



**VNiVERSiDAD  
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOTECNOLOGÍAS  
CARTOGRÁFICAS EN INGENIERIA Y LA ARQUITECTURA**

**TRABAJO DE FIN DE MÁSTER**

**Relación entre humedad del suelo y caudal a lo largo del  
Douro: Análisis con bases de datos satelitales**

(Relationship between Soil Moisture and Streamflow along the Douro:  
Assessment with Remote Sensing data)

**AUTOR:**

**Héctor González López**

**Tutor:**

**Benjamín Arias Pérez**

**Co-tutores:**

**José Martínez Fernández y Ángel  
González Zamora**

*Salamanca, 13 de enero de 2022.*

# Índice

Resumen .....	6
1. Introducción.....	8
2. Objetivos.....	9
3. Zona de estudio: La Cuenca del Duero, España.....	10
4. Bases de datos.....	12
4.1 Productos satelitales de humedad del suelo .....	12
4.1.1 ESA <i>Soil Moisture Ocean Salinity</i> (SMOS) .....	13
4.1.2 ESA <i>Climate Change Initiative</i> (CCI) <i>Soil Moisture</i> (SM) .....	14
4.2 Base de datos hidrológica .....	16
5. Metodología.....	16
5.1 Análisis de las distintas bases de datos satelitales (SMOS y CCI) .....	16
5.2 Modelo Humedad del Suelo – Caudal .....	19
6. Resultados y discusión .....	21
6. Conclusiones.....	31
Bibliografía.....	34

## Índice de figuras

Figura 1. Zona de estudio perteneciente a la Cuenca del Duero. ....	11
Figura 2. Estaciones de aforo y cuencas vertientes relativas pertenecientes a cada estación de aforos. ....	18
Figura 3. Correlación entre la humedad del suelo de tres cuencas vertientes y el caudal correspondiente: Garray (a), Herrera (b) y Zamora (c). ....	22
Figura 4. Valores de los coeficientes de correlación obtenidos con respecto a la superficie de la cuenca vertiente. ....	24
Figura 5. Comparativa entre los caudales simulados y la serie de caudales hidrológicos observados de la estación de San Miguel. Arriba con datos de humedad superficial, abajo con datos de humedad del perfil del suelo). ....	27
Figura 6. Gráfico de dispersión entre datos de humedad del suelo y caudales para las estaciones de Gormaz (arriba) y Zamora (abajo), superficie (derecha) y perfil (izquierda), y modelo ajustado. ....	28

## Índice de tablas

Tabla 1. Características de las estaciones de aforo y de la cuenca correspondiente. ....	16
Tabla 2. Coeficientes de correlación entre los diferentes productos de humedad del suelo con los caudales registrados (* Significación estadística de la correlación $p < 0,001$ )..	23
Tabla 3. Parámetros calibrados para la humedad superficial en todas las estaciones. ...	25
Tabla 4. Parámetros calibrados para la humedad del perfil en todas las estaciones.....	25
Tabla 5. Datos de humedad del suelo y caudales relativos a los umbrales de cada cuenca vertiente y los periodos de retorno asociados a dichos caudales. (a) superficie y (b) perfil. .....	29

## **Abreviaturas**

**AMSR** - Advanced Microwave Scanning Radiometer

**BEC** - Barcelona Expert Center

**CCI SM** - Climate Change Initiative for Soil Moisture

**CDTI** - Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial

**CEDEX** - Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

**CHD** - Cuenca Hidrográfica del Duero

**CNES** - Centre National d'Etudes Spatiales

**ESA** - European Space Agency

**GEWEX** - Global Energy and Water Cycle Experiment

**IGN** - Instituto Geográfico Nacional

**MDT** - Modelo Digital del Terreno

**MIRAS** - Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis

**NDVI** - Normalized Difference Vegetation Index

**SM** - Soil Moisture

**SMOS** - Soil Moisture and Ocean Salinity

**WACMOS** - Water Cycle Multi-Mission Observation Strategy

**WCRP** - World Climate Research Program

## **Resumen**

La humedad del suelo es ampliamente reconocida como elemento clave en los procesos de lluvia-escorrentía y, por lo tanto, en la modelización y estudio del ciclo hidrológico, debido a que delimita la parte de lluvia que se infiltra dentro del suelo y la parte que pasa a formar la escorrentía superficial.

En este trabajo se estudia la relación entre la humedad del suelo y la escorrentía, a partir de un análisis de correlación entre datos satelitales de humedad del suelo y caudales registrados en estaciones de aforo a lo largo de la cuenca del Duero, desde la cabecera hasta Zamora. También se estudia la variación de esta relación entre ambas variables respecto al aumento de la superficie de la cuenca vertiente. Para ello se han utilizado los productos satelitales *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS) y *Climate Change Initiative Soil Moisture* (CCI SM), tanto de la zona superficial (0-5 cm) como del perfil (0-100 cm), con el objetivo de dotar al análisis de una mayor diversidad en cuanto a productos satelitales y de analizar la idoneidad de los mismos y a diferentes profundidades.

Estos datos de humedad del suelo, seleccionados como los más idóneos, se han utilizado para aplicar el modelo de regresión logarítmica a escala decadal desarrollado por Scipal et al. (2005), el cual simula caudales partiendo de datos de humedad del suelo. Este modelo se calibra en base al desfase temporal (diferencia entre el tiempo de respuesta de ambas variables a un evento de precipitaciones), lo que permite conocer, por un lado, si existen realmente desfases temporales y, por otro lado, si estos desfases temporales varían con el aumento de la superficie de la cuenca vertiente.

Por último, se han calculado los puntos críticos de humedad del suelo y caudales a partir de los cuales ambas variables se desacoplan, es decir, dejan de estar relacionadas. Estos valores críticos son de gran utilidad, ya que permiten conocer los puntos a partir de los cuales el suelo no es capaz de almacenar más agua, y la formación de escorrentía pasa a depender fundamentalmente de la cantidad y la intensidad de la lluvia. La obtención de estos valores críticos se ha complementado con la estimación de la probabilidad y periodo de retorno de ocurrencia de los mismos, con el fin de estudiar el comportamiento de estos puntos e inferir información útil de cara al análisis del riesgo hidrológico.

Los resultados de correlación entre humedad del suelo y caudal muestran valores más altos con los datos procedentes del producto SMOS, obteniéndose mejores resultados, a

su vez, con los datos referidos al perfil frente a la capa superficial. Esto puede deberse a una sobreestimación de la humedad del suelo por parte de los datos satelitales que no ocurre en la estimación para la obtención de datos del perfil. También se observa un aumento de los valores de la correlación entre ambas variables según aumenta la superficie de la cuenca. Del mismo modo ocurre con los valores de correlación que muestra la calibración del modelo presentado, ajustándose más, por tanto, cuanto mayor es la superficie de la cuenca.

Por otro lado, no se observa desfase temporal en el modelo que utiliza datos referidos al perfil mientras que en el modelo que utiliza datos referidos a la superficie se observa un desfase temporal de 10 días a partir de cuencas con áreas superiores a 10.000 km<sup>2</sup>. Por último, los puntos de humedad del suelo y caudal críticos muestran una mayor probabilidad de ser alcanzados y, por tanto, un menor periodo de retorno para los puntos críticos obtenidos del modelo que usa datos de humedad del suelo del perfil frente a los valores ofrecidos por el modelo que usa datos superficiales.

**Palabras clave:** Humedad del suelo, escorrentía, caudal, SMOS, CCI SM, probabilidad, periodo de retorno.

## 1. Introducción

La humedad del suelo es un elemento clave dentro del ciclo del agua. Tanto es así, que en 2010 fue reconocida como parámetro esencial en campos como la hidrología, la climatología o la agricultura (Mason et al., 2010). Esto es debido a que juega un papel fundamental en el proceso lluvia-escorrentía, delimitando la parte de lluvia que se infiltra en el suelo y la parte generante de caudales (Aubert et al., 2003), y por tanto es una pieza clave en los modelos hidrológicos de simulación y predicción. Por este motivo, cobra vital importancia la disponibilidad y la calidad de los datos de humedad del suelo ya que podrían ocasionar una gran incertidumbre en los procesos de simulación del ciclo hidrológico. Aunque es posible hacer mediciones de la humedad del suelo *in situ* en puntos concretos con exactitud, esto se vuelve inviable cuando se trata de estudios a gran escala donde este tipo de técnicas son laboriosas y ofrecen datos de medida de alcance espacial limitado. Es por ello por lo que se hace necesaria la obtención de datos de la humedad del suelo que puedan cubrir amplias extensiones de terreno y con series temporales largas.

