

### 4.2.3 Evaluación y modelización a escala de pedón de los PHS y la ZNS

En hidrología, las variables de estado corresponden en general con las variables de almacenamiento como, por ejemplo, el contenido de humedad del suelo ( $\theta$ ), o también variables termodinámicas como la temperatura. Cuando se habla de los flujos del agua se refieren a los PHS (evapotranspiración, recarga acuíferos, etc.) y se parametrizan a través de ecuaciones que contienen parámetros como la conductividad hidráulica ( $K$ ). Coeficientes, estos últimos, a veces muy difíciles de medir. Los modelos matemáticos pueden basarse en índices, pueden ser conceptuales (se basan en los procesos hidrológicos relacionados en serie o en paralelo y se parametrizan hasta conseguir una solución) o físicos (se basan en ecuaciones físicas que ofrecen la solución) (Vásquez, 2022).

La forma de resolver las ecuaciones puede ser a su vez analítica, que en hidrología no siempre ofrece soluciones, o soluciones numéricas, por ejemplo, a través del modelo computacional. Existen varias herramientas de este último tipo disponibles para el modelado de flujo en la ZNS (<https://groundwater.ucanr.edu/>). Algunas de las herramientas *Software* de modelado de la ZNS que se emplean ampliamente y son de dominio público/gratuito:

- HYDRUS-1D - Elemento finito 1D, saturado/no saturado, flujo, transporte y calor.
- VS2DI (USGS) - Diferencia finita 2D, flujo no saturado y transporte, flujo de calor.

También se pueden adquirir herramientas comerciales:

- HYDRUS-2D : elemento finito 2D, saturado/no saturado, flujo, transporte y calor.
- HYDRUS-2D/3D: elemento finito completamente 3D, saturado/no saturado, flujo, transporte y calor.
- MODFLOW: con flujo no saturado y multifásico.

El calibrado del modelo y su evaluación se realiza a través de información obtenida mediante observaciones reales, sensores *in situ* e incluso sensores remotos (Jingxin, 2022). Empleando estos datos reales se realiza la comparación con los valores simulados calculando estadísticos; el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el error cuadrático medio (RMSE), el sesgo etc. y también de forma gráfica empleando series de tiempo (Cabrera, 2012). Para la calibración se puede emplear el método de prueba-error modificando los parámetros del modelo, el modelado inverso o programas con algoritmos de optimización que ajusten el calibrado como hace, por ejemplo, el programa PEST.

### **4.3 Técnicas emergentes para la medición de la HS y la evaluación/modelización de los PHS a escala cuenca**

Las técnicas de sensores remotos satelitales y aerotransportados, las redes de observación, que incluyen las redes de monitoreo *in situ*, la ciencia ciudadana y las llamadas ciberinfraestructuras están emergiendo como herramientas poderosas para estimar y caracterizar los procesos hidrológicos del suelo a escala cuenca. Los sensores satelitales pueden proporcionar datos discretos multiespectrales y microondas de forma periódica y regular (espacial y temporal) que se pueden utilizar para monitorear los cambios en la humedad del suelo. Las redes de monitoreo *in situ* y en general las redes de observación y la ciencia ciudadana permiten disponer de datos reales para evaluar los datos de sensores remotos, evaluar modelos a escala de pedón y validar los modelos hidrológicos a escala cuenca. Las ciberinfraestructuras incluyen las infraestructuras tecnológicas necesarias para respaldar la recopilación, la gestión y el análisis de grandes cantidades de datos generados por estas técnicas. El enfoque de análisis de datos para el modelado hidrológico y la modelación por inteligencia artificial a través del aprendizaje automático brindan nuevas y prometedoras oportunidades. En el contexto del cambio climático, la integración de estas técnicas emergentes proporciona un instrumento prometedor para la gestión de los recursos hídricos a escala cuenca (Vereecken et al., 2022).

#### **4.3.1 Los sensores remotos (SR)**

Hay dos tipos de sensores remotos que se pueden usar para inferir de forma indirecta la HS y los parámetros relacionados con los PHS dependiendo la banda espectral que empleen. Cada familia de bandas y sus combinaciones ofrecen respuestas que emplean diferentes métodos para su evaluación. A su vez plantean limitaciones diferentes según la rugosidad, cobertura vegetal, penetración atmosférica, profundidad en el suelo, etc. Los sensores se clasifican como ópticos e infrarrojos térmicos y sensores de microondas. A su vez, los sensores remotos pueden ser satelitales o aerotransportados (Babaeian et al., 2019).

#### **d) Sensores remotos ópticos e infrarrojos térmicos**

Los rangos de emisión que utilizan estos sensores remotos son los EM, NIR y SWIR visibles con longitudes de onda que van desde 350 nm a 2500 nm, que se utilizan para inferir la HS a partir de la información de reflectancia espectral de la superficie. Se clasifican en sistemas de imágenes multiespectrales e hiperespectrales según la cantidad de bandas espectrales utilizadas en el procesado de las imágenes. Las bandas ópticas tienen mal desempeño frente a la nubosidad. Además, la reflectividad del suelo varía según las propiedades del suelo como, por ejemplo, el contenido de materia orgánica, textura del suelo, salinidad, vegetación, etc.

En cambio, los sensores hiperespectrales pueden brindar mejor desempeño en áreas de características heterogéneas debido a que sus bandas son más estrechas y tienen una mayor resolución espacial (Babaeian et al., 2019). Algunos de los satélites más empleados son la serie *Landsat* y el *Sentinel-2*.

*Landsat 8* y *9*, son satélites multiespectrales de 11 bandas operados por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Se emplea para el monitoreo del uso del territorio a escala regional y local, para el apoyo a la respuesta y evaluación de desastres y el monitoreo del uso del agua. Su resolución espacial es de 15, 30 o 100 metros y su resolución temporal de 16 días (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/#>).

*Sentinel-2*, es un satélite multiespectral de 13 bandas operado por la Agencia Espacial Europea (ESA), dentro del programa COPERNICUS. Su misión, además de vigilar el crecimiento-evolución de la masa vegetal de la Tierra, se emplea para monitorear las variaciones de las condiciones de la superficie terrestre y la observación de las selvas. Su resolución espacial es de 10, 20 o 60 metros y su resolución temporal de 5 a 10 días (<https://www.copernicus.eu/es>).

Las diferentes combinaciones de las bandas ópticas e infrarrojas permiten trabajar con unos índices que se emplean para inferir el contenido de humedad del suelo. Estos índices se determinan partiendo de información ofrecida, por ejemplo, de los satélites *Landsat* y *Sentinel-2*. Se emplean en combinación con los sensores infrarrojos térmicos que permiten estimar la temperatura de la superficie del suelo (Babaeian et al., 2019). Las sondas ópticas y multiespectrales o hiperespectrales alcanzan una profundidad de unos pocos milímetros en el suelo (dependiendo del tipo de cobertura, etc.). Por este motivo la mayoría de los índices que se emplean están referidos a la humedad (nivel de clorofila) de la vegetación y la temperatura. Los índices son ampliamente usados para seguimiento de las condiciones de estrés en

agricultura, detección de riegos ilegales, sequía, erosión de laderas y consecuencias de incendios forestales. Estos índices varían generalmente del -1 a 1, por lo que son valores que necesariamente deben ser evaluados y calibrados para los cultivos tipo y suelos tipo. El indicador que más se emplea es el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), siendo también interesantes los índices *Normalized Difference Moisture Index* (NDMI) y *Normalized Difference Snow Index* (NDSI) (<https://eos.com/es/>).

Entre otros métodos de evaluación de datos de la HS para la validación a escala cuenca se emplea la metodología del triángulo/trapezoidal que relaciona el NDVI con el espectro térmico para así realizar ajustes más precisos. El procedimiento consiste en ubicar la posición relativa de un píxel de una imagen satelital en una gráfica de temperatura de brillo de la superficie vs. Índice NDVI. En trabajos previos, la metodología fue contrastada con humedades puntuales de superficie (empleando el método gravimétrico) de una parcela experimental, obteniendo resultados aceptables (Zimmermann y Chiarito, 2000). Actualmente existen otras propuestas novedosas como el modelo trapezoidal que ha sido aplicado a las observaciones de *Landsat* y *Sentinel-2* (Sadeghi et al., 2017).

Los productos disponibles para estos satélites se suministran en los centros de datos de las propias agencias espaciales, Copernicus Open Access Hub de la ESA (<https://scihub.copernicus.eu/>) para el *Sentinel-2* y Earth Explorer del USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Estos productos se ofrecen con diferentes niveles de procesado, desde el nivel 0 (datos en bruto), hasta el nivel 2, que incorpora las correcciones geométricas (adaptación a los mapas geográficos) y de relieve (ortorrectificación) y las correcciones atmosféricas (Esa Copernicus, 2018). En general, el tipo de producto que suministran los satélites es una imagen de tipo ráster, donde a cada píxel se le asigna uno o varios valores según la energía recibida por el sensor. La adquisición de datos de la mayoría de satélites puede ser bajo pedido y, por tanto, con un costo económico, para lo cual el usuario debe especificar una serie de parámetros básicos como la zona de estudio, ventana de adquisición, porcentaje de nubes, nivel de procesado, etc. (García et al., 2012).

#### **e) Sensores remotos de microondas pasivos y activos**

Las bandas que emplean estos sensores son la X (8–12 GHz), C (4–8 GHz), L (1–2 GHz), P (0,3–1 GHz), K (8–18 GHz) y Ka (12–26,5 GHz). Estos sensores tienen unas profundidades de medición de 1,25–15 cm para suelos desnudos, 0,5–20 cm para suelos agrícolas y

pastizales y 0,25–3 cm para suelo de tipo bosque. Una de las ventajas de este tipo de sensores es que no son apenas sensibles a las perturbaciones atmosféricas y nubosas. Son, en cambio, muy sensibles a la rugosidad del suelo (Babaeian et al., 2019).

Los SR de microondas, pueden ser pasivos, que dependen de los rayos solares que rebotan en el objetivo como ocurre, por ejemplo, con el radiómetro, o activos, que irradian su propia señal al objetivo y miden la cantidad rebotada por lo que no depende de la radiación solar, como ocurre con el radar y el LIDAR (Light Detection and Ranging). Un LIDAR es un dispositivo que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado. La distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada. Actualmente son los instrumentos con mayor potencial para el monitoreo a gran escala para estimación de la HS. Comparativamente, los productos basados en microondas son más avanzados que los productos basados en ópticos e infrarrojos térmicos para grandes escalas (Babaeian et al., 2019). Algunos de los satélites más empleados para inferir la HS son el *Sentinel-1*, *SMOS* y *ASCAT*.

*Sentinel-1*, es un satélite radar que emplea la banda C (5,4 GHz) operado por la ESA, dentro del programa COPERNICUS. Su resolución espacial es de 5 a 40 metros y su resolución temporal de 12 días (<https://www.copernicus.eu/es>).

*SMOS*: es un satélite emplea la banda L (1,4 GHz) de la Agencia Espacial Europea (ESA) que utiliza un radiómetro para medir la humedad del suelo y la salinidad del océano. Al mapear constantemente estos dos componentes importantes en el ciclo del agua, *SMOS* está mejorando la comprensión de los procesos de intercambio entre la superficie de la Tierra y la atmósfera y está ayudando a mejorar los modelos meteorológicos y climáticos. Su resolución espacial es de 36 kilómetros y su resolución temporal de 1 a 3 días (<https://www.copernicus.eu/es>).