No fue hasta finales de los años 70, cuando se empezaron a utilizar sensores de microondas tanto activos (radares) como pasivos (radiómetros), llegando a ser considerados hoy en día la mejor forma de monitorizar la humedad del suelo a gran escala espacial y temporal (Yang et al., 2020). Esta forma de monitorización se basa en la obtención de la humedad del suelo mediante la captación de la reflexión de la superficie terrestre como consecuencia de las diferencias entre las propiedades dieléctricas del agua y del suelo seco. Así, cuando la humedad del suelo aumenta, la constante dieléctrica del binomio agua-suelo aumenta, siendo registrada la fluctuación en la emisión por dichos sensores, estando relacionada la efectividad de las medidas con la longitud de onda (Zhuo & Han, 2016). Este avance en la tecnología para la obtención de la humedad del suelo dio pie al surgimiento de proyectos e iniciativas como la misión *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS) de la *European Space Agency* (ESA) en 2009, cuyo objetivo era cubrir la totalidad del planeta mediante el uso de un satélite con la incorporación de un sensor *Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis* (MIRAS), que se mueve en órbitas polares en torno a la Tierra en dos direcciones, ascendente y descendente, convirtiéndose en la primera misión capaz de ofrecer datos de humedad del suelo y salinidad de los océanos a la vez de forma global, o la *Climate Change Initiative for Soil Moisture* (CCI SM) por parte de la ESA también, la cual incluye la combinación de datos



procedentes de todos los satélites usados para la obtención de la humedad del suelo desde 1978 hasta nuestros días, con el objetivo de obtener datos unificados de estimación de la humedad del suelo con series temporales largas.

La creciente disponibilidad de productos de humedad del suelo basados en datos satelitales proporciona una gran oportunidad para mejorar las investigaciones hidrológicas (Baldwin et al., 2019; Srivastava et al., 2013), climatológicas (Kim et al., 2021; Rodríguez-Fernández et al., 2019), o agrícolas (Champagne et al., 2015; Sánchez et al., 2016), proporcionando una mayor exactitud en los procesos de simulación y predicción. Aun así, debe analizarse la calidad de estos datos con el fin de evaluar la incertidumbre que pueden proporcionar en los diferentes estudios (Dorigo et al., 2015; Zhang et al., 2017). Varias de estas investigaciones hidrológicas o climatológicas utilizan datos satelitales de humedad del suelo junto con bases de datos de caudales para el análisis de la relación entre humedad del suelo y escorrentía, como parte del proceso lluvia-escorrentía (Meier et al., 2011; Scipal et al., 2005; Wadsworth et al., 2020). Otras investigaciones se basan en esta misma relación para el análisis y predicción de niveles de calados en ríos usando datos satelitales de humedad del suelo (Vittucci et al., 2014), para el estudio de sequías (Paredes-Trejo et al., 2021), o simplemente como asimilación en modelos hidrológicos para dotarlos de una mayor precisión en la simulación de caudales (Azimi et al., 2020; Patil & Ramsankaran, 2017).

## **2. Objetivos**

El objetivo de este estudio es el análisis de la relación entre la humedad del suelo y la escorrentía superficial a lo largo de la cuenca hidrográfica del Duero, así como el análisis de la existencia o no de desfase temporal entre humedad del suelo y generación de escorrentía, al tiempo que se estudia si existen diferencias en función del tamaño de la superficie de la cuenca vertiente. Para ello, esta investigación se ha dividido en tres objetivos específicos principales:

- El análisis de dos productos de humedad del suelo como son SMOS y CCI SM, tanto de la superficie del suelo como del perfil, con el fin de evaluar la especificidad que tienen estos productos en su relación con los caudales registrados en la base de datos del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas).

- Utilización del modelo de Scipal et al. (2005), que simula caudales a partir de la humedad del suelo y un caudal mínimo registrado, con el fin de determinar si existe o no desfase temporal entre variaciones de humedad del suelo y los caudales registrados, así como el análisis de la existencia o no de variación en este desfase temporal a lo largo de la cuenca.
- Determinación del umbral crítico de humedad y su correspondiente caudal para cada uno de los sectores de cuenca vertiente estudiados, lo que permitirá conocer el umbral a partir del cual se desacoplan ambas variables, y el modelo anteriormente desarrollado deja de ser representativo.

### **3. Zona de estudio: La Cuenca del Duero, España**

La zona de estudio (Figura 1) comprende gran parte de la Cuenca Hidrográfica del Duero perteneciente a la parte española, en Castilla y León (España). Esta es la cuenca más grande de la Península Ibérica, drenando la mayor parte del territorio de esta región, con una extensión total de 98.073 km<sup>2</sup> (CHD, 2021). Del total de la Cuenca del Duero, 78.859 km<sup>2</sup> corresponden a la parte española, suponiendo el 81%. El río discurre a lo largo de 744 km en territorio español (CHD, 2021). Para este trabajo se ha utilizado la cuenca vertiente que discurre desde la cabecera hasta la estación de aforos de Zamora, lo que supone una superficie de 46.267 km<sup>2</sup> y una longitud del cauce principal de 546 km.

La zona de estudio se caracteriza por ser una llanura central elevada (600-800 metros de altura sobre el nivel del mar) rodeada por sistemas montañosos: Cordillera Cantábrica al norte, Sistema Ibérico al este y la Sistema Central al sur. Estos sistemas montañosos delimitan la Cuenca del Duero y forman parte de las cabeceras de los ríos afluentes que vierten al río Duero, el cual divide la cuenca en dos mitades.

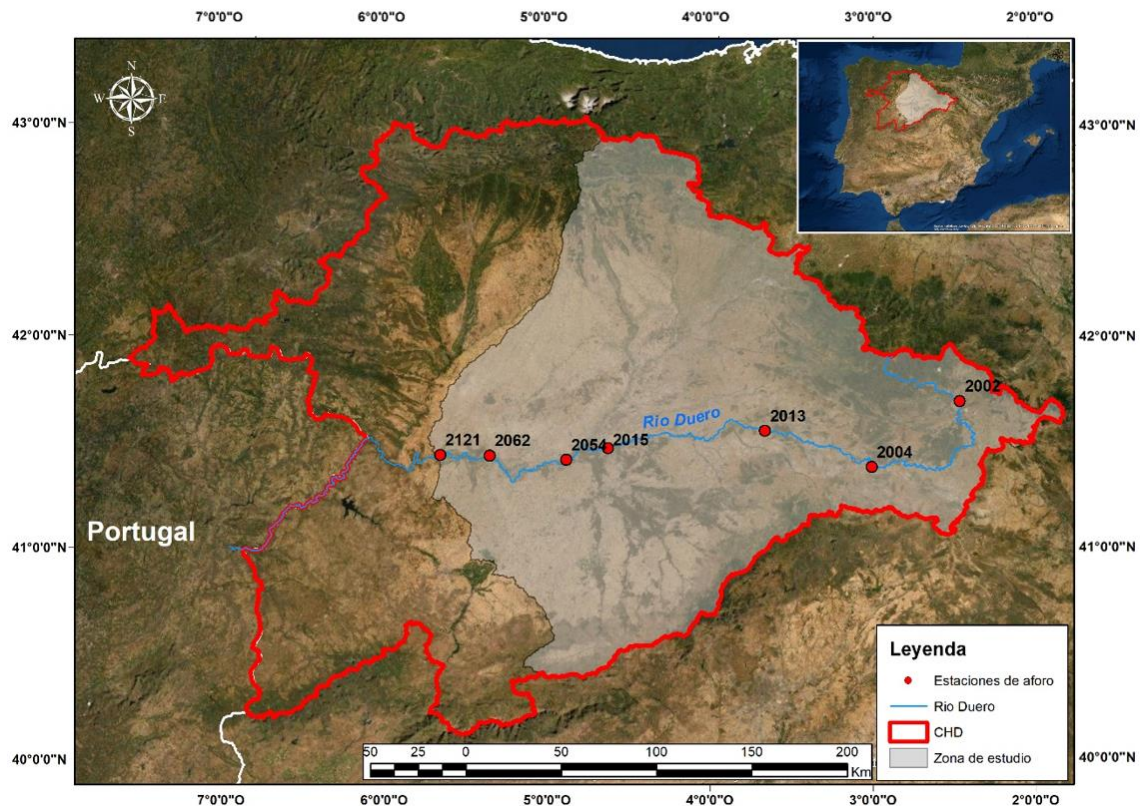


Figura 1. Zona de estudio perteneciente a la Cuenca del Duero.

La Cuenca del Duero presenta un clima principalmente mediterráneo, con presencia de continentalidad a causa del aislamiento orográfico, lo que condiciona las características climáticas del clima mediterráneo de la cuenca, dándose condiciones de sequía estival en el 90% de la cuenca (CHD, 2021). Al igual que en el resto de la Península Ibérica, se registran estaciones climáticas muy irregulares, habiendo lluvias abundantes en las estaciones de otoño e invierno y veranos muy secos. Según datos de la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD), el volumen de precipitaciones medias anuales es de aproximadamente 50.000 hm<sup>3</sup>, de los cuales cerca del 70% se evapora o es absorbido por la cobertura vegetal, mientras que el 30% restante se transforma en escorrentía que pasa a formar parte de las aportaciones al río Duero o se infiltra en el suelo (CHD, 2021). De hecho, los terrenos ocupados por esta cuenca son tan propensos a albergar agua en sus acuíferos que juntos suponen la mayor unidad acuífera de toda España y una de las más grandes de Europa. Se destaca también desde la CHD el régimen irregular de las precipitaciones, dando lugar a estaciones de estiaje muy pronunciadas que en ocasiones han sido seguidas por estaciones de lluvias abundantes que, junto con eventos de deshielo en las cabeceras han llegado a ocasionar importantes eventos de avenidas, llegando a

registrarse en la parte portuguesa del Duero caudales punta treinta veces el valor modular del Duero.