*ASCAT*, es un dispersómetro avanzado que emplea la banda C (5,3 GHz). Proporciona datos para aplicaciones terrestres y para el hielo, como, por ejemplo, la extensión del hielo marino, el límite del permafrost y la desertificación. Se emplea, además, para proporcionar información sobre la humedad del suelo en la zona de las raíces y la humedad en la superficie del suelo. Su resolución espacial es de 25 kilómetros y su resolución temporal de 1 a 2 días (<https://www.esa.int/>).



La Iniciativa contra el Cambio Climático de la Agencia del Clima de la ESA incorpora la humedad del suelo como Variable Climático Esencial (<https://gcos.wmo.int/>). Dispone de un banco de datos sobre información de la humedad del suelo que incorpora el histórico de datos de satélites de microondas de diferentes agencias (<https://www.esa.int/>). Ofrece una buena calidad en los datos suministrados debido a que se compensan las limitaciones y desviaciones de los datos ofrecidos por unos sensores con otros. Aun así, debe tenerse en cuenta que suministra información con resoluciones espaciales de más de 25 km.

En cambio, los datos del *Sentinel-1*, se suministran como productos con procesado de nivel 1, donde el usuario, a través de un software que propone la agencia, puede aplicar los filtros que considere más precisos para su investigación (ESA Copernicus, 2018).

Sumado a estos satélites mencionar el *Grace-FO*. Este es un satélite de la ESA que emplea la gravimetría satelital mediante las bandas K (24 GHz) y Ka (32 GHz). Este satélite puede ofrecer información para la estimación de la HS a una profundidad de 3-50 cm. Se emplea para realizar estimaciones cuantitativas de diferencias de masa de agua en la Tierra (terrestre, polar y glaciario). Estima el almacenamiento total de agua en el suelo a nivel regional-continental, desde cambios en las aguas subterráneas en acuíferos profundos hasta cambios en la humedad del suelo y aguas superficiales (<https://earth.esa.int/>). Su resolución espacial es de 300 kilómetros y su resolución temporal de 30 días. Es, por tanto, un instrumento que permite el análisis a gran escala para la variación del agua subterránea y estudiar sus anomalías (Humphrey et al., 2016) y, así, comprender las respuestas al cambio climático (Tapley et al., 2019). Recientes estudios, por ejemplo, han conseguido cuantificar las sequías severas de Europa Central de los años 2018 y 2019 (Boergens et al., 2020).

#### **f) Sensores aerotransportados**

Los sensores ópticos, térmicos y de microondas pueden ir colocados y transportados en aviones o vehículos aéreos no tripulados. El empleo de sensores aerotransportados ha tenido un gran desarrollo en la precisión de datos de agricultura en el caso de sensores multiespectrales (Gómez et al., 2016). A su vez, la aplicación de sensores remotos de microondas aerotransportados de baja frecuencia (medición más profunda) para la estimación de la HS ha sido un ámbito de extensa investigación en los últimos años. En las frecuencias de microondas de banda más bajas (P), la señal penetra a profundidades mayores del suelo, lo que permite la estimación de la HS del perfil. Esto es de gran importancia para muchas

aplicaciones agrícolas, hidrológicas y meteorológicas y que es fundamental para la gestión estratégica de los recursos hídricos (Babaeian et al., 2019). Sus limitaciones temporales, su alta resolución espacial y el alto coste de las operaciones tripuladas frente a los productos que proporcionan los satélites hacen que esta tecnología sea menos competitiva para la medición de la HS a escala cuenca. Sin embargo, puede resultar útil como herramienta complementaria al enfoque de asimilación de datos cuando fallan las combinaciones de HS superficial y subsuperficial basado en los satélites (Kumar et al., 2009).

Las ventajas que ofrecen los sensores aerotransportados son las siguientes (Gómez et al., 2016; Babaeian et al., 2019):

- Una alta resolución espacial que consigue generar píxeles de los productos ráster de pocos centímetros.
- Colocación del sensor que se considere más oportuno.
- Generalmente no requiere de corrección atmosférica.
- Bajo coste de las operaciones si se emplean vehículos aéreos no tripulados.
- La aplicación de los sensores aerotransportados resulta interesante para realizar el seguimiento de episodios puntuales como, desastres, incendios y la contaminación de aguas superficiales.

En cambio, hay una serie de desventajas que hay que tomar en consideración:

- Genera problemas comparativos entre datos obtenidos en días nublados y radiantes.
- Frente a la resolución temporal periódica de los satélites, los sensores aerotransportados obtienen datos según los programas temporales de operaciones en los que se empleen.
- El coste de la operación en vehículos tripulados es muy elevado frente al coste de los productos satelitales.
- La gran resolución espacial de pocos centímetros puede no ser necesario para evaluar la HS a escala cuenca.

#### **4.3.2 Ciencia ciudadana y redes de observación**

Las redes de observación permiten recopilar y proporcionar datos relevantes sobre observaciones hidrológicas del suelo *in situ* y a largo plazo. Esta es una escala temporal

necesaria para poder comprender el impacto antropogénico en los PHS. Estas redes, integradas a menudo en redes nacionales (Cosh et al., 2021) tienen un enfoque multidisciplinar y multiescala como, por ejemplo, la red Tereno (Bogena et al., 2018). Incorporan la información de las redes de monitoreo *in situ*, datos ambientales, datos de sensores remotos como es el caso de la Red Internacional de Humedad del Suelo (*International Soil Moisture Network*, ISMN) y la información proporcionada por la técnica de ciencia ciudadana. Las redes de observación para datos hidrológicos del suelo más interesantes son, la ya mencionada ISMN, los Observatorios de Zonas Críticas (*Critical Zone Observatories*) (<https://czo-archive.criticalzone.org/national/>), la Red Nacional de Observatorios Ecológicos (*National Ecological Observatory Network*) ([https://www.nsf.gov/news/special\\_reports/neon/](https://www.nsf.gov/news/special_reports/neon/)), la Red de Investigación de Ecosistemas Terrestres (*Terrestrial Ecosystem Research Network*) de Australia (<https://www.tern.org.au/>) y el Centro Mundial de Datos de Escorrentía (*Global Runoff Data Centre*, GRDC) (<https://www.bafg.de/GRDC/>) (Vereecken et al., 2022).

La ciencia ciudadana es un campo de rápido crecimiento que permite al público contribuir a la investigación científica mediante la obtención, recopilación y el análisis de datos. En el contexto de la humedad del suelo, la ciencia ciudadana se puede utilizar para medir estos parámetros a escala cuenca. Esto se logra implicando a un gran número de personas para recopilar datos utilizando herramientas simples y de bajo costo y luego cargando estos datos en una base de datos central para su análisis. Esta técnica puede recolectar datos de calidad de la humedad del suelo con una gran distribución espacial. Podría emplearse también para proporcionar un extenso conjunto de datos de observaciones de humedad del suelo *in situ* que permitan validar productos de la HS basados en satélites (Vereecken et al., 2022).

Esta técnica, propiciada con los avances tecnológicos asequibles (dispositivos móviles, etc.) y la accesibilidad a las plataformas de visualización y alimentación de datos, permite, no solo alimentar las redes de observación, sino que pueden ser un mecanismo de participación de la población junto con las administraciones locales y regionales. Esta herramienta puede incluirse también en los sistemas de educación implicando y concienciando al alumnado en materias sobre el medioambiente y en los efectos del cambio climático (Peralta de Andrés, 2017).

### 4.3.3 Análisis de datos, ciberinfraestructuras y *Big Data*

La ciberinfraestructura se refiere a la infraestructura tecnológica necesaria para respaldar la recopilación, la gestión y el análisis de grandes cantidades de datos. El llamado “internet de las cosas” (IoT en inglés) permite a través de un creciente acceso a internet y otras redes, la recopilación de datos a tiempo real provenientes de millones de teléfonos móviles inteligentes y plataformas de investigación (Vereecken et al., 2022). Sin embargo, la gestión de Petabytes de información requiere centros de datos virtualizados y accesibles. Los nuevos datos y aquellos registrados durante décadas a menudo se infrutilizan debido a la falta de accesibilidad, incapacidad de localizar fácilmente los datos disponibles, así como la dificultad en valorar su calidad, comprender su estructura y su trazabilidad, además de las limitaciones en la capacidad de almacenamiento, métodos de procesamiento, herramientas de visualización y su difusión. Repositorios públicos como *Data and Information Access Services* del programa COPERNICUS (<https://www.copernicus.eu/>) ofrecen buenas oportunidades para poder solventar estas brechas en el futuro.

La ingente cantidad de datos, *Big Data*, muchas veces discretos e irregulares, requieren de una preparación y procesado a través de algoritmos. Como consecuencia de esto, la preparación y el empleo de estos datos requieren de aplicaciones más complejas como R y de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como QGIS o ArcGIS (Vereecken et al., 2022).

Cabe destacar que las redes neuronales o el enfoque de aprendizaje automático (Inteligencia Artificial, IA) se están empleando actualmente de manera incipiente para simular procesos hidrológicos a diferentes escalas. Además, hay un gran desarrollo de las plataformas llamadas gemelos digitales. El gemelo digital permite desarrollar modelos a través de datos históricos, de datos observados a tiempo real, datos predictivos a través del aprendizaje automático y los datos que provienen de modelos numéricos. Se espera que este tipo de plataformas puedan aplicarse a escala cuenca una vez se supere la falta de homogeneización de protocolos de acceso a datos y haya un desarrollo de pasarelas de homogeneización de datos entre los sistemas de gestión de las infraestructuras de una cuenca (embalses, estaciones de tratamiento de agua potable, estaciones depuradoras de aguas residuales, centrales hidroeléctricas, industrias demandantes de agua, pozos de abastecimiento y regadío, etc.) (<https://www.iagua.es/>).

#### 4.4 Transferencia de los modelos de PHS a escala local a la modelización y evaluación a escala de cuenca

La variación espacial y temporal de los parámetros meteorológicos (precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad de viento y humedad) y biogeofísicos (propiedades del suelo, su estructura, textura, rasgos topográficos y características de la vegetación), hacen que realizar un seguimiento dinámico de la HS o la evapotranspiración a gran escala sea complejo y difícil de obtener (Babaeian et al., 2019). Para ayudar en este trabajo los modelos hidrológicos se emplean para obtener pronósticos sobre la evolución de los RRHH y los eventos extremos de una cuenca. Se emplean también para proyectar escenarios sobre los RRHH de la cuenca a largo plazo como, por ejemplo, bajo los escenarios de cambio climático previstos en el sexto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (<https://www.ipcc.ch/>) o bajo escenarios antropogénicos como cambios de uso del suelo o proyectos de infraestructuras hídricas. Hay que tener en cuenta, que los modelos son simplificaciones de la realidad que ofrecen una hipótesis del comportamiento de una cuenca. Así, un modelo puede comportarse mejor para caudales bajos y otro para altos en una misma cuenca, o para cuencas de diferente tamaño, o subcuencas de similar extensión pero litologías diferentes. Por lo tanto, conviene calibrar y evaluar más de un modelo para obtener la mejor aproximación al comportamiento real y, con ello, tomar decisiones para el uso generalizado del modelo.