En lo referente a los distintos usos y ocupaciones del suelo a lo largo de la extensión de la cuenca (lo cual afecta igualmente de forma importante a la generación de escorrentía o infiltración), la CHD, de acuerdo con los datos del proyecto CORINE Land Cover, establecen la superficie cubierta por vegetación natural en 3,5 millones de hectáreas, lo que supone el 44% de la superficie total de la parte española de la Cuenca del Duero. Por otro lado, la vegetación debida al sector agrario ocupa 3,7 millones de hectáreas correspondientes a cultivos de secano y aproximadamente 550.000 hectáreas a cultivos de regadío, dejando 100.000 hectáreas ocupadas por suelo urbano e industrial en toda la cuenca (CHD, 2021).

#### **4. Bases de datos**

Dado que el objetivo de este estudio es el análisis de la relación entre la humedad del suelo y los caudales registrados, se han utilizado bases de datos, tanto satelitales en el caso de la humedad del suelo, como de diferentes estaciones de aforos situadas en el cauce del río Duero para el caso de los caudales. La recopilación de datos de las diferentes bases de datos ha sido realizada a escala diaria y en el marco temporal comprendido entre 2010-2017, si bien, como se comentará en el apartado de la metodología, estas series temporales diarias se han transformado a escala decadal, con el objeto de trabajar a una escala frecuentemente utilizada en la literatura en estudios de este tipo (Meier et al., 2011; Scipal et al., 2005).

##### **4.1 Productos satelitales de humedad del suelo**

Como se ha mencionado anteriormente en este trabajo, la humedad del suelo juega un papel crucial en los estudios del ciclo hidrológico y por ello se le considera como parámetro clave en los modelos de simulación y predicción hidrológica. Los avances en la toma de datos de humedad del suelo mediante el uso de satélites han mejorado de forma notable los estudios hidrológicos a gran escala, los cuales se veían afectados por la limitación de las mediciones *in situ* para cubrir zonas de estudio espacialmente grandes.

La tecnología usada por los satélites para la recuperación de datos de humedad del suelo se basa en la captación de la reflexión electromagnética del suelo. Esta componente electromagnética que refleja el suelo es causada por la diferencia entre la constante dieléctrica del resto de constituyentes del suelo ( $<5$ ) y la del agua que contiene (aproximadamente 80 a temperatura ambiente). Esta reflexión electromagnética se capta mediante los sistemas de microondas (activos o pasivos) del satélite bajo casi cualquier tipo de climatología e independientemente de la luz del sol (Dorigo et al., 2017). A pesar de su gran utilidad, las observaciones a través de las microondas tienen ciertas limitaciones, prueba de ello es la imposibilidad de obtener datos de suelos cubiertos de nieve o suelos helados (Ulaby et al., 1982). A su vez los suelos con topografía compleja y las zonas urbanas o industriales tienen efectos negativos sobre la calidad de los datos obtenidos (Wagner et al., 1999). Es por esto por lo que es necesario la utilización de distintos filtros que limpien el ruido de las microondas recibidas o la utilización de otras frecuencias alternativas de menor magnitud. Este es el caso de la banda L, con una frecuencia de 1,4 GHz que permiten una mayor penetración a través de las coberturas vegetales que la banda C o la banda X, habiéndose demostrado que frecuencias más bajas como la banda L, correspondientes a una longitud de onda mayor, penetran con mayor profundidad en el suelo (más de 5 cm), (Ulaby et al., 1982).

En este estudio se han utilizado distintos productos satelitales, así como distintas profundidades de estudio, superficie (0-5 cm) y perfil (0-100 cm), con el fin de comprobar la adecuación de las aproximaciones de estos datos para analizar la relación entre humedad del suelo y caudal.

#### **4.1.1 ESA *Soil Moisture Ocean Salinity* (SMOS)**

La misión SMOS fue lanzada en 2009 por la ESA, con la contribución del *Centre National d'Etudes Spatiales* (CNES) en Francia y el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) en España, con el objetivo de medir la humedad superficial del terreno y la salinidad superficial de los océanos (Kerr et al., 2016). Para el registro de estas mediciones, se emplea un satélite que utiliza un radiómetro interferométrico 2D de banda-L (1,4 GHz) como el MIRAS (van der Schalie et al., 2021), el cual recoge los datos de humedad del suelo dos veces al día mediante dos orbitas que se procesan por separado: la órbita ascendente, a las 6:00 am, y la órbita descendente, a

las 6:00 pm de la hora local, respectivamente, y con una revisita de entre 1 y 3 días (Wu et al., 2020).

El *Barcelona Expert Center* (BEC) es un laboratorio experto de apoyo a la ESA centrado en el desarrollo de algoritmos para la mejora de los productos L1 y L2 (oceánicos) de SMOS, aunque también contribuye a la mejora de los productos L2 terrestres (Pablos et al., 2019). Uno de los productos actualmente desarrollado por el BEC es la humedad del suelo superficial regional de nivel 4 (BEC SMOS L4), derivado del producto SMOS original, mediante un desarrollo semi empírico de reducción de escala (Portal et al., 2018).

Este producto ha sido validado a través de diversas redes de estaciones de medida de humedad del suelo, entre las que figura la red de estaciones *Soil Moisture Measurements Stations Network of the University of Salamanca* (REMEDIHUS), que consta de 24 estaciones con sensores instalados a 5 cm de profundidad (Pablos et al., 2019). Así pues, el producto SMOS L4 ha sido usado y testado no sólo en la cuenca del Duero si no en la totalidad de la Península Ibérica (Pablos et al., 2018). También ha sido usado en aplicaciones como el estudio de índices de sequía (Pablos et al., 2017), la cuantificación de los efectos del estrés hídrico en la eficiencia del uso de la luz en ecosistemas mediterráneos (Sanchez-Ruiz et al., 2017), el estudio de los efectos del clima y la humedad del suelo en bosques propensos a la sequía (Chaparro et al., 2017), o incluso como pieza clave en la calibración de modelos hidrológicos (Fleischmann et al., 2021).

Este producto “BEC SMOS L4” de resolución espacial de 1 km, es el empleado para el análisis de este estudio, utilizando para ello el promedio de las dos órbitas, ascendente y descendente, para cada día a lo largo del periodo comprendido entre los años hidrológicos 2010-2017. La limitación en la escala temporal para esta base de datos viene dada por el comienzo de la recopilación de datos, siendo el primer año con datos completos el 2010.

#### **4.1.2 ESA *Climate Change Initiative* (CCI) *Soil Moisture* (SM)**

El Proyecto CCI SM fue creado en 2010 por la ESA, con el objetivo de satisfacer la necesidad de monitorización de la humedad del suelo para múltiples aplicaciones. Dado que las misiones con un único satélite proporcionaban registros demasiado cortos (inferior a 30 años), el proyecto *Water Cycle Multi-Mission Observation Strategy*

(WACMOS) creado por parte de la ESA en 2009 y con la colaboración de *Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX)* de la *World Climate Research Program (WCRP)*, promovió el desarrollo de captación de la humedad del suelo (entre otros parámetros del ciclo hidrológico) a largo plazo mediante múltiples sensores de microondas Activos, Pasivos y Combinados (Dorigo et al., 2017). Los productos pasivos y combinados están disponibles desde 1978, mientras que los productos activos comienzan en 1991 (González-Zamora et al., 2019).

El producto ESA CCI SM Activo se produce mediante la integración de datos de dispersómetros originales, mientras que el producto ESA CCI SM Pasivo se genera mediante la integración de datos de humedad del suelo radiométricos (Ikonen et al., 2016). Así pues, el producto ESA CCI SM Combinado es la integración de estos productos finales Activo y Pasivo, proporcionando información promedio de la humedad del suelo con una resolución espacial de 25x25 km, de forma diaria.

A pesar de que el producto CCI SM tenga una menor resolución con respecto a SMOS, esto no significa que tenga menor utilidad o sea menos utilizado. Prueba de ello son sus aplicaciones en diversos estudios como la caracterización de sequías agrícolas (Zhou et al., 2021), la monitorización de la eficiencia en el uso del agua del suelo en ecosistemas terrestres (Qi et al., 2019), o la calibración de modelos hidrológicos (Demirel et al., 2019; López López et al., 2017). Al igual que con el producto SMOS, el producto ESA CCI SM ha sido evaluado y validado, entre otras, mediante la red de estaciones de medida de humedad del suelo REMEDHUS (González-Zamora et al., 2019; Zhu et al., 2019), mostrando mejores resultados con el producto ESA CCI SM Combinado frente al Activo y al Pasivo.

Para este estudio se ha utilizado la base de datos del producto ESA CCI SM Combinado v05.2, el cual incluye datos derivados del algoritmo mejorado de obtención de datos radiométricos AMSR-2 en el producto pasivo y, por primera vez, datos de la misión *Soil Moisture Active Passive (SMAP)*. Utiliza datos procedentes de 8 sensores pasivos y 4 sensores activos, de los que se ha recogido la base de datos con marco temporal de 2010 hasta 2017 (años hidrológicos).

## 4.2 Base de datos hidrológica

Los datos de caudales del río Duero para la zona de estudio se han obtenido de la base de datos del CEDEX. Para este estudio se han seleccionado 7 estaciones de aforo estratégicas desde la cabecera del río Duero, en Garray, hasta la estación de aforos de Zamora, que es la última situada en el cauce del Duero antes de su paso a Portugal. Estas estaciones se han seleccionado en función de su distribución a lo largo del río, buscando recoger diferentes superficies de cuenca, y que a su vez coincidiesen con el marco temporal de las series establecido para este estudio, desde 2010 hasta 2017, de forma continuada y sin lagunas de datos. En la tabla 1 se muestra la recopilación de las estaciones de aforo utilizadas para este estudio, su localización y sus características.