Un modelo hidrológico estudia el balance hídrico aplicando el principio de conservación de masas, es decir, la ecuación de continuidad (Eq. 7). Se expresa como:

$$\text{(Eq. 7)} \quad \frac{dS}{dt} = P - Q - E$$

Siendo S el almacenamiento, t tiempo, P la precipitación, Q el caudal de salida y E la evapotranspiración (Sokolov y Chapman, 1974).

La calibración y evaluación de estos modelos se realiza a través de datos observados como, por ejemplo, mediante aforos de los caudales de ríos de la cuenca, los datos piezométricos, los datos ofrecidos por sensores *in situ* o mediante los datos de sensores remotos. Parte de esos datos se emplea para calibrar el modelo y otra parte para evaluarlo. También se puede emplear la modelización a escala de pedón para validar los modelos hidrológicos a escala cuenca mediante la modelización inversa. El enfoque de modelización inversa utiliza los datos hidráulicos del suelo medidos como criterios de ajuste para estimar los parámetros hidráulicos

del suelo invirtiendo la ecuación que gobierna el movimiento del agua del suelo. El enfoque inverso se ha aplicado ampliamente en estudios de aguas subterráneas (Yeh, 1986). La razón es que la medición directa de las características del acuífero es mucho más difícil que en la ZNS. Kool y Parker (1988) utilizaron el algoritmo de Levenberg-Marquardt para abordar el problema inverso en flujos transitorios no saturados. Empleando el contenido de humedad y el potencial hidráulico como criterios de ajuste, determinaron simultáneamente las funciones hidráulicas del suelo durante la infiltración y redistribución en un perfil de suelo hipotético resolviendo inversamente la ecuación de Richards. Además, Jhorar et al. (2002) exploraron el uso de la evapotranspiración como criterio de ajuste en la modelización inversa mediante SWAP y el paquete de estimación PEST.

En resumen, la modelización inversa se utiliza para retrotraer los valores esperados de los parámetros (Amor y Droogers, 1988). Por ejemplo, en un punto de la cuenca donde no existan datos de campo de infiltración, se evalúa primero mediante el modelo de cuenca. Con el dato generado de infiltración se comprueba con el modelo inverso si es coherente con la información existente (tipo de suelo y características físicas). La modelización inversa sirve para comprobar si el modelo obtenido es coherente con las características existentes y esperadas empleando un modelo a escala de pedón, por ejemplo, HYDRUS.

Los PHS más importantes que se emplean para evaluar un modelo a escala cuenca son la escorrentía, evapotranspiración y la HS. Históricamente se han empleado métricas de rendimiento relacionadas con los caudales de los ríos como el *Nash Sutcliffe-Efficiency* (NSE) o el *Kling Gupta-Efficiency* (KGE) para la evaluación de modelos a escala cuenca frente a datos observados. También se emplean estadísticos como la raíz de error medio cuadrático (RMSE), el sesgo relativo (BIAS) y el Coeficiente de correlación ( $r$ ). No obstante, comienzan a emplearse también de forma combinada los datos de la HS y la evapotranspiración para la calibración y evaluación de una cuenca (Vásquez, 2022).

Los modelos pueden ser de tres tipos: agregados, semidistribuidos o distribuidos. En los modelos agregados, la cuenca se representa como una única caja y la precipitación es igual al almacenamiento, caudal de salida y la evapotranspiración. En los modelos distribuidos la cuenca se representa como un conjunto de celdas o cubos que están relacionados entre sí. La estructura del modelo puede complejizarse verticalmente al añadir almacenamientos y sus procesos a modelos como, por ejemplo, NOAH-MP y VIC, donde se representan árboles, nieve o acuíferos. También se puede complejizar horizontalmente para aumentar la interrelación entre las celdas de un modelo distribuido. Los modelos semidistribuidos son

aquellos que ofrecen una representación intermedia de la diversidad espacial entre los modelos agregados y distribuidos. Son modelos menos complejos y más fácilmente utilizables como, por ejemplo, el HEC-HMS (Vásquez, 2022).

Los modelos hidrológicos distribuidos incorporan la heterogeneidad de la cuenca definiendo un patrón espacial que debe tener en cuenta el tipo de estructura, tipo de cobertura y relieve del suelo. El patrón espacial del modelo se puede combinar con información que proviene de sensores remotos como, por ejemplo, la información de los sensores remotos de microondas para estimar la HS, los sensores ópticos e infrarrojos para la estimación de la evapotranspiración, el LIDAR para el relieve del suelo y en general la información geográfica. Una de las grandes ventajas de este tipo de información es que son productos georreferenciados, ofrecen resoluciones espaciales de metros a km y resoluciones temporales diarios e, incluso, subdiarios. Por lo tanto, el patrón espacial del modelo se define según el objetivo del análisis o la precisión en los pronósticos hidrológicos deseados para la cuenca (Vásquez, 2022).

Tal y como se revisa en el trabajo, debido a la heterogeneidad del suelo de una cuenca es necesario mejorar las PTF e incorporarlas a los modelos que las emplean para mejorar la parametrización de los PHS a escala de pedón, como ocurre con los procesos de absorción de agua por parte de las raíces, etc. (Vereecken et al., 2022).

Por último, el empleo de modelos hidrológicos distribuidos o semidistribuidos y la disponibilidad de datos e información georreferenciada permiten integrar todas estas herramientas en Sistemas de Información Geográfica como es el caso de QSWAT (<https://gidahatari.com/>).

### **Modelos hidrológicos basados en la inteligencia artificial (IA)**

La modelización hidrológica a escala cuenca se han realizado durante décadas a través de modelos matemáticos. Actualmente está emergiendo la modelización basada en la inteligencia artificial a través del aprendizaje automático (Lange y Sippel, 2020).

El aprendizaje automático permite que el usuario alimente un algoritmo informático con una cantidad ingente de datos, a partir de los cuales el ordenador analiza toda la información y es capaz de hacer predicciones basándose únicamente en los datos introducidos. La modelización basada en la IA parte de bases de datos (provenientes de la sensorización y de otros datos) y algoritmos estadísticos. La IA aporta un nuevo enfoque de generación de datos

que no es sustitutivo de los modelos numéricos, sino complementario. Para que la modelización basada en la IA tenga éxito en la predicción de un nuevo escenario, por ejemplo, propiciado por el cambio climático, el sistema debe ser entrenado con buenos datos y tantas condiciones como sea posible además de tener en cuenta eventos inusuales (Vilanova, 2023).

## **5. ESTADO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS EMERGENTES EN EL ESTUDIO DE LOS PHS A ESCALA DE CUENCA**

Partiendo del trabajo de Vereecken et al. (2022) y el análisis presentado en los apartados anteriores, los esfuerzos en la investigación necesarios para el modelado hidrológico de una cuenca se podrían sintetizar en tres campos:

1. **La mejor comprensión de los PHS en la ZNS:** (a) el modelado a escala de pedón se muestra como una herramienta útil a la hora de parametrizar mejor los PHS. (b) Estos procesos se deben transferir a los modelos hidrológicos a escala cuenca. Para ello se pueden emplear diferentes métodos como, por ejemplo, la modelización inversa empleando modelos a escala de pedón.
2. **Generación de datos de calidad:** (c) es necesaria la generación de datos suficientes y de calidad sobre los valores de estado (almacenamientos) y la correcta selección de sensores según sus limitaciones espaciales, temporales y técnicas. A su vez, debe aumentarse los esfuerzos en la integración de la información de los datos generados por sensores remotos, las técnicas de medición *in situ* y la distribución espacial del modelo hidrológico. Sumado a esto, (d) las técnicas emergentes como, la ciencia ciudadana, pueden jugar un importante papel en la generación de nuevos datos hidrológicos de calidad.
3. **Accesibilidad a la información, capacidad de procesamiento e integración de la información en las plataformas de gestión de los RRHH:** (e) la ingente cantidad de información hidrológica generada por las nuevas técnicas emergentes obliga a realizar mayores esfuerzos para facilitar el acceso a la misma y conocer su grado de calidad. El horizonte de la gestión de los RRHH a escala cuenca apunta hacia la integración de toda la información en una o varias plataformas (gemelos digitales) que, necesariamente deben disponer de pasarelas y protocolos estandarizados entre estas.



Sumado a esto, se debe realizar un mayor esfuerzo en reducir la duplicidad de modelos hidrológicos a escala cuenca, compartiendo las configuraciones de los modelos y sus datos de entrada por parte de los grupos de trabajo de los Organismos de Cuenca.

#### **a) El modelado a escala de pedón**

Como se ha visto, la buena comprensión de los PHS a escala de pedón repercute en el modelado hidrológico a escala cuenca. Para ello, pueden emplearse las curvas características del modelo a escala de pedón y realizar una validación mediante modelado inverso del modelo a escala cuenca. En primer lugar, se ha visto que se pueden obtener buenas modelizaciones a escala de pedón mediante observaciones reales. Sin embargo, existen desviaciones entre los datos observados y los modelados debido a la complejidad de los perfiles del suelo (Lexow, 2011; López, 2022; Rubio et al., 2023). Además, se ha demostrado, que modelización a escala local sirve para realizar pronósticos de eventos extremos (Corona y Ge, 2022) y proyecciones bajo los escenarios de cambio climático (Fernández et al., 2022).

Por ejemplo, el modelo HYDRUS-1D fue calibrado y evaluado utilizando potenciales matriciales y humedades volumétricas del perfil de un suelo franco-limoso ofreciendo una buena precisión para los primeros 20 cm de profundidad pero un ajuste peor para mayores profundidades. Esta desviación se pudo relacionar con el proceso de contracción-expansión de este tipo de suelos (Rubio et al., 2023).

En otro estudio, la incorporación de las oscilaciones en el nivel freático de un perfil areno-limoso mejoró la valoración de la humedad del suelo y la tensión matricial de las capas inferiores respecto a las superiores en el perfil (Lexow, 2011).

En otro trabajo se buscó evaluar el movimiento del agua en suelos de ladera cultivados con aguacate. Encontró que la pendiente y la textura del suelo influyen la distribución del agua en el suelo haciendo que a los 75 cm de profundidad exista un incremento de la humedad sin existir entrada de agua desde la superficie del suelo con un resultado de  $R^2 = 0,8-0,9$  (Kellym, 2022).

También se empleó el modelo HYDRUS para predecir la afección del cambio climático en cultivos de aceituna, viñedos y cultivos de secano en una zona mediterránea evaluando el impacto de cinco escenarios climáticos. Cuatro proyecciones basadas en el percentil 50 de la

serie de datos establecidas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático y una quinta que caracteriza al clima actual. Con estos resultados se estimó el grado de satisfacción de cada cultivo y las afecciones económicas según el rendimiento proyectado para cada cosecha (Fernández et al., 2022).