Tabla 1. Características de las estaciones de aforo y de la cuenca correspondiente.

<b>Estaciones</b>	<b>Código</b>	<b>Longitud (°)</b>	<b>Latitud (°)</b>	<b>Área Cuenca (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Caudal medio anual (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal relativo (l/s/km<sup>2</sup>)</b>
Garray	2002	-2,2713	41,4754	1.460,33	9,16	6,27
Gormaz	2004	-3,0033	41,2916	5.094,60	11,98	2,35
Aranda	2013	-3,4045	41,3919	7.474,35	15,80	2,11
Herrera	2015	-4,3954	41,3358	12.840,67	26,06	2,02
San Miguel	2054	-4,5545	41,3019	36.588,29	93,52	2,55
Toro	2062	-5,2441	41,3059	41.772,66	98,21	2,35
Zamora	2121	-5,4316	41,3047	46.267,09	100,45	2,17

## 5. Metodología

En este estudio se lleva a cabo el análisis de las bases de datos satelitales de humedad del suelo y su relación con los caudales a lo largo de la cuenca del Duero. Para ello se han comparado varios productos de humedad del suelo, obtenidas a partir de datos satelitales, para comprobar su bondad en relación con los caudales registrados, con el fin de poder analizar de una forma más robusta la vinculación entre el binomio humedad del suelo-caudal y su distribución en función de la superficie de la cuenca. El desarrollo del análisis de los productos satelitales de humedad del suelo, así como la aplicación del modelo propuesto por Scipal et al. (2005), se han realizado mediante el desarrollo de un código de programación con el software MATLAB R2020b.

### 5.1 Análisis de las distintas bases de datos satelitales (SMOS y CCI)

Para el análisis de la relación entre la humedad del suelo y los caudales, es necesario partir de bases de datos precisas que permitan realizar estudios robustos. Por ello se han



comparado cuatro productos de humedad del suelo analizando su relación con los datos de caudales. Los productos utilizados para este estudio han sido, por un lado, datos de BEC SMOS L4, tanto de la superficie del suelo (0-5 cm) como del perfil (0-100 cm de profundidad) con 1x1 km de resolución espacial y, por otro, el producto ESA CCI SM Combinado v05.2, también de la superficie y del perfil, con una resolución espacial de 25x25 km.

Dado que los productos BEC SMOS L4 y ESA CCI SM proporcionan datos de la humedad del suelo pertenecientes a la superficie (0-5 cm primeros de profundidad), los datos de humedad del suelo pertenecientes al perfil (hasta 100 cm de profundidad) son calculados mediante el modelo del *Soil Water Index* (SWI), (Wagner, Lemoine, & Rott, 1999). Este modelo es utilizado comúnmente para el cálculo de la humedad del suelo del perfil a partir de datos satelitales relativos a la humedad del suelo de la zona superficial. Se caracteriza por ser un modelo simple en el que únicamente se necesita, aparte de los datos de la humedad del suelo superficial, un parámetro exponencial (T) como *input*. Este parámetro relaciona el tiempo que tarda el agua en fluir a través del suelo, es decir, relaciona la capa superficial (0-5cm de profundidad), la capa del perfil (0-100cm de profundidad) y el agua circulante de la primera capa hacia la segunda simulando la dinámica de fluidos del agua (Wagner, Lemoine, & Rott, 1999). El valor óptimo para este parámetro (T) se establece como aquel que ofrece una mayor correlación de Pearson entre los valores obtenidos de SWI y valores medidos de humedad del suelo para los diferentes rangos de profundidad. Para ello, en este estudio se ha seguido la metodología de Pablos et al. (2018), que utiliza datos de la superficie y de profundidad SMAP L4 para compararlos con los valores de SWI y obtener el valor óptimo para el parámetro (T).

Una vez obtenidos los valores de la humedad del suelo tanto de la zona superficial como del perfil, el siguiente paso consiste en el procesado de una capa ráster, un Modelo Digital del Terreno (MDT) obtenido a partir de la base de datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) mediante el uso del *software* de información geográfica ArcGIS 10.5. Este procesado permite calcular la delimitación geográfica de cada una de las cuencas vertientes relativas correspondientes a cada estación de aforos seleccionada (Figura 2), mediante herramientas de cálculo de dirección y acumulación del flujo hidrológico.

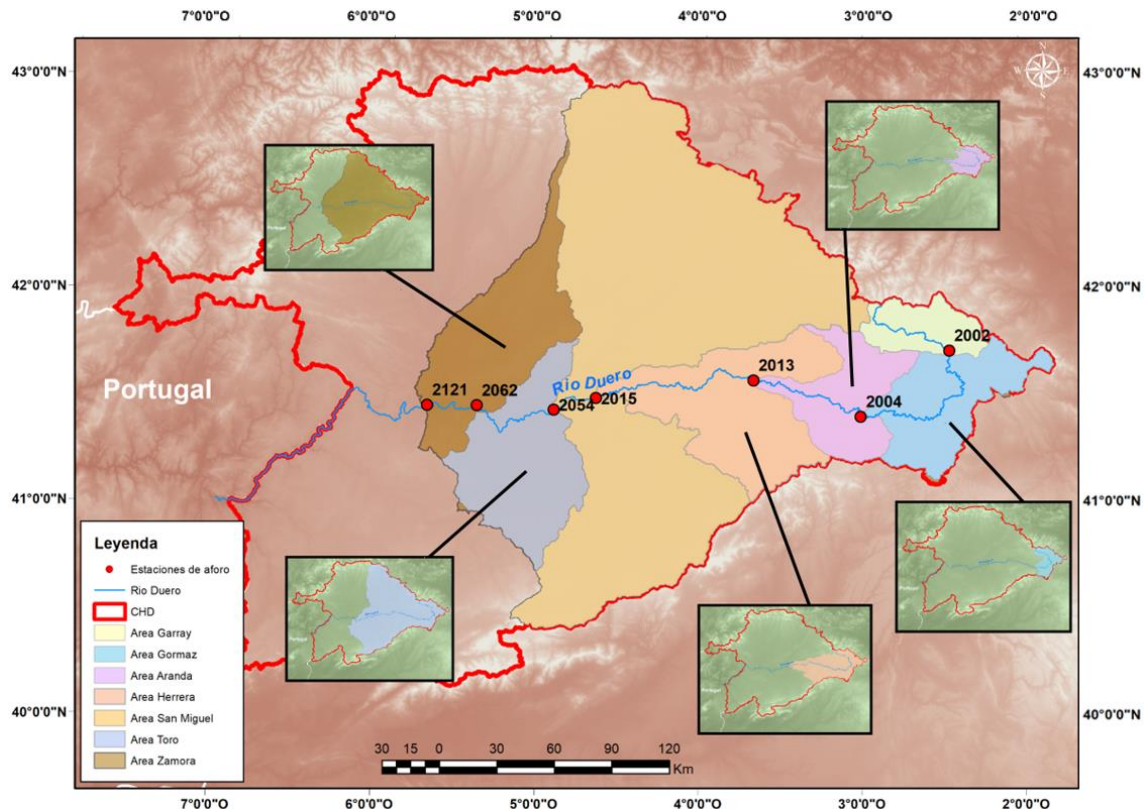


Figura 2. Estaciones de aforo y cuencas vertientes relativas pertenecientes a cada estación de aforos.

La determinación de cada una de las cuencas vertientes relativas permite delimitar la malla de los datos satelitales de humedad del suelo correspondiente al área de cada cuenca. Esta malla ofrece una imagen diaria de distribución de la humedad del suelo mediante píxeles o celdas con un valor de humedad del suelo por cada píxel.

El proceso de análisis de los datos satelitales comienza con el cálculo del *Basin Water Index* (BWI) desarrollado por Scipal et al. (2005), es decir, el promedio de todos los píxeles que componen cada cuenca, de forma diaria, obteniendo así una serie temporal de un único valor promedio diario por cada cuenca. Como se ha mencionado anteriormente y, siguiendo la literatura (Meier et al., 2011; Scipal et al., 2005), estas series temporales diarias se transforman en series temporales decadales, calculando el valor promedio de humedad del suelo de 10 en 10 días. Así mismo, la serie temporal de caudales de cada estación de aforos se transforma también usando una escala decadal para realizar el estudio dentro de una misma escala temporal. De esta forma se analizan los distintos productos satelitales de humedad del suelo y de los caudales con series temporales finales de 255 datos para cada cuenca vertiente relativa.

El estudio de idoneidad de los diferentes productos satelitales se ha realizado primero mediante el análisis de dependencia lineal entre las variables aleatorias correspondientes a la humedad del suelo y los caudales, utilizando para ello tanto gráficos de dispersión como el coeficiente de correlación de Pearson para el estudio analítico y el cálculo de su significación ( $\rho < 0,001$ ), con el objetivo de poder rechazar la hipótesis nula y por lo tanto, poder afirmar si existe o no tal relación de dependencia entre ambas variables. Mediante este análisis se puede observar el grado de relación entre estas dos variables y, a su vez, establecer que producto de humedad del suelo tiene un grado de relación más fuerte con los datos de caudales de las estaciones de aforo, así como establecer que capa del suelo ofrece un mayor grado de relación, si la zona superficial o la perteneciente al perfil. Este paso es clave, ya que el producto de humedad del suelo que ofrece un mayor grado de relación con los datos de caudales es el que se debe usar en el modelo de simulación propuesto para este estudio.

## 5.2 Modelo Humedad del Suelo – Caudal

Utilizando el producto de humedad del suelo (tanto de la zona de la superficie como del perfil) que ofrece mayor correlación con los datos de caudales, se aplicó el modelo desarrollado por Scipal et al. (2005). Este modelo de simulación de caudales emplea una regresión logarítmica con una escala temporal decadal, para obtener el caudal a partir de la humedad del suelo [Ec. 1], usando para ello el caudal mínimo ( $Q_0$ ) y la humedad del suelo máxima ( $SM_{max}$ ), ambos obtenidos de la serie temporal, un factor de escala hidrológico ( $\chi_Q$ ) y el tiempo de retardo o “*time lag*” ( $\Delta t$ ) que define la diferencia temporal en la respuesta de ambas variables (humedad del suelo y caudal) a eventos de lluvia, así como las distintas humedades del suelo (SM) que se suceden a lo largo de las series temporales pertenecientes a cada cuenca vertiente:

$$Q(t) = Q_0 + \chi_Q \ln \left( \frac{SM_{max}}{SM_{max} - SM(t - \Delta t)} \right) \quad [1]$$

El factor de escala ( $\chi_Q$ ) permite ajustar la curva del modelo a la nube de puntos del gráfico de dispersión y ajustar a su vez la curva de caudales simulados a la curva de caudales observados, aumentando o disminuyendo la magnitud de los valores de caudales

obtenidos. Por otro lado, el parámetro clave en este modelo es el desfase temporal ( $\Delta t$ ) el cual determina como ya se ha mencionado, si existe alguna diferencia en el tiempo de respuesta entre la variación de la humedad como consecuencia de un evento de precipitación y la generación de caudales, producto de dicho evento.

Así pues, se ha aplicado el modelo usando diferentes desfases temporales:  $\Delta t = 0$  días,  $\Delta t = 10$  días,  $\Delta t = 20$  días,  $\Delta t = 30$  días,  $\Delta t = 40$  días,  $\Delta t = 50$  días, y  $\Delta t = 60$  días (de 10 en 10, debido a que se trabaja con una escala decadal), obteniéndose diferentes series temporales de caudales simulados. Al igual que en la sección 5.1, se ha realizado un análisis de dependencia lineal, esta vez entre los caudales simulados obtenidos con cada valor de desfase temporal y los caudales registrados por el CEDEX, usando para ello el coeficiente de correlación de Pearson, siguiendo la propuesta de Scipal et al. (2005). Cuanto mayor sea el valor de este coeficiente, mayor ajuste existirá entre los valores simulados por el modelo y los caudales observados. Así pues, el desfase temporal correspondiente a cada cuenca vertiente será aquel que permita al modelo generar caudales simulados con una mayor relación lineal con respecto a los observados. Este parámetro permite analizar si existe un desfase temporal entre ambas variables en las diferentes cuencas vertientes y si este desfase temporal varía a lo largo de toda la zona de estudio.

La función del modelo que relaciona los valores de humedad del suelo y los caudales simulados forma una curva de ajuste en forma de “J”, en lugar de una recta. Esto es debido a que el suelo tiene un umbral (umbral de escorrentía), límite a partir del cual no puede contener más agua, es decir, se satura, y a partir de aquí toda precipitación que acontezca pasará a formar parte de la escorrentía y, por tanto, a generar caudal. Es por esto por lo que el modelo presentado en este estudio no pretende simular los caudales históricos registrados, si no la relación entre humedad del suelo y los caudales circulantes hasta el punto de desacople entre ambas variables.

Esta circunstancia motiva el cálculo de este punto de desacople a partir del cual el modelo deja de ser predictivo, por ello se ha calculado el valor tanto de la humedad del suelo como el correspondiente caudal, a partir del cual deja de existir relación entre ambas variables. Dado que esta función que define el modelo no tiene puntos máximos ni mínimos, no puede obtenerse un punto de inflexión de la forma tradicional (según la definición es aquel punto en que la segunda derivada de la función tiene valor de cero). Por ello en este estudio se ha calculado la doble diferencia entre elementos contiguos de la serie temporal para encontrar el punto a partir del cual la diferencia aumenta de forma

más elevada de lo normal. De esta forma se han calculado los puntos de desacople para cada cuenca vertiente relativa y se han calculado los correspondientes periodos de retorno ( $T_r$ ) de los caudales pertenecientes a estos puntos, comparándolos a su vez con los caudales relativos de cada cuenca vertiente. Para el cálculo de los periodos de retorno asociados a una serie temporal se ha aplicado el método de Weibull (Weibull, 1951) a la serie temporal de los caudales observados. Este método, que ha sido utilizado comúnmente en estudios estadísticos aplicados a la hidrología (Ashkar & Aucoin, 2012; Booij & de Wit, 2010; Li et al., 2013), establece las probabilidades de ocurrencia de eventos, y por tanto los periodos de retorno, de una serie temporal con datos ordenados de forma ascendente y siguiendo la siguiente relación:

$$T_r = \frac{n+1}{m} \quad [2]$$

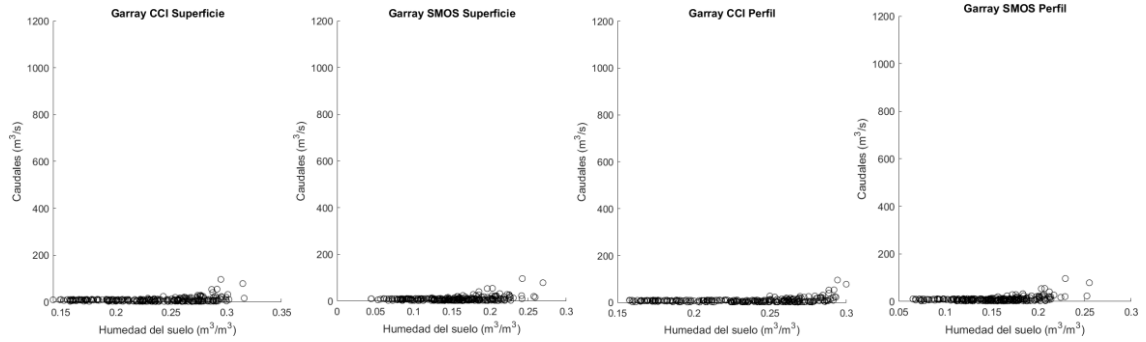
Donde  $n$  es el número de datos de la serie temporal y  $m$  es el orden de la posición del elemento en la serie temporal, siendo  $m=1$  el valor del primer elemento y  $m=n$  el valor del último elemento.

Dado que los caudales simulados correspondientes a los puntos de desacople no tienen por qué coincidir con los valores de caudales observados, se ha establecido una interpolación lineal entre los valores de caudales observados y el caudal simulado correspondiente para obtener el periodo de retorno exacto, así como su probabilidad de ocurrencia.

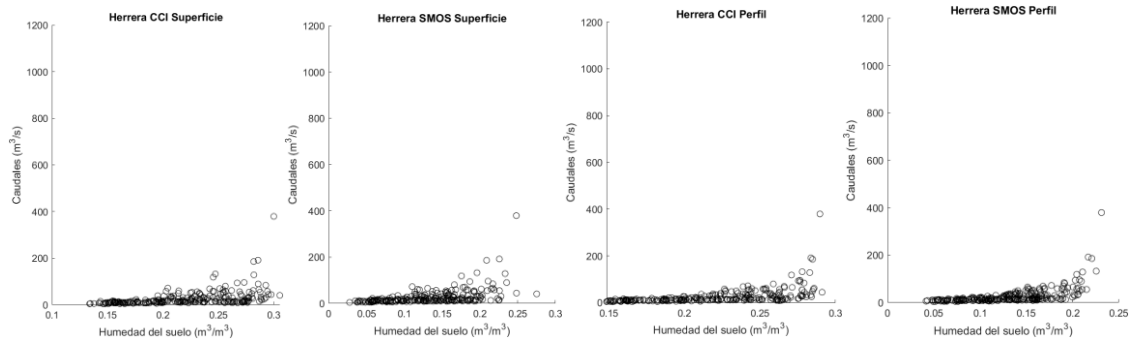
## **6. Resultados y discusión**

El análisis visual de la relación de ambas variables mediante el uso de gráficos de dispersión muestra una falta de linealidad, ya que como puede observarse en la Figura 3 se forma una curva en forma de “J” donde se observa un desacople del caudal con respecto a los valores más altos de la humedad del suelo.