Tras un evento de precipitación extrema ocurrido en Colorado en 2013, se buscó comprender mejor la respuesta de la dinámica del subsuelo y, por tanto, entender mejor su respuesta frente a eventos como el sucedido. Calibrando el modelo Hydrus-1D con datos de campo durante 6 años se obtuvo que modelos unidimensionales pueden proporcionar estimaciones útiles de las fluctuaciones del nivel freático y las capacidades de amortiguación hídrica del subsuelo en respuesta a los eventos extremos, lo que podría ser útil para las regiones que se pueden ver afectadas por estas (Corona y Ge, 2022).

#### **b) Del modelado a escala local al modelo hidrológico escala cuenca mediante la modelización inversa**

En esta sección se verán algunos ejemplos de estudios que emplean la modelización inversa a escala pedón para validar modelos a escala cuenca o regional empleando diferentes métodos.

Un método es emplear modelos numéricos como HYDRUS. Estas se pueden utilizar tanto para problemas directos como para problemas inversos cuando algunos parámetros deben calibrarse o estimarse a partir de los datos observados. Por un lado, la calibración del modelo y la estimación de parámetros inversos se pueden llevar a cabo utilizando un enfoque local basado en gradientes o métodos de optimización global más complejos que incluyen algoritmos genéticos (Šimuněk et al., 2012).

El estudio de Amor y Droogers, (2002) concluyó que el empleo de Algoritmos Genéricos es prometedor para el problema inverso en la zona no saturada. El estudio exploró el potencial de un Algoritmo Genético para estimar inversamente las funciones hidráulicas del suelo en la ZNS utilizando datos lisimétricos de un experimento con trigo en la India. Se consideraron dos casos. Un caso numérico y un el caso experimental en el que se utilizaron los datos reales. Simultáneamente, se investigó el uso del agua del suelo, la evapotranspiración y la combinación de ambas como criterios en la modelización inversa. Los resultados mostraron que el uso del agua del suelo como criterio proporciona estimaciones más precisas de los

parámetros que el uso de la ET. Según el estudio, la ET puede obtenerse con precisión a escala regional a partir de observaciones de sensores remotos.

Se ha empleado el modelo HYDRUS para el modelado inverso del flujo en la ZNS para la estimación de la recarga de aguas subterráneas (Karamouz et al., 2022). Ese trabajo se realizó desde un enfoque espacial regional y no estacionario. Los parámetros hidráulicos del suelo se calibraron con los datos observados de una red de monitoreo a gran escala y se implementó una técnica de *kriging* (un método de interpolación que se utiliza para predecir valores en ubicaciones sin mediciones a partir de valores medidos en ubicaciones cercanas) no estacionario para proporcionar un mapa regional de recarga. La metodología se probó en 100 estaciones de la red *Oklahoma Mesonet* (EEUU) durante el período 2014-2019 y dio como resultado un valor esperado de 166 mm/año de recarga media en todo el estado y mapas de intervalos de confianza del 90%.

Por otro lado, se propuso un método de modelado hidrológico inverso para la simulación de la evapotranspiración real regional basado en las observaciones de campo. Se desarrolló y calibró una relación no lineal entre ETR y la evapotranspiración potencial para la cuenca estudiada. Los resultados indicaron que esta relación podía estimar el ETR con precisión tanto para series mensuales como quincenales, ya que el coeficiente de eficiencia NSE fue de 0,903 y 0,613, respectivamente (Zhaofei y Zhijun, 2019).

Otro estudio (Hachimi et al. 2019), evaluó las PHS de una cuenca al norte de Marruecos mediante modelado inverso. El área de estudio era de suelo arenoso y clima semiárido. Se evaluaron los parámetros hidráulicos del suelo por métodos directos e inversos a partir de mediciones de campo. El estudio demostró una alta correlación entre los valores simulados y medidos de  $R^2 \approx 0,92$  y  $RMSE \approx 0,146$ , indicando que el modelo utilizado es eficiente para estimar los parámetros hidráulicos del suelo por modelación inversa.

### **c) Limitaciones de las técnicas que emplean sensores para la medición de la HS**

Los datos de entrada de un modelo hidrológico pueden provenir de la utilización de técnicas clásicas y de la implementación de técnicas emergentes. Como se ha visto, todas ellas permiten obtener información sobre los valores de estado: humedad del suelo, evapotranspiración, masas de nieve, temperatura, el relieve de la cuenca, etc. Sin embargo, las mediciones de la HS, directas o indirectas, basadas en información de sensores tienen una

serie de límites a escala de pedón y cuenca que deben tomarse en consideración (Bittelli, 2011):

- La precisión de la medición *in situ* con sensores dieléctricos en suelos salinos y arcillosos sigue siendo problemática.
- La incertidumbre en la medición de la HS, asociada a las mediciones puntuales para diferentes sensores a escala local, aún debe ser investigada. Aun así, se han realizado algunos estudios comparativos interesantes como, por ejemplo, el estudio realizado por Blonquist et al. (2005) para la estandarización de la caracterización de sensores electromagnéticos o el estudio realizado por Bogena et al. (2007) donde se evalúan sensores de bajo costo. Estos sensores resultan interesantes para realizar redes de sensores a escala de cuencas pequeñas, por ejemplo, 500 sensores para un área de 25 ha. No obstante, según un estudio realizado por Kovácsk et al. (2019) sobre los resultados del proyecto de ciencia ciudadana GROW (ver apartado d) estos sensores de bajo costo tienen un rendimiento relativamente bueno, pero se ha identificado una desviación significativa respecto de las mediciones de laboratorio. Según ese estudio los diferentes suelos tienen diferentes relaciones entre sus constantes dieléctricas y su contenido de humedad, por lo que es necesario ajustar diferentes algoritmos de estimación a los diferentes suelos.
- Es necesario identificar las mejores técnicas para la medición de la HS a escala de cuenca y su compatibilidad con los tamaños de cuadrícula utilizados en la modelización hidrológica a dicha escala.

Las redes de monitoreo inalámbricas se distribuyen espacialmente en las cuencas y regiones para obtener una buena representación de los PHS, que como se ha explicado, varían según el tipo de suelo, etc. Se ha visto la necesidad de integrar las redes existentes, aumentar la densidad de estas y ofrecer datos de calidad. En este contexto, la Red Nacional Coordinada de Monitoreo de la Humedad del Suelo en EEUU ha implementado una estrategia para integrar diversas fuentes de información y desarrollar productos nacionales coordinados sobre la humedad del suelo (Cosh et al., 2021). Esto se hace en coordinación con el Sistema Nacional Integrado de Información sobre Sequías de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Este esfuerzo tiene como misión proporcionar información coordinada y de alta calidad sobre la humedad del suelo para el bien público. La estrategia busca establecer una “red de redes” nacional que demuestre efectivamente la coordinación operativa y de datos de las redes *in situ*. También busca apoyar la investigación y el desarrollo de técnicas innovadoras para fusionar datos de humedad del suelo *in situ* con datos hidrológicos

modelados y de detección remota para crear mapas de humedad del suelo fáciles de usar, cuadrículados y casi en tiempo real. Además, la estrategia promueve el desarrollo de una infraestructura adecuada para la integración de datos de alta calidad y considera la necesidad de aumentar la densidad de las redes en todo el país, incluyendo los esfuerzos de ciencia ciudadana. La estrategia también recomienda apoyar la investigación para desarrollar o mejorar metodologías para la recopilación, estandarización, integración, combinación y validación de datos de humedad del suelo. Por ejemplo, buscar el mejor método para realizar la interpolación (horizontal, vertical, temporal) de datos de fuentes puntuales en información cuadrículada significativa.

Un ejemplo de la integración, el empleo multidisciplinar y la multiescala de redes de monitoreo es la red TERENO en Alemania. Esta red abarca una red de observación del suelo a escala regional que se extiende desde las tierras bajas del norte de Alemania hasta los Alpes bávaros. Entre otra diversa instrumentación, emplea sondas de tipo Hydra II Sdi-12 (que mide los tres parámetros importantes del suelo simultáneamente: humedad, salinidad y temperatura) en cinco emplazamientos diferentes a profundidades entre 5 y 50 cm. Se han empleado, por ejemplo, para analizar el flujo preferencial de toda una cuenca boscosa en Alemania (Wiekenkamp et al., 2016) o mejorar las funciones de pedotransferencia (Montzka et al., 2017).

En cuanto a la información generada por los sensores remotos, se ha visto, que es una alternativa adecuada para medir las variables de entrada requeridas en los modelos hidrológicos a escala cuenca. La fiabilidad de los algoritmos de los sensores remotos para determinar con precisión la distribución espacial de la evapotranspiración, la precipitación pluvial y el uso real del suelo son en general muy aceptables. Los valores absolutos de la evapotranspiración se pueden estimar con una precisión general del 95 % (SD 5 %) y la lluvia con una precisión absoluta general del 82 % (SD 15 %). El uso de la tierra se puede identificar con una precisión general del 85 % (SD 7 %) (Karimi y Bastiaanssen, 2013).

Sin embargo, cabe señalar que existen dificultades en el empleo y evaluación de la HS dependiendo el tipo de sensor que se emplea, la cobertura del suelo, las condiciones atmosféricas, la rugosidad del terreno y si el sensor se ubica en un satélite o es aerotransportado.

Tabla 2 Resumen de ventajas y limitaciones aplicadas a los tipos de sensores óptimos, térmicos y de microondas. Tabla adaptada de Babaeian et al. (2019)

Tipo sensor	Ventajas	limitaciones
Óptico (Vis-NIR-SWIR)	<p>Amplia cobertura espacial</p> <p>Alta resolución espacial</p> <p>Potencial para aplicaciones en tiempo real</p> <p>Resultados prometedores de sensores hiperspectrales y multiespectrales</p>	<p>Profundidad de medición de superficie limitada (unos pocos milímetros)</p> <p>Perturbación de señal alta por nubes y vegetación</p> <p>Atenuado por la atmósfera terrestre.</p> <p>Baja resolución temporal</p>
Térmico	<p>Amplia cobertura espacial</p> <p>Alta resolución espacial</p> <p>Potencial para aplicaciones en tiempo real</p> <p>Fuerte correlación entre la superficie HS y la temperatura</p>	<p>Profundidad de medición de superficie limitada (unos pocos milímetros)</p> <p>Perturbación de señal alta por nubes y vegetación</p> <p>Atenuado por la atmósfera terrestre</p> <p>Perturbado por la biomasa vegetal</p>
Microondas activo	<p>Sensible a la permitividad/constante dieléctrica suelo-agua</p> <p>Amplia cobertura espacial (global)</p> <p>Profundidad de medición de superficie (varía según cobertura)</p> <p>Alta resolución espacial</p> <p>Fuerte correlación entre la HS y la potencia retrodispersada</p> <p>Retrodispersión no perturbada por nubes y componentes atmosféricos</p> <p>La retrodispersión es independiente de la iluminación solar</p>	<p>Baja resolución temporal</p> <p>Perturbación de señales por rugosidad superficial y biomasa vegetal</p>
microondas pasivo	<p>Sensible a la permitividad/constante dieléctrica suelo-agua</p> <p>Amplia cobertura espacial</p> <p>Profundidad de medición de superficie (varía según cobertura)</p> <p>Alta resolución temporal</p> <p>Temperatura de brillo no perturbada por componentes atmosféricos y nubes</p>	<p>Baja resolución espacial</p> <p>Perturbación de señales por rugosidad superficial y biomasa vegetal</p>

La información generada por los sensores remotos debe ser evaluada mediante datos reales de observaciones *in situ* para así, poder obtener la estimación de la HS. Según Babaeian et al.