**a.**



**b.**



**c.**

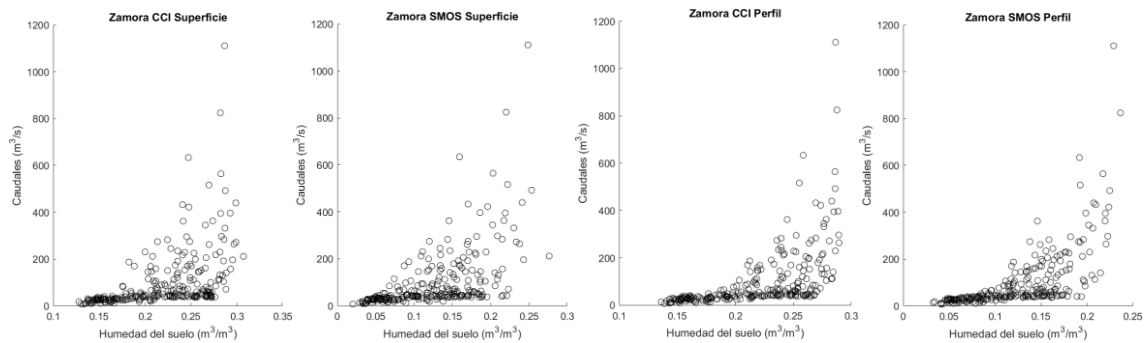


Figura 3. Correlación entre la humedad del suelo de tres cuencas vertientes y el caudal correspondiente: Garray (a), Herrera (b) y Zamora (c).

Es por ello por lo que se ha calculado el coeficiente de correlación de Pearson y el valor de las significaciones correspondientes a cada correlación, con el objeto de determinar la relación existente entre ambas variables. En la tabla 2 se recogen los resultados obtenidos

del análisis numérico de correlación y su significación, donde se demuestra que, aunque los valores de correlación no son muy altos debido a la falta de linealidad, aunque en todos los casos los valores son significativos, se observa claramente la relación de dependencia entre ambas variables.

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre los diferentes productos de humedad del suelo con los caudales registrados (\* Significación estadística de la correlación  $p < 0,001$ ).

Coeficientes de correlación					
Estaciones	Área Cuenca (km <sup>2</sup> )	Superficie		Perfil	
		CCI	SMOS	CCI	SMOS
<b>Garray</b>	1.460	0,261*	0,321*	0,304*	0,377*
<b>Gormaz</b>	5.094	0,309*	0,348*	0,354*	0,406*
<b>Aranda</b>	7.474	0,449*	0,484*	0,501*	0,559*
<b>Herrera</b>	12.840	0,422*	0,466*	0,486*	0,552*
<b>San Miguel</b>	36.588	0,484*	0,555*	0,552*	0,640*
<b>Toro</b>	41.772	0,498*	0,563*	0,568*	0,655*
<b>Zamora</b>	46.267	0,480*	0,551*	0,553*	0,645*

Por un lado, puede observarse claramente una mayor idoneidad de los productos de SMOS frente a los productos CCI SM, tanto en la zona superficial, como en el perfil y, a su vez, puede observarse también que ofrecen mejores resultados los datos procedentes del perfil con respecto a los datos superficiales. A modo de comparativa con otros estudios previos donde también se ha analizado la relación entre productos satelitales de humedad del suelo y caudales, en Bartsch (2010) se obtiene un valor de correlación de Pearson de 0,62 para la relación entre los datos de humedad del suelo superficial (“ASCAT *Soil moisture*” en este caso) en escala decadal y los caudales registrados para la cuenca de Lena-Kyusyur, en Rusia (con un área de 2.440.000 km<sup>2</sup>).

Por otro lado, los valores de correlación entre las variables aumentan al aumentar el área de las cuencas vertientes. Esto significa que, a medida que aumenta la superficie de la cuenca, los datos de humedad del suelo se ajustan mejor a los caudales observados. En la Figura 4 se muestra la variación del coeficiente de correlación de Pearson acorde a la variación en la extensión de la superficie de las cuencas. Puede observarse que las diferencias entre los diferentes productos y las diferentes zonas de recogida de datos se hacen más evidentes también al aumentar la superficie de la cuenca vertiente.

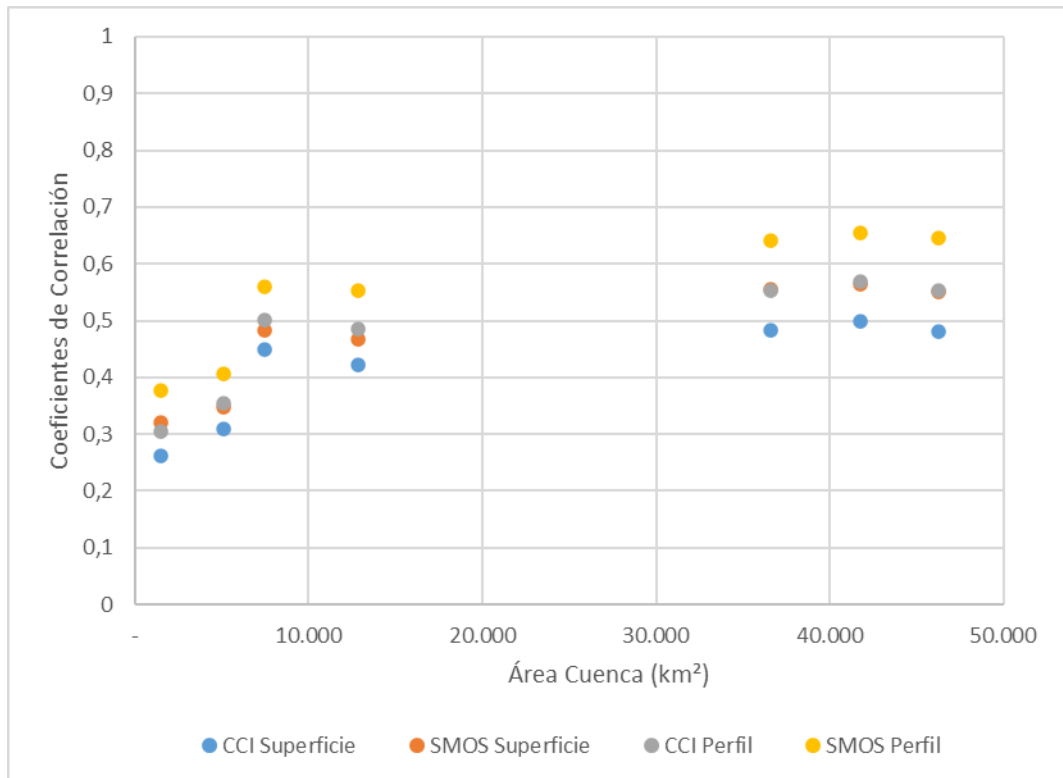


Figura 4. Valores de los coeficientes de correlación obtenidos con respecto a la superficie de la cuenca vertiente.

A pesar de las diferencias existentes entre ambos productos y las distintas zonas, se aprecia una clara igualdad entre la idoneidad del producto CCI SM procedente de la zona del perfil y el producto SMOS procedente de la superficie del suelo, siendo incluso más cercanas cuanto mayor es la superficie de la cuenca, al revés que sucede con el resto de comparativas entre productos, donde aumentan sus diferencias al aumentar la superficie.

Cómo se extrae de los resultados, los productos SMOS ofrecen un mayor grado de correlación con los caudales observados, por ello se han utilizado estos datos de humedad del suelo para el desarrollo del modelo presentado por Scipal et al. (2005). Se ha decidido utilizar, a modo comparativo, los datos tanto de la superficie del suelo como del perfil en la aplicación del modelo para observar posibles diferencias en el resultado.

En las tablas 3 y 4 se recogen los parámetros calibrados, para cada una de las estaciones, que definen el modelo utilizado. Cómo se ha descrito en el apartado 5.2 de este estudio, el criterio de calibración de este modelo se basa en el desfase temporal ( $\Delta t$ ), siendo este el que ofrece una mayor correlación de Pearson (R) entre los caudales simulados por el modelo y los caudales registrados.



Tabla 3. Parámetros calibrados para la humedad superficial en todas las estaciones.

<b>Estación</b>	<b>Áreas (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Q<sub>0</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>χ<sub>Q</sub></b>	<b>SM<sub>max</sub> (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Δt(días)</b>	<b>R</b>
<b>Garray</b>	1.460	1,32	10	0,269	0	0,348
<b>Gormaz</b>	5.094	2,71	15	0,261	0	0,463
<b>Aranda de Duero</b>	7.474	4,16	20	0,265	0	0,602
<b>Herrera de Duero</b>	12.840	3,78	60	0,275	10	0,554
<b>San Miguel del Pino</b>	36.588	9,30	170	0,274	10	0,645
<b>Toro-Duero</b>	41.772	7,61	190	0,273	10	0,656
<b>Zamora</b>	46.267	7,08	210	0,276	10	0,656

Tabla 4. Parámetros calibrados para la humedad del perfil en todas las estaciones.

<b>Estación</b>	<b>Áreas (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Q<sub>0</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>χ<sub>Q</sub></b>	<b>SM<sub>max</sub> (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Δt(días)</b>	<b>R</b>
<b>Garray</b>	1.460	1,32	10	0,255	0	0,420
<b>Gormaz</b>	5.094	2,71	12	0,233	0	0,497
<b>Aranda de Duero</b>	7.474	4,16	15	0,238	0	0,672
<b>Herrera de Duero</b>	12.840	3,78	28	0,231	0	0,739
<b>San Miguel del Pino</b>	36.588	9,30	90	0,234	0	0,809
<b>Toro-Duero</b>	41.772	7,61	110	0,231	0	0,789
<b>Zamora</b>	46.267	7,08	125	0,236	0	0,757

Cómo puede observarse, al igual que con los datos de humedad del suelo, los caudales simulados por el modelo parecen aumentar su correlación con respecto a los caudales observados cuanto mayor es la superficie de la cuenca vertiente. Esto indica que el modelo es más eficiente cuanto mayor es la superficie de la cuenca, debido posiblemente a que los datos de humedad del suelo, a su vez, mejoran según aumenta la superficie de estudio. También se observa un mejor comportamiento del modelo usando datos del perfil que usando datos procedentes de la superficie del suelo.