(2019), se obtuvieron coeficientes de determinación de la relación entre los valores del sensor y los valores observados ( $R^2$ ) que varían según la cobertura del suelo. Son valores aportados por los satélites *SMOS*, *ASCAT*, *AMSR-2* y *AMSR-M*. Todos ellos con sensores de microondas. Las evaluaciones se realizaron mediante observaciones en redes de validación centrales nacionales, redes de validación dispersas y redes incluidas en la ISMN. La profundidad de los sensores *in situ* osciló entre 5 cm y 60 cm. Nótese en la tabla 3 como las evaluaciones en bosques ofrecen una mala correlación, mientras que las coberturas de tipo cultivo, pastizal o matorral sin otras mezclas ofrecen buena correlación. Por lo tanto, una aceptable correlación se verá influenciado por la consideración conjunta de los tipos de cobertura y la frondosidad de la vegetación. De igual manera, se debe tener en cuenta que el relieve de la zona estudiada afecta significativamente a la señal de los sensores microondas.

Tabla 3 Coeficientes de determinación de la relación entre los valores del sensor y los valores observados ( $R^2$ ) de satélites microondas. Tabla adaptada de Babaeian et al. (2019)

Sensor	Cobertura terrestre	$R^2$	Sensor	Cobertura terrestre	$R^2$
SMOS	Tierras de cultivo, pastizales, matorrales, mosaico natural	0,33–0,89	ASCAT	Pastizales, suelo desnudo, tierras de cultivo	0,44–0,92
SMOS	Cultivos mixtos, bosque, sabana, sabana	0,70–0,77	ASCAT	Pastizales, bosques, tierras de cultivo	0,48–0,54
SMOS	Pastizales, matorrales, cultivos y bosques	0,14–0,81	ASCAT	Bosque y no bosque	0,39–0,52
SMOS	Tierras de cultivo, pastizales, matorrales	0,56	ASCAT	Tierras de cultivo, pastizales, matorrales, mosaico natural	0,60–0,78
SMOS	Pastizales, matorrales, sabana	0,63–0,81	AMSR-2	Pastizales, suelo desnudo	0,40–0,80
SMOS	Tierras de cultivo, pastizales, humedales, bosques	0,28–0,82	AMSR-2	Pastizales, bosques, tierras de cultivo	0,12–0,40
SMOS	Tierras de cultivo, pastizales, matorrales	0,40–0,58	AMSR-E	Tierras de cultivo, bosques, pastos, humedales	0,61–0,78
SMOS	Tierra de cultivo, bosque	0,75–0,77	AMSR-E	Pradera	0,54–0,94
SMOS	Bosque	0,108–0,742	AMSR-E	Tierras de cultivo	0,75

Con todo ello, en un estudio para una cuenca de Italia central (Brocca et al., 2011) se han asimilado los productos de humedad del suelo derivados del sensor *ASCAT* y se ha analizado el rendimiento del modelo empleado en la estimación de inundaciones. Según el resultado del estudio, realizado en para una cuenca de 137 km<sup>2</sup> y la serie de observaciones de precipitación-escorrentía por hora para el periodo de 1994-2010, los productos de humedad del suelo *ASCAT* concuerdan bien con los datos modelados. La asimilación del producto en la zona edáfica tiene un impacto significativo en la simulación de escorrentía y proporciona una mejora en el rendimiento del modelo. Por otro lado, el resultado del estudio indica que la asimilación del producto de humedad superficial tiene un efecto pequeño. Se demuestra la posibilidad de emplear productos satelitales para mejorar la predicción de inundaciones si los datos de la zona de raíz del suelo se asimilan en el modelo hidrológico.

Según Sheffield et al. (2018), los sensores remotos satelitales tienen un gran potencial para mejorar la gestión de los recursos hídricos para el desarrollo sostenible, especialmente en regiones con escasez de datos. En muchas regiones, las redes de monitoreo hidrometeorológico son escasas y no son prácticas para la toma de decisiones en tiempo real. En las regiones en desarrollo, donde la necesidad de información es mayor, la infraestructura de recopilación de datos y la capacidad humana para monitorear y pronosticar amenazas es generalmente baja debido a la disminución de las redes de monitoreo hidrometeorológico y agrícola en los últimos 30 años y la falta continua de inversión en infraestructura y capacitación. Los sensores satelitales se utilizan cada vez más como fuente complementaria de información a las redes de vigilancia *in situ* y, en muchos casos, son la única fuente factible para realizar mediciones directas e indirectas que incluyen precipitación, evaporación, niveles de lagos y ríos, agua superficial, humedad del suelo, nieve y almacenamiento total de agua (agua superficial y subterránea). No obstante, el estudio subraya la necesidad de mejorar las evaluaciones y la precisión de la información generada por los sensores remotos, tal y como se ha visto en este trabajo.

#### **d) Participación pública, concienciación y generación de datos basados en la comunidad**

Como exponen Njue et al. (2019), los conjuntos de datos hidrométricos limitados y la presión sobre las redes de monitoreo hidrológico a largo plazo hacen que sea fundamental explorar métodos alternativos para la recopilación de datos, como la ciencia ciudadana. Esto es



particularmente el caso en los países de bajos ingresos, donde la escasez de datos es más pronunciada y donde los métodos de monitoreo convencionales son costosos y logísticamente complicados. El crecimiento de la ciencia ciudadana en las ciencias naturales se ha correlacionado con el aumento de los desarrollos tecnológicos en los últimos 10 a 15 años, incluyendo el empleo de las redes sociales. Los modelos de ciencia ciudadana pueden variar desde enfoques “de arriba hacia abajo” hasta más participativos y existen varios marcos para evaluar el nivel de participación en los programas de ciencia ciudadana. Según Shirk et al. (2012) las formas comunes de participación ciudadana se pueden categorizar en cinco niveles según el nivel de influencia e involucramiento en el proceso científico.

- Proyectos contractuales: las comunidades solicitan a investigadores profesionales que realicen una investigación científica específica y presenten un informe sobre los resultados.
- Proyectos contributivos: son diseñados por científicos y los participantes de la ciudadanía contribuyen principalmente a la obtención de los datos.
- Proyectos colaborativos: son diseñados por científicos y la ciudadanía contribuye principalmente a la obtención de los datos, pero también ayuda a refinar el diseño del proyecto, analizar datos y/o difundir los resultados.
- Proyectos cocreados: participantes de la ciudadanía están activamente involucrados en la mayoría o en todos los aspectos del proceso de investigación.
- Contribuciones colegiadas: individuos no acreditados realizan investigaciones de manera independiente.

Njue et al. (2019) revisaron 71 estudios que revelan que el número de proyectos de ciencia ciudadana orientados a la hidrología ha aumentado en la última década, siendo en su mayoría experiencias orientadas a la recogida de información sobre la calidad de las aguas, la precipitación y niveles y flujos de agua. La cantidad de estudios aumentó rápidamente, particularmente desde 2014, coincidiendo con tecnologías emergentes, equipos de detección de bajo costo y un creciente interés en la gestión sostenible de los recursos hídricos. La mayoría de los estudios se llevaron a cabo en regiones de economías avanzadas, siendo EEUU y Europa las más representadas con un 45% y un 20%, respectivamente. Se recogieron pocos estudios en Australia (4%) y en países de economías en desarrollo en África y Asia (10% y 9%, respectivamente). La cobertura espacial de la información recogida en cada estudio varió ampliamente, desde sitios concretos repartidos por una ciudad o país, hasta

cuenas hidrográficas, provincias o estados completos. La aplicación de la ciencia ciudadana en hidrología, incluso en países de economías en desarrollo, está aumentando gradualmente. En tales países, no solo los datos son escasos, sino que la presión sobre los recursos hídricos, a menudo, ya es muy alta y va en aumento.

No existen aún muchas experiencias de la ciencia ciudadana orientadas a generar información sobre la HS de una cuenca o región. Un ejemplo interesante de esta técnica es el proyecto GROW promovido por la UE (<https://growobservatory.org/>), el cual ha permitido detectar los retos para la implementación de este tipo de iniciativas. Su objetivo ha sido establecer un observatorio ciudadano y una comunidad a gran escala para el monitoreo ambiental. Los propósitos científicos del observatorio fueron probar la calidad de los datos y crear series de productos de humedad del suelo basados en las observaciones de los ciudadanos. Sin embargo, se detectaron varios retos y debilidades en un estudio de sobre los resultados de la iniciativa (Kovácsk et al., 2019). Así, un sistema orientado a los pequeños agricultores puede dar lugar a una distribución incompleta y sesgada de los lugares de seguimiento en la que la densidad de puntos sea alta dentro de una zona y baja o incluso nula en otras zonas. También señala que la forma de colocar el sensor en el suelo por parte de los participantes afecta en la utilidad de la información generada. Por ejemplo, se menciona que los sensores desplegados bajo la capa superficial del suelo han proporcionado una información relevante para el agricultor, pero menos representativa para la validación y calibración de los datos satelitales como, por ejemplo, del *Sentinel-1*.

Además, según Kovácsk et al. (2019), para tener una plataforma de datos en tiempo real que funcione bien y sea fácil de usar para los miembros del proyecto, es importante que los datos se carguen en el servidor con frecuencia y que se puedan ver de manera clara. Esto permitirá tener estimaciones actualizadas sobre la humedad del suelo.

#### **e) Horizonte para el modelado hidrológico de una cuenca**

En esta sección se analizan diferentes aspectos novedosos o que se consideran interesantes para el horizonte de la modelación hidrológica a escala cuenca: (i) los retos para la integración de la información en la modelización, (ii) el impacto de los llamados gemelos digitales, (iii) el desarrollo de centros de datos hidrológicos y el desarrollo de modelos de cuenca que generan pronósticos hidrológicos, (iv) la necesidad de mejorar la efectividad y reducir la duplicación

en el modelado hidrológico de grandes cuencas y la gestión integrada de los RRHH orientados a los Organismos de Cuenca.

- i. Según Bittelli (2011) la integración de la información a diferentes escalas sigue siendo uno de los principales retos en la modelización hidrológica. A su vez, considera que la modelización simplificada de la HS a gran escala (cuenca, regional y global) es necesaria y sigue siendo un reto debido a la complejidad de adquirir los conocimientos de las propiedades hidráulicas del suelo. Estos aspectos, junto con los mencionados en este apartado, se han considerado necesarios para una correcta modelización hidrológica de una cuenca y, por tanto, para una precisa gestión de los RRHH.
- ii. El organismo responsable de la gestión de los RRHH de una cuenca puede emplear una plataforma que integre varios modelos hidrológicos (numéricos y también basados en el aprendizaje automático) con un SIG y los datos provenientes de diversas fuentes. Este concepto es lo que se llama “gemelo digital”. Estas pueden incluir toda la información hidrológica, información geográfica y meteorológica de una cuenca. El inventario de los sistemas de información de una cuenca, además de recoger la información generada por las técnicas emergentes ya descritas incluyen las redes de estaciones de aforo y los datos de escorrentía, las redes para cuantificar las masas de agua subterráneas (redes piezométricas, etc.), las masas de agua superficiales, información geográfica y geológica además de la información ofrecida por las estaciones meteorológicas como, la precipitación, temperatura, radiación solar y velocidad del viento. También podría incluir datos sobre la evolución de los RRHH y climáticos a escala regional como, por ejemplo, partiendo de la información del satélite Grace-FO. Además, este tipo de plataforma podría compartir información con otras plataformas que se encarguen de los embalses de la cuenca, redes de abastecimiento, balances hídricos urbanos etc. (Batlle, 2021).

Los gemelos digitales están teniendo actualmente un gran desarrollo en hidrología. En la Unión Europea se ha puesto en marcha la generación de un primer prototipo de modelo hidrológico Gemelo Digital Tierra (<http://hydrology.irpi.cnr.it/> ) con el objetivo de integrar sistemas de observación (satélites, datos in situ, observaciones ciudadanas), modelado del sistema terrestre de alta resolución, inteligencia artificial, tecnologías de la información y la comunicación y capacidades de computación de alto rendimiento. Actualmente el proyecto dispone de un visualizador-demo sobre la variación de la humedad del suelo, evaporación y precipitación de las principales

cuencas del Mediterráneo. El Gemelo Digital Tierra será un primer prototipo para la comprensión de los procesos hidrológicos, como un sistema integrado e interactivo que proporcione la mejor reconstrucción posible y simulaciones del ciclo del agua y los procesos hidrológicos y sus interacciones con actividades humanas con altas resoluciones y precisiones.

Adicionalmente, actualmente se están empleando gemelos digitales para obtener modelos hidrológicos de cuenca de mediana escala. Un ejemplo de ello es la implementación de una plataforma de este tipo en Murcia (España) (Senent et al., 2022), donde se aplicó la combinación de modelos hidrológicos e hidrodinámicos para comprender la hidrología y los componentes clave del balance hídrico en la laguna costera del Mar Menor y su cuenca vertiente. Se emplearon los modelos SWAT (Soil and Water Assessment Tool) y la herramienta QGIS Water Ecosystems (QWET). A su vez, se ha implementado una aplicación móvil que permitirá la obtención de una mayor cantidad de información gracias a la ciencia ciudadana. El modelo SWAT se calibró y validó a partir de datos de evapotranspiración obtenidos por sensores remotos satelitales.

- iii. Actualmente, prácticamente en todos los países del mundo, exceptuando algunos en la región del Sahel y Sahara en África, disponen de centros de recogida de datos hidrológicos y disponen de Servicios Hidrológicos Nacionales. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) “los datos hidrológicos deben considerarse bienes públicos mundiales: los desafíos del agua son globales y los datos hidrológicos también deben serlo” y por ello se está realizando un constante esfuerzo para compartir este tipo de datos en una red internacional y mejorar la gobernanza del agua (Argent et al., 2021). Además, según la OMM y *Global Water Partnership* (GWP) realizar este esfuerzo, así como compartir las experiencias en la gestión de cuencas y el desarrollo de los modelos hidrológicos, repercute en grandes beneficios económicos y sociales para las comunidades (GWP, 2009; Argent et al., 2021).

Por ejemplo, el GRDC recoge datos sobre escorrentía de los Servicios Hidrológicos e Hidrometeorológicos Nacionales de más de 150 países y los pone a disposición del público y la comunidad científica internacional (<https://www.bafg.de/>). El desarrollo de los centros de datos e información hidrológicos varía según la evolución socioeconómica de los países, su situación geográfica y climática, su situación política y geopolítica y de los aspectos culturales. Según la OMM el “El monitoreo hidrológico es costoso, pero un diseño moderno de la red permitirá una mayor

eficiencia, y la incorporación de todas las posibles fuentes de datos proporcionará un alto rendimiento de la inversión”. Por ejemplo, en España se disponen de varios centros de datos que recogen información hidrológica, pero no de forma integrada ni tampoco ofrecen pronósticos sobre los RRHH. Se dispone de un centro de información y visualización de la información geográfica en el Geoportal (<https://sig.mapama.gob.es/geoportal/>). Esta plataforma ofrece datos del tipo geográfico, demarcaciones hidrográficas o datos ráster sobre direcciones de drenaje. No ofrece en cambio datos relativos a la HS ni almacenamientos de los PHS. También se puede encontrar un centro de las redes de seguimiento de información sobre el estado de los recursos hídricos (caudales, embalses, piezometría y pluviómetros) junto con datos meteorológicos, pero no ofrece datos en tiempo real ([www.miteco.gob.es/es/](http://www.miteco.gob.es/es/)). A su vez, es posible obtener información sobre el estado y la variación semanal y anual de los RRHH de las diferentes demarcaciones hidrológicas en el Boletín Hidrológico Peninsular, y el Boletín Hidrológico ([www.miteco.gob.es/es/](http://www.miteco.gob.es/es/)). Los datos en tiempo real se pueden encontrar en los centros de información de las confederaciones hidrográficas de las principales cuencas de España ([www.saihebro.com/](http://www.saihebro.com/)). No obstante, existen centros más avanzados que trabajan con modelos hidrológicos para los pronósticos climático-hidrológicos como el *Colorado Basin River Forecast Center* (USGS, NOAA) ([www.noaa.gov/](http://www.noaa.gov/)). Esta cuenca de Estados Unidos abastece a más de 40 millones de personas. El centro de información ofrece datos de pronósticos sobre los RRHH, como la HS o los caudales esperados de los ríos en cualquier punto de la cuenca. Así, genera información de gran utilidad, por ejemplo, para pronosticar consecuencias de eventos extremos donde las avenidas de los ríos pueden afectar a la integridad de las personas, bienes e infraestructuras. Este centro emplea el modelo hidrológico Sacramento (Werner, 2011).

- iv. Según Johnston y Smakhtin (2014) la tendencia de cada nuevo grupo de trabajo es que desarrolle su propio modelo hidrológico, lo que resulta en una gran cantidad de herramientas para cada cuenca principal. En ese trabajo, los autores discutieron sobre el modelado hidrológico en cuatro grandes cuencas (Nilo, Mekong, Ganges e Indo), planteando una cuestión a la comunidad científica y agencias: "¿qué nivel de modelado es suficiente?". El estudio sugiere cuatro áreas de acción para mejorar la efectividad y reducir la duplicación en el modelado hidrológico de grandes cuencas. Para ello, se deben publicar las configuraciones del modelo y los datos de entrada, así

como los resultados del modelo para permitir enfoques más coordinados. También es necesario informar sobre la incertidumbre para permitir una evaluación más realista del grado de confianza en el uso de los resultados. Además, se necesitan iniciativas para mejorar la cantidad y la calidad de los datos para la entrada, calibración y validación de modelos. Finalmente, dentro de cada cuenca principal, se debe identificar y dotar de recursos a una agencia apropiada para que asuma la responsabilidad de compartir y coordinar los datos, para reducir la redundancia de esfuerzos y promover la colaboración.

Ya en 2009, Global Water Partnership (GWP) publicó un interesante y recomendable manual para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos orientado a los Organismos de Cuenca (GWP, 2009). Este trabajo identifica la cuenca como “una unidad hidrológica práctica para la gestión de recursos hídricos” y ofrece una serie de claves para la implementación de la Gestión Integrada de los RRHH a esta escala. A través de ejemplos sobre la implantación de sistemas de gestión en todo el mundo ofrece una mirada integrada de la necesidad de la creación de los sistemas de gestión, la participación, el reparto de roles entre organismos, financiación, la comunicación, planificación a largo plazo y los planes de acción. En este contexto propone integrar la planificación del monitoreo y los sistemas de información necesarios, ámbito desarrollado en esta revisión.

## **6. CONCLUSIONES**

La modelización de los procesos hidrológicos a nivel de cuenca es una herramienta poderosa para gestión adecuada de los RRHH. Para modelar con precisión los procesos hidrológicos del suelo como, la escorrentía, la infiltración, la evapotranspiración y la humedad del suelo en una cuenca, es necesario comprender estos procesos los a escala de pedón. La textura, porosidad y propiedades del suelo son clave para parametrizar estos procesos en la ZNS. La forma tradicional de obtener las curvas características del suelo ( $K$ ,  $\theta$ , etc.) es analizando muestras en un laboratorio, pero esto es costoso y no escalable a nivel de cuenca. Por eso, se están explorando diferentes enfoques para mejorar la caracterización de los PHS empleando y perfeccionando las funciones de pedotransferencia, la modelización utilizando observaciones reales empleando modelos de flujo como HYDRUS o MODFLOW y, finalmente, la validación mediante modelización inversa.

Un modelo hidrológico estudia el balance hídrico aplicando el principio de conservación de masas. La calibración y evaluación de estos modelos se realiza a través de datos observados reales provenientes de aforos de los caudales de ríos de la cuenca, los datos ofrecidos por sensores *in situ*, mediante la información ofrecida por los sensores remotos, etc. Otro método se basa en la transferencia de los modelos de PHS a nivel local a la modelización y evaluación a nivel de cuenca. La modelización inversa ha demostrado ser un enfoque efectivo para lograr esto. El enfoque de modelización inversa utiliza los datos hidráulicos ofrecidos por el modelo a escala cuenca y se comprueba con el modelo inverso si es coherente con la información existente (tipo de suelo y características físicas) a escala puntual.

Actualmente se está generando una cantidad enorme de información hidrológica gracias a las técnicas emergentes como, los sensores remotos satelitales (*Sentinel*, *Landsat*, *Grace-FO*, etc.), los sensores remotos aerotransportados, las redes de observación que incluyen las redes de monitoreo *in situ* y la información generada por la ciencia ciudadana. Sin embargo, estas técnicas tienen ciertas limitaciones espaciales, temporales y técnicas que deben ser consideradas.

Los datos de los satélites de microondas son útiles para estimar la humedad del suelo en la zona edáfica. Los sensores remotos multispectrales se utilizan ampliamente en agricultura, seguimiento de la erosión del suelo, calidad del agua superficial y vegetación. Las redes de monitoreo son útiles para evaluar la información generada por los sensores remotos y preparar los instrumentos de las plataformas espaciales. También se utilizan para evaluar modelos hidrológicos a nivel de cuenca y mejorar la comprensión de los procesos hidrológicos del suelo en la zona no saturada. Sin embargo, los sensores remotos necesitan mayores esfuerzos para calibrar los datos de HS o la evapotranspiración mediante sensores *in situ* y así, superar sus limitaciones espaciales, de tipo de cobertura del suelo, la rugosidad del suelo y las atmosféricas. Por otra parte, aún existen dificultades para integrar toda esta información en modelos hidrológicos a escala cuenca, permitiendo la compatibilidad espacial, que responda bien a la heterogeneidad del terreno y la temporal, y que permita introducir datos de forma continua. A su vez, es necesario seguir estandarizando la aplicación de sensores puntuales para la medición indirecta de la HS. Además, existe un gran desafío para aumentar la densidad de las redes de monitoreo de sensores *in situ* e integrar las redes ya existentes. Aunque se ha demostrado que la ciencia ciudadana puede generar información de calidad, esta requiere de gran esfuerzo a la hora de diseñar los proyectos y procesar los datos generados, que logre superar los sesgos territoriales y la heterogeneidad de datos

suministrados. Sumando es esto, se necesita seguir mejorando las plataformas de datos en tiempo real que funcionen bien y sean fáciles de usar para los miembros participantes.