En cuanto a la humedad del suelo máxima, puede observarse un aumento notable en la diferencia entre los datos superficiales y los referidos al perfil cuando la extensión de las cuencas vertientes supera los 10.000 km<sup>2</sup>. Este hecho, junto con los resultados de correlación ofrecidos por ambos modelos podría ser causado por una sobreestimación de los datos de humedad del suelo obtenidos directamente del satélite, los cuales se sabe que tienen un rendimiento más deficiente en algunas regiones con cobertura vegetal densa (de Jeu et al., 2008).

Por otro lado, puede verse que, mientras que en el modelo que utiliza datos de la zona perteneciente al perfil no se observa desfase temporal alguno, en el modelo que utiliza los datos de la superficie del suelo se observa un desfase temporal a partir de superficies mayores a las 10 000 km<sup>2</sup>. Esto podría deberse a la diferencia existente entre la obtención de los datos de las diferentes zonas, obteniéndose los datos de la superficie directamente mediante el producto satelital BEC SMS SM L4, mientras que los datos del perfil han sido estimados a partir de los primeros, como se ha mencionado en la metodología.

A modo de comparativa tenemos la investigación desarrollada por Park et al. (2011), la cual basa su estudio en la cuenca de Wangsuk (Corea del Sur) de 200 km<sup>2</sup> de extensión, y utiliza el mismo modelo desarrollado por Scipal et al. (2005). Este estudio utiliza el nivel del agua del río en lugar del caudal, obteniendo un valor de correlación de Pearson para el modelo de 0,39 usando datos satelitales de humedad del suelo superficial procedentes del producto AMSR-E escalado, y 0,72 aplicando mediciones *in situ* al modelo. Mientras, con los modelos obtenidos en este trabajo, pueden observarse valores de correlación que van desde 0,348 hasta 0,656 en el caso de la zona superficial y desde 0,420 hasta 0,809 en el caso del perfil. Por otro lado, comparando estos resultados con Scipal et al. (2005), en su estudio original se obtienen valores de correlación entre 0,94 - 0,96 pero para cuencas vertientes de mucho mayor tamaño, con áreas entre 66.750 km<sup>2</sup> y 524.000 km<sup>2</sup>.

La Figura 5 muestra los resultados de la serie temporal de caudales simulados por el modelo frente a los caudales observados, en una misma cuenca vertiente utilizando datos del humedad del suelo del perfil y de la superficie a modo de comparativa.

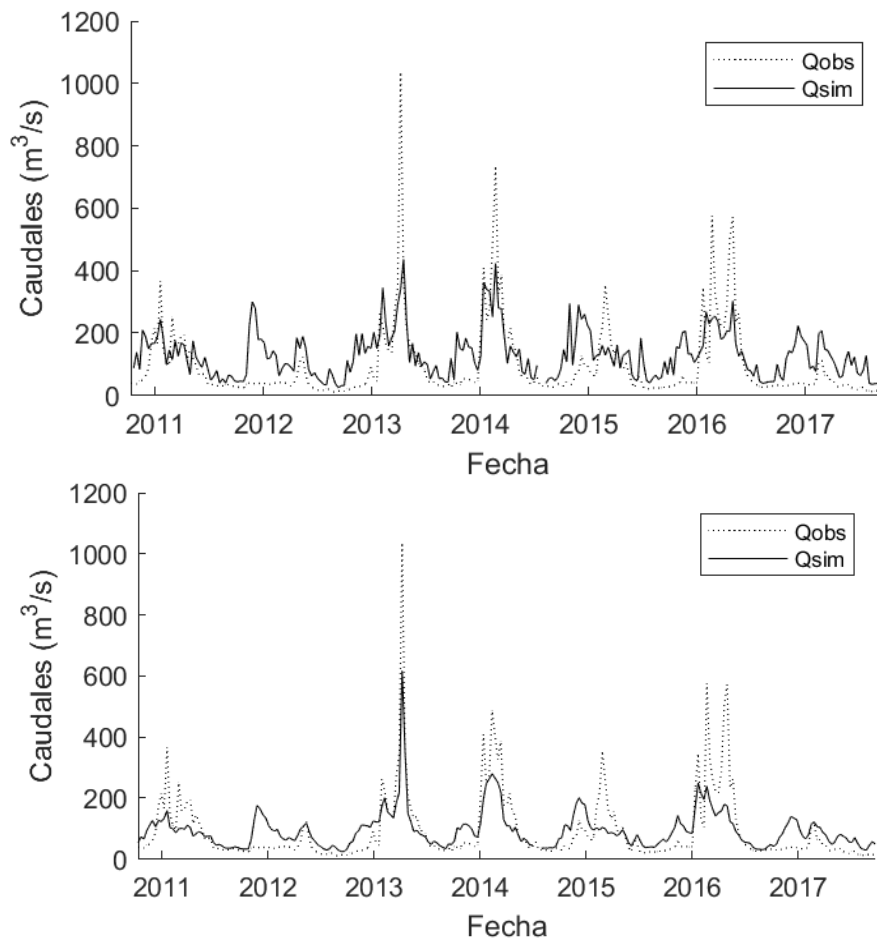


Figura 5. Comparativa entre los caudales simulados y la serie de caudales hidrológicos observados de la estación de San Miguel. Arriba con datos de humedad superficial, abajo con datos de humedad del perfil del suelo).

En esta comparativa puede observarse de una forma más clara como los caudales simulados se ajustan mejor a los caudales observados mediante el uso de datos del perfil que mediante el uso de datos de la superficie, no solo en valores bajos de caudal sino también en los picos de descarga donde se acopla mucho mejor el modelo que utiliza datos de humedad del perfil del suelo. También se observa una mayor suavidad en la serie temporal de caudales simulados por el modelo que utiliza datos de la zona del perfil mientras que en los caudales simulados por el modelo que utiliza los datos superficiales de humedad del suelo muestra una trayectoria no uniforme.

En cuanto a la función que describe el modelo, la Figura 6 muestra de forma conjunta la curva obtenida mediante el modelo junto con los datos de humedad del suelo y caudales observados en un gráfico de dispersión. De esta manera se puede apreciar el ajuste que ofrece el modelo a la hora de simular los caudales utilizando los datos de humedad del suelo.

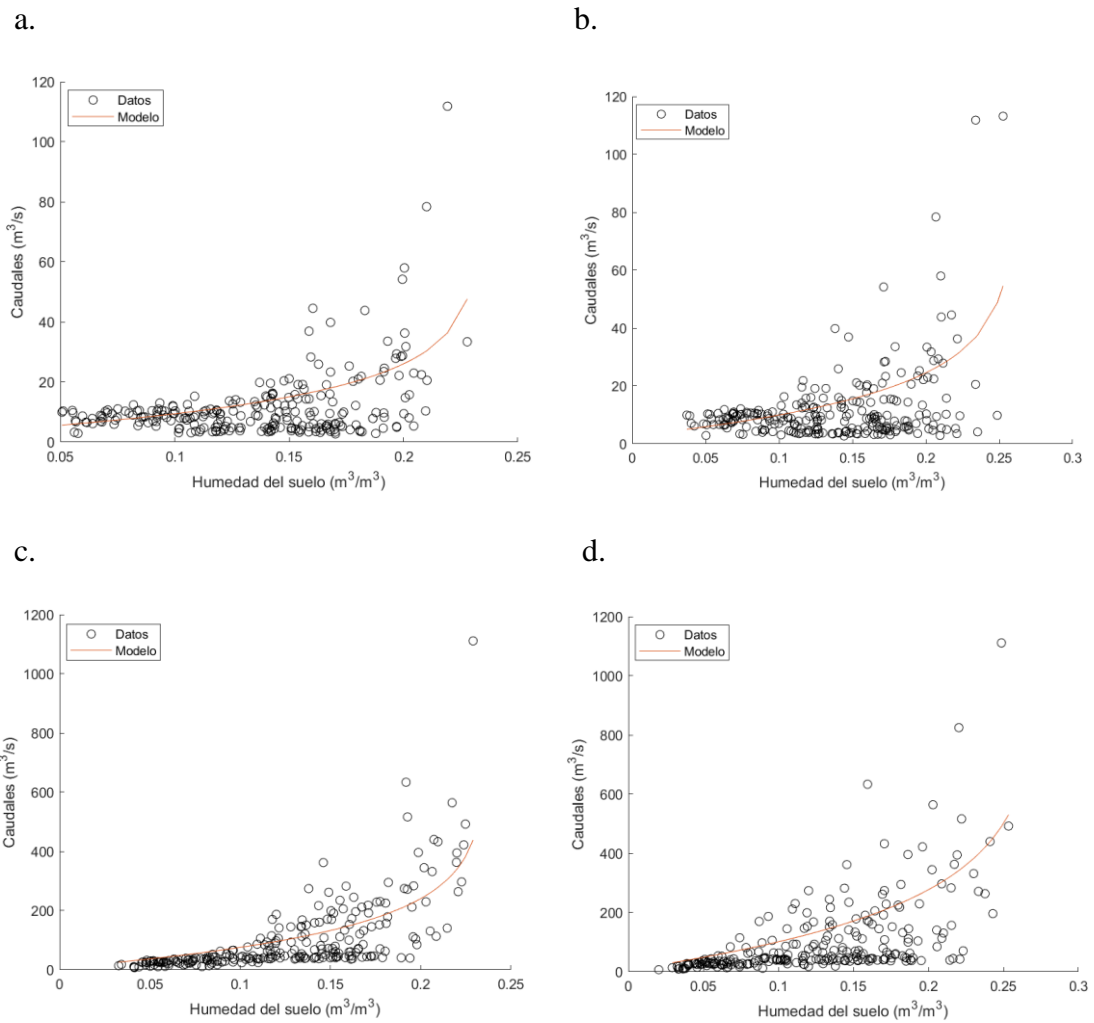


Figura 6. Gráfico de dispersión entre datos de humedad del suelo y caudales para las estaciones de Gormaz (arriba) y Zamora (abajo), superficie (derecha) y perfil (izquierda), y modelo ajustado.