Las nuevas tecnologías y las ciberinfraestructuras son prometedoras para que toda esta información sea accesible, trazable, de calidad y actualizada en tiempo real. El reto de los próximos años se sitúa en superar las limitaciones de las técnicas emergentes e integrar toda la información generada en los llamados gemelos digitales y los modelos hidrológicos en tiempo real, como los ya existentes, *Colorado Basin River Forecast Center* o el proyecto Gemelo Digital Tierra de la UE.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Amor, I. y Droogers, P. (1988). Inverse modelling in estimating soil hydraulic functions: A Genetic Algorithm approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6.
- Argent, R., Daňhelka, J., Medeiros, M., Berod, D. (2021), Intercambio de datos hidrológicos. *Organización Meteorológica Mundial*, 70 (2).
- Babaeian, E., Sadeghi, M., Jones, S. B., Montzka, C., Vereecken, H., Tuller, M. (2019). Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 57, 530–616.
- Battle, F. (2021). ¿Es posible un gemelo digital de cuenca hidrográfica? <https://www.iagua.es/blogs/francisco-battle/es-posible-gemelo-digital-cuenca-hidrografica-0>
- Bittelli, M. (2011). Measuring Soil Water Content: A Review. *Horttechnology*, 21, 293-300.
- Blonquist, J.M., Jones, S.B., Robinson, D.A. (2005). Standardizing Characterization of Electromagnetic Water Content Sensors: Part 2. Evaluation of Seven Sensing Systems. *Vadose Zone Journal*, 4 (4), 1059–1069.
- Blöschl, G., Gaál, L., Hall, J., Kiss, A., Komma, J., Nester, T., Parajka, J., Perdigão, R.A., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J.L., Viglione, A. (2015). Increasing river floods: fiction or reality? *WIREs Water*, 2(4), 329-344.
- Boergens, E., Güntner, A., Dobsław, H., Dahle, C. (2020). The Central European droughts of 2018 and 2019 observed with GRACE-Follow-On. *Geophysical Research Letters*, 47.
- Bogena, H.R., Montzka, C., Huisman, J.A., Graf, A., Schmidt, M., Stockinger, M., von Hebel, C., Hendricks-Franssen, H.J., van der Kruk, J., Tappe, W., Lücke, A., Baatz, R., Bol, R., Groh, J., Pütz, T., Jakobi, J., Kunkel, R., Sorg, J., Vereecken, H. (2018). The TERENO-Rur Hydrological Observatory: a multi-compartment and multi-scale research platform for the advancement of hydrological science, *Zona Vadose Magazine*, 17, 1-22.
- Bogena, H., Huisman, J., Oberdörster, C., Vereecken, H. (2007). Evaluation of a low-cost soil water content sensor, *Journal of Hydrology*, 344, 32-42.
- Brocca, L., Hasenauer, S., Lacava, T., Melone, F., Moramarco, T., Wagner, W., Dorigo, W., Matgen, P., Martínez-Fernández, J., Llorens, P., Latron, J., Martín, C., Bittelli, M. (2011). Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe, *Remote Sensing of Environment*, 115, 3390-3408.
- Tapley, B.D., Watkins, M.M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., Sasgen, I., Famiglietti, J.S., Landerer, F.W., Chambers, D.P., Reager, J.T., Gardner, A.S., Save, H., Ivins, E.R., Swenson, S.C., Boening, C., Dahle, C., Wiese, D.N., Dobsław, H., Tamisiea, M.E., Velicogna, I. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change, *Nature Climate Change*, 5(5), 358-369.



- Cabrera, J. (2012), Calibración de Modelos Hidrológicos, Civ. Eng. Universidad Nacional de Ingeniería Facultad de Ingeniería Civil de Perú.
- Carminati, A., Vetterlein, D., Koebernick, N., Blaser, S., Weller, U., Vogel, H.J. (2013). Do roots mind the gap?, *Plant and Soil*, 367, 651.
- Celia, M. A., Bouloutas, E. T., Zarba, R. L. (1990). A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation, *Water Resources Research*, 26(7), 1483-1496.
- Corona, C.R., y Ge, S. (2022). Examining the subsurface response to an extreme precipitation event using HYDRUS-1D, *Vadose Zone Journal* , 21.
- Cosh, M. H., Caldwell, T. G., Baker, C. B., Bolten, J. D., Edwards, N., Goble, P., Woloszyn, M. E. (2021). Developing a strategy for the national coordinated soil moisture monitoring network, *Vadose Zone Journal*, 20, 13.
- Cosh, M.H., Caldwell, T.G., Baker, C.B., Bolten, J.D., Edwards, N., Goble, P., Hofman, H., Ochsner, T.E., Quiring, S., Schalk, C., Skumanich, M., Svoboda, M., Woloszyn, M.E. (2021). Developing a strategy for the National Coordinated Soil Moisture Monitoring Network, *Vadose Zone Journal*, 20.
- Coumou, D., Rahmstorf, S. (2012). A Decade of Weather Extremes, *Nature Climate Change*, 2, 491–496.
- Dumedah, G., Walker, J.P., Merlin, O. (2015). Root-zone soil moisture estimation from assimilation of downscaled Soil Moisture and Ocean Salinity data, *Advances in Water Resources*, 84, 14-22.
- ESA Copernicus, El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial (2018). [https://www.ign.es/web/recursos/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa\\_Marco\\_Copernicus\\_User\\_Uptake/3\\_componente\\_espacio\\_Copernicus.pdf](https://www.ign.es/web/recursos/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/3_componente_espacio_Copernicus.pdf),
- Esteller, M., Díaz Delgado, C., Vera, F. (2006). Recursos hídricos: conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica, edición 2, RIPDA-CYTED, UAEMex, Ediciones Piriguazú
- Fan, Y., Miguez-Macho, G., Jobbágy, E., Jackson, R., Otero Casal, C. (2017). Hydrologic regulation of plant rooting depth, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114.
- Fernández, Y., Valdés, J., Mederos, M., Pla, C. (2022). Evaluación del efecto del cambio climático en dos cultivos de secano en la provincia de Alicante, Agua, energía y medio ambiente, Universidad de Alicante / Universitat d'Alacant, 551-562.
- Labrador, M., Brondo, J., Arbelo, M. (2012). Satélites de teledetección para la gestión del territorio. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias.
- Gómez, A., Clavijo, F., Jimenez, A. (2016). Agricultura de Precisión y Sensores Multiespectrales Aerotransportados, Conferencia CICI2016, Villavicencio, Colombia 2016.
- Gottardi, G., Venutelli, M., (1993). Richards: Computer program for the numerical simulation of one-dimensional infiltration into unsaturated soil, *Computers y Geosciences*, 19 (9), 1239-1266.
- Hachimi, M., Maslouhi, A., Karim, T., Hamid, Q. (2019). Estimation of Soil Hydraulic Properties of Basin Loukkos (Morocco) by Inverse Modeling, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 1407–1419.
- Humphrey, V., Gudmundsson, L., Seneviratne, S. (2016). Assessing Global Water Storage Variability from GRACE: Trends, Seasonal Cycle, Subseasonal Anomalies and Extremes, *Surveys in Geophysics*, 37, 1-39.
- Jhorar, R.K., Bastiaanssen, W.G.M., Feddes, R., Dam, J.C. (2002). Inversely estimating soil hydraulic functions using evapotranspiration fluxes. *Journal of Hydrology*, 258, 198-213.
- Yu, J., Wu, Y., Xu, L., Peng, J., Chen, G., Shen, X., Lan, R., Zhao, C., Zhangzhong, L. (2022). Evaluating the Hydrus-1D Model Optimized by Remote Sensing Data for Soil Moisture Simulations in the Maize Root Zone, *Remote Sensing*, 14, 6079.
- Johnston, R. y Smakhtin, V. (2014). Hydrological Modeling of Large river Basins: How Much is Enough?, *Water Resources Management*, 28, 2695–2730.
- Karamouz, M., Meidani, H., Mahmoodzadeh, D. (2022). Inverse unsaturated-zone flow modeling for groundwater recharge estimation: a regional spatial nonstationary approach, *Hydrogeology Journal*, 30(5), 1529-1549.
- Karimi, P. y Bastiaanssen, W.G.M. (2013). Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting – Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data, *Hydrol. Sistema Tierra Sci.*, 19, 507-532

- Katul, G. y Siqueira, M. (2010). Biotic and abiotic factors act in coordination to amplify hydraulic redistribution and lift, *The New phytologist*, 187, 3-6.
- Kool, J. B. y Parker, J. C. (1988). Analysis of inverse problem for transient unsaturated flow. *Water Resources Research*, 24 (6), 817-830.
- Kovács K. Z., Hemment, D., Woods, M., Velden, N.K. van der, Xaver, A., Giesen, R.H., Burton, V.J., Garrett, N.L., Zappa, L., Long, D., Dobos, E., Skalsky, R. (2019). Citizen observatory based soil moisture monitoring – the GROW example. *Hungarian Geographical Bulletin*, 68(2), 119-139.
- Kumar, S., Reichle, R., Koster, R., Crow, W., Peters-Lidard, C. (2009). Role of Subsurface Physics in the Assimilation of Surface Soil Moisture Observations, *Journal of Hydrometeorology*, 10, 1534–1547.
- Kunkel, J.R., Tindall, J.A. (1999). *Unsaturated zone hydrology for scientists and engineers*, Prentice Hall, 624 pp.
- Landsberg, J. y Fowkes, N. (1978). Water Movement Through Plant Roots. *Annals of Botany*. 42. 493-508.
- Lange, H. y Sippel, S. (2020). Machine Learning Applications in Hydrology. *Forest-Water Interactions*, 233-257.
- Lexow, C. (2011). Flujo transitorio en suelos limo arenosos: aplicación del Código HYDRUS 2D/3D. VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea. Captación y Modelación de Agua Subterránea, Salta, Argentina 2011
- López, K.L. (2022). Evaluación de la dinámica de agua en Hydrus-1D para tres suelos de ladera cultivados con aguacate Hass (persea americana) en el Valle del Cauca, Colombia, *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 10 (1), 75-98.
- Manual para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Cuencas (2009). Global Water Partnership (GWP) y la Red Internacional de Organismos de Cuenca (International Network of Basin Organizations, INBO), 112pp.
- Martinez, J., Schvezov, C., Rosenberger, M. (2013). Aproximación en diferencias finitas a la ecuación de Richards para transporte de agua en suelos no saturados, *Mecánica Computacional*, 32.
- Farzamian, M., Santos, F., Khalil, M. (2015). Estimation of Unsaturated Hydraulic Parameters in Sandstone Using Electrical Resistivity Tomography under a Water Injection Test, *Journal of Applied Geophysics*, 121, 71-83.
- Montzka, C., Herbst, M., Weihermüller, L., Verhoef, A., Vereecken, H. (2017). A global data set of soil hydraulic properties and sub-grid variability of soil water retention and hydraulic conductivity curves, *Earth System Science Data*, 9, 529-543.
- Mueller, N., Butler, E., McKinnon, K., Rhines, A., Tingley, M., Holbrook, M., Huybers, P. (2015). Cooling of US Midwest Summer Temperature Extremes from Cropland Intensification. *Nature Climate Change*.
- Njue, N., Stenfort Kroese, J., Gräf, J., Jacobs, S., Weeser, B., Breuer, L., Rufino, M. (2019). Citizen science in hydrological monitoring and ecosystem services management: State of the art and future prospects, *Science of The Total Environment*. 693.
- Peralta de Andrés, J., González, E.M., Bosco, J. (2017). Estudio de prospectiva, análisis y propuesta de participación y colaboración de la Administración Foral de Navarra con las redes, plataformas e iniciativas de Ciencia Ciudadana, Universidad Pública de Navarra. Departamento de Ciencias del Medio Natural
- Plata, J. L. (2011). Los sondeos de resonancia magnética en la investigación de la zona no saturada, X Jornadas de Investigación de la Zona no Saturada del Suelo, Salamanca (España). Vol 10.
- Puyol, A. y Jacobo, M. (2006). *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*, Universidad Autónoma Metropolitana, Tlalpan, D.F. México. 750 pp.
- Robinson, D., Hopmans, J., Filipović, V., Ploeg, M., Lebron, I., Jones, S., Reinsch, S., Jarvis, N., Tuller, M. (2019). Global Environmental Changes Impact Soil Hydraulic Functions through Biophysical Feedbacks, *Global Change Biology*, 25, 1895-1904.
- Rogger, M., Agnoletti, M., Alaoui, A., Bathurst, J. C., Bodner, G., Borga, M., Chaplot, V., Gallart, F., Glatzel, G., Hall, J., Holden, J., Holko, L., Horn, R., Kiss, A., Kohnová, S., Leitinger, G., Lennartz, B., Parajka, J., Perdigão, R., Peth, S., Plavcová, L., Quinton, J. N., Robinson, M., Salinas, J. L., Santoro, A., Szolgay, J., Tron, S., van den Akker, J. J. H., Viglione, A., Blöschl, G. (2017). Land use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research, *Water Resources Research*, 53, 5209– 5219.
- Rubio, C., Llorens, P., Latron, J., Van Genuchten, M. (2006). Modelling sub surface flow in an old agricultural terraced area using HYDRUS-1D. A multi criteria evaluation approach. Conference: Geophysical Research Letters.

- Sadeghi, M., Babaeian, E., Tuller, M., Jones, S. (2017). The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations, *Remote Sensing of Environment*, 198, 52-68.
- Sánchez, F. J. (2022). *Hidrología Superficial y Subterránea*. 2ª edición. Kindle Direct Publishing., 440 pp.
- Schilardi, C., Rearte, E., Martín, L., Morábito, J. (2015). Calibración a campo de sensores fdr. limitaciones y potencialidades, Conference: Jornadas de Riego y Fertilización 2015, Mendoza Argentina.
- Senent, J., López, A., Segura, F.J., Nielsen, A., Trolle, D., Peña, S., Cecilia, J.M. (2022). Avances y limitaciones en el desarrollo de un gemelo digital del Mar Menor, Agua, energía y medio ambiente, Universidad de Alicante / Universitat d'Alacant, 187-204.
- Sheffield, J., Wood, E., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., Serrat-Capdevila, A., Verbist, K. (2018). Satellite Remote Sensing for Water Resources Management - Potential for Supporting Sustainable Development in Data Poor Regions, *Water Resources Research*, 54, 9724– 9758.
- Shirk, J., Ballard, H., Wilderman, C., Phillips, T., Wiggins, A., Jordan, R., McCallie, E., Minarchek, M., Lewenstein, B., Krasny, M., Bonney, R. (2012). Public Participation in Scientific Research: A Framework for Deliberate Design, *Ecology and Society*, 17, 29-48.
- Simunek, J.J., Th, M., Van Genuchten, M., Šejna, M. (2012). HYDRUS: model use, calibration, and validation, *Transactions of the ASAE, American Society of Agricultural Engineers*, 55, 1261-1274.
- Sokolov, A.A., Chapman, T.G. (1974). Métodos de cálculo del balance hídrico: guía internacional de investigación y métodos , UNESCO, 127 pp.
- Tóth, B., Weynants, M., Nemes, A., Makó, A., Bilas, G., Tóth, G. (2015). New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe, *European Journal of Soil Science*, 66, 226-238.
- Van Looy, K., Bouma, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., Vereecken, H. (2017). Pedotransfer functions in Earth system science: Challenges and perspectives. *Reviews of Geophysics*, 55, 1199-1256.
- Vásquez, N. (2022). Seminario Doctorado: Uso de patrones espaciales obtenidos mediante percepción remota en la Calibración de modelos hidrológicos distribuidos. Chile <https://ingenieria.uchile.cl/agenda/185495/seminario-doctorado-calibracion-de-modelos-hidrologicos-distribuidos>, Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile.
- Vereecken, H., Amelung, W., Bauke, S., Bogaen, H., Brüggemann, N., Montzka, C., Vanderborght, J., Bechtold, M., Blöschl, G., Carminati, A., Javaux, M., Konings, A., Kusche, J., Neuweiler, I., Or, D., Steele-Dunne, S., Verhoef, A., Young, M., Zhang, Y. (2022). Soil hydrology in the Earth system. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3.
- Vilanova, E. (2023). Los modelos digitales y la inteligencia artificial aplicados a la hidrogeología. Jornada sobre digitalización en la gestión de las aguas subterráneas, 2023. ETS de Ingenieros de Minas y Energía, Madrid.
- Werner, K. (2011). NOAA's Colorado Basin River Forecast Center: Climate Services on the Colorado River: capabilities, Gaps, and Chasms". *Climate Test Bed Joint Seminar Series*, Maryland 2011.
- Wickenkamp I., Huisman J.A., Bogaen H.R., Lin H.S., Vereecken H. (2016). Spatial and temporal occurrence of preferential flow in a forested headwater catchment, *Journal of Hydrology*, 534, 139-149.
- Yeh, W. (1986). Review of Parameter Identification Procedures in Groundwater Hydrology: The Inverse Problem, *Water Resources Research*, 22( 2), 95-108
- Liu, Z., Yao, Z., Wang, R. (2019). Simulation and evaluation of actual evapotranspiration based on inverse hydrological modeling at a basin scale, *CATENA*, 180, 160-168.
- Zimmermann, E. y Chiarito, E. (2000). Validación a escala de cuenca del método del triángulo para estimar la humedad superficial del suelo, Universidad Nacional de Rosario (UNR), CONICET.
- Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Lelieveld, J. (2014). Role of soil moisture in the amplification of climate warming in the eastern Mediterranean and the Middle East, *Climate Research*, 59, 27-37.
- <https://earth.esa.int/> Instrumentos Grace <https://earth.esa.int/eogateway/missions/grace> , accedido en febrero del 2023.
- <https://eos.com/es/> Índices NDVI, NDWI y NDSI <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/> , accedido en febrero del 2023.
- [www.esa.int/](http://www.esa.int/) Ciencia Espacial de la ESA [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science), accedido en febrero del 2023.

[www.esa.int/](http://www.esa.int/) Humedad del suelo CCI, <https://esa-soilmoisture-cci.org/> , accedido en febrero del 2023.

<https://gcos.wmo.int/> Variables Climáticas Esenciales, <https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables/> , accedido en febrero del 2023.

<https://gidahatari.com/> Conoce QSWAT, el modelo hidrológico SWAT en QGIS <https://gidahatari.com/ih-es/conoce-qswat-el-modelo-hidrologico-swat-en-qgis> , accedido en febrero del 2023.

<https://groundwater.ucanr.edu/> Vadose Zone Modeling: Web-Links  
[https://groundwater.ucanr.edu/Materials/Vadose\\_Zone\\_Modeling\\_\\_Web-Links/](https://groundwater.ucanr.edu/Materials/Vadose_Zone_Modeling__Web-Links/) , accedido en febrero del 2023.

<http://hydrology.irpi.cnr.it/> Proyectos DTE HIDROLOGÍA (ESA) <http://hydrology.irpi.cnr.it/projects/dte-hydrology/>  
<https://explorer.dte-hydro.adamplatform.eu/> accedido en marzo del 2023.

[www.iagua.es/](http://www.iagua.es/) Los gemelos digitales cambian el paradigma de la gestión de activos en el sector del agua  
<https://www.iagua.es/noticias/redaccion-iagua/gemelos-digitales-cambian-paradigma-gestion-activos-sector-agua> ,  
<https://www.iagua.es/blogs/francisco-batlle/es-posible-gemelo-digital-cuenca-hidrografica-0> , accedido en febrero del 2023.

[www.icgc.cat/es](http://www.icgc.cat/es) Tomografía eléctrica <https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geofisica-aplicada/Tecnicas/Tomografia-electrica>. accedido en febrero del 2023.

<https://ismn.earth/en/> International Soil Moisture Network <https://ismn.earth/en/data/data-view/> accedido en febrero del 2023.

[www.ipcc.ch/](http://www.ipcc.ch/) Synthesis report of the ipcc sixth assessment report (AR6),  
[https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_LongerReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf), IPCC, Switzerland, March 2023.

<https://landsat.gsfc.nasa.gov/#> accedido en febrero del 2023.

[www.iagua.es/](http://www.iagua.es/) Los gemelos digitales cambian el paradigma de la gestión de activos en el sector del agua  
<https://www.iagua.es/noticias/redaccion-iagua/gemelos-digitales-cambian-paradigma-gestion-activos-sector-agua> ,  
<https://www.iagua.es/blogs/francisco-batlle/es-posible-gemelo-digital-cuenca-hidrografica-0> , accedido en febrero del 2023.

[www.icgc.cat/es](http://www.icgc.cat/es) Tomografía eléctrica <https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geofisica-aplicada/Tecnicas/Tomografia-electrica>. accedido en febrero del 2023.

[www.ipcc.ch/](http://www.ipcc.ch/) Synthesis report of the ipcc sixth assessment report (AR6),  
[https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_LongerReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf), IPCC, Switzerland, March 2023.

[www.miteco.gob.es/es/](http://www.miteco.gob.es/es/) Geoportal Gobierno de España, <https://sig.mapama.gob.es/redes-seguimiento/index.html?herramienta=SAIH> accedido en marzo del 2023.

[www.miteco.gob.es/es/](http://www.miteco.gob.es/es/) Boletín Hidrológico Peninsular  
<https://miteco.maps.arcgis.com/apps/dashboards/912dfee767264e3884f7aea8eb1e0673> , Boletín Hidrológico  
<https://portal.miteco.gob.es/BoleHWeb/> accedido en abril del 2023.

[www.tereno.net](http://www.tereno.net) Objetivos de Tereno, terrestrial environmental observatories  
<https://www.tereno.net/joomla/index.php/overview/goals> accedido en febrero del 2023.

[www.saihebro.com/](http://www.saihebro.com/) Datos en tiempo real, Confederación Hidrográfica del Ebro, España  
<http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/mapas/tipoestacion:A> accedido en marzo del 2023.