Cómo se observa, y al igual que se menciona en la metodología, la función del modelo genera una curva con forma de “J” que representa una divergencia entre ambas variables en el punto de desacople de dicha curva. Es por ello por lo que resulta interesante conocer a partir de qué punto el modelo deja de ser predictivo debido a que está próximo al punto de saturación del suelo, o lo que es lo mismo, al umbral de escorrentía. La tabla 5 muestra los valores de humedad del suelo y sus correspondientes caudales, pertenecientes a los diferentes puntos de desacople de cada curva, es decir, se muestran los valores de humedad del suelo y caudales a partir de los cuales el modelo deja de ser predictivo para cada cuenca vertiente. Así mismo, se muestran los periodos de retorno de estos caudales y su probabilidad de ocurrencia anual.

Tabla 5. Datos de humedad del suelo y caudales relativos a los umbrales de cada cuenca vertiente y los periodos de retorno asociados a dichos caudales. (a) superficie y (b) perfil.

<b>a.</b>		<b>Superficie</b>		
<b>Estaciones</b>	<i>Humedad del suelo</i> ( $m^3/m^3$ )	<i>Caudal</i> ( $m^3/s$ )	<i>Periodo de retorno (<math>T_r</math>)</i> (años)	<i>Prob. De ocurrencia</i> (%)
Garray	0,227	18,11	10,38	9,63
Gormaz	0,214	26,19	13,57	7,37
Aranda	0,222	37,45	11,48	8,71
Herrera	0,228	100,22	37,78	2,65
San Miguel	0,225	277,24	15,29	6,54
Toro	0,219	291,53	15,11	6,62
Zamora	0,223	324,54	16,84	5,94

<b>b.</b>		<b>Perfil</b>		
<b>Estaciones</b>	<i>Humedad del suelo</i> ( $m^3/m^3$ )	<i>Caudal</i> ( $m^3/s$ )	<i>Periodo de retorno (<math>T_r</math>)</i> (años)	<i>Prob. De ocurrencia</i> (%)
Garray	0,216	18,37	10,65	9,39
Gormaz	0,183	19,46	7,05	14,18
Aranda	0,199	28,63	7,41	13,50
Herrera	0,172	39,10	5,75	17,39
San Miguel	0,175	124,23	4,33	23,09
Toro	0,177	153,82	5,03	19,88
Zamora	0,182	174,81	6,13	16,31

Observando los valores de humedad del suelo de los diferentes puntos de desacople puede comprobarse que se encuentran muy próximos a los valores de máxima humedad del suelo registrados en las series temporales y que se muestran en la tabla de parámetros calibrados del modelo (Tabla 3 y Tabla 4). Esto es porque el desacople de ambas variables se da en puntos próximos a la saturación del suelo y, por tanto, cercanos a puntos de máxima humedad del suelo. Si bien estos valores de humedad del suelo, para los que se da el desacople, no muestran una tendencia clara con respecto al aumento de la superficie (ni aumentan ni disminuyen) en el modelo que utiliza datos superficiales. En el modelo que utiliza datos del perfil puede verse un ligero aumento de la humedad umbral conforme aumenta la superficie cuando esta es mayor de los 10.000 km<sup>2</sup>.

Así mismo, en lo referente a la probabilidad de alcanzar estos puntos de desacople, tampoco se muestran tendencias claras, ya sean en aumento o en decrecimiento, con respecto al aumento de la superficie de las cuencas vertientes. Por el contrario, sí que se muestra una clara variación entre las probabilidades de ocurrencia que surgen de ambos modelos, siendo el rango de probabilidad de alcanzar estos puntos de desacople del 9,39-23,09 % en el caso del modelo que utiliza datos del perfil y un rango de probabilidad de 2,65-9,63 % en el caso del modelo que utiliza datos de humedad del suelo superficiales.

Es decir, es más probable que se alcancen los puntos críticos de desacople entre variables en el modelo que utiliza datos calculados para el perfil que en el caso en que se utilizan los datos obtenidos de la superficie del terreno.

En cuanto a los periodos de retorno ofrecidos por ambos modelos, también se observa una diferencia clara entre los periodos de retorno del modelo que utiliza datos de humedad del suelo referentes al perfil, lo cuales se encuentran en el rango de 4,33 y 10,56 años mientras que el modelo que utiliza datos de humedad del suelo superficiales muestra periodos de retorno entre 10,18 y 37,78 años, siendo este rango del orden de tres veces mayor aproximadamente que el mostrado por el modelo que utiliza datos referidos al perfil. Al igual que ocurre con la probabilidad de alcanzar estos puntos críticos, no se observan tendencias claras, ni a la alza ni a la baja, conforme aumenta la superficie de la cuenca vertiente, en ninguno de los dos modelos.

En cuanto al rango de porcentaje de caudales que quedan por debajo del punto de desacople, y por tanto gozan de mayor fiabilidad, se estima entre 76,8-90,6% para el modelo referido al perfil y entre 90,6-97,6% para el modelo con datos superficiales de humedad del suelo.

Esta información referente a los puntos críticos de humedad del suelo y el caudal crítico asociado a la misma es clave en estudios de riesgo hidrológico y de análisis hidráulico. Dado que el valor crítico de humedad del suelo está próximo al punto de saturación, es de gran importancia conocer el punto en el que la capacidad de almacenamiento del suelo se acerca a su límite y la generación de escorrentía empieza a depender de forma exclusiva de las precipitaciones. Es por ello por lo que resulta de gran utilidad la disponibilidad de estos valores críticos a modo de alerta y prevención a la hora de analizar el comportamiento hidrológico de cualquier cuenca, no sólo mediante la monitorización de la humedad del suelo si no también mediante el control de los caudales en estaciones de aforo. Por ello resulta de gran interés conocer además del umbral crítico de la humedad del suelo, el caudal crítico asociado a la misma.

De igual forma ocurre con los datos de probabilidad de alcanzar estos puntos críticos y sus periodos de retorno, siendo estos parámetros clave a la hora de gestionar eventos de avenida ya sea en procesos de planificación y construcción de presas o a la hora de calcular riesgos en el sector agrícola o en zonas urbanas. Esto nos permite estimar, dentro de la incertidumbre que ofrece un proceso estocástico como el hidrológico, un rango de

probabilidad de ocurrencia asociada a esa magnitud de humedad del suelo crítica y a los caudales críticos que permiten interpretar de una forma más fiable el comportamiento hidrológico de cualquier cuenca.

## **6. Conclusiones**

En este estudio se ha llevado a cabo el análisis de la relación entre la humedad del suelo tomada a partir de datos satelitales y los caudales registrados en siete estaciones de aforo estratégicamente seleccionadas a lo largo de la cuenca del Duero, en España. Para este análisis se han usado dos productos satelitales, como son CCI SM y SMOS BEC L4 (con una resolución espacial de 25x25 km y 1x1 km respectivamente), tanto referentes a la zona superficial (0-5 cm) como al perfil (0-100 cm), de cara a realizar una comparativa previa entre ambos productos con el fin de establecer el producto con mayor idoneidad para el desarrollo del objetivo principal de este estudio.

Se ha comprobado que el producto derivado de SMOS ofrece un valor de correlación de Pearson más alto al relacionarlo con los caudales que el que ofrece el producto CCI SM, obteniéndose también diferencias entre la capa superficial y del perfil del suelo, mostrando los datos estimados para el perfil una mayor correlación frente a los datos superficiales en ambos productos. Además, se observa una clara mejoría en la correlación entre datos de humedad del suelo y caudales cuanto mayor es la extensión superficial de la cuenca vertiente, dándose este resultado en ambos productos y a ambas profundidades.

Acorde a los resultados obtenidos en este análisis previo entre distintos productos satelitales, se ha utilizado el producto SMOS para la aplicación del modelo desarrollado por Scipal et al. (2005), el cual estima los caudales de los ríos a partir de los datos de humedad del suelo. Al igual que en el análisis previo, se ha decidido aplicar el modelo usando el producto SMOS tanto referente a la capa superficial del suelo como para el perfil, con el objetivo de comparar los resultados que se obtienen al desarrollar el modelo con datos de humedad del suelo referentes a distintas profundidades. Los resultados muestran valores de correlación más altos entre caudal y humedad del suelo en el caso del modelo que utiliza datos referidos al perfil, al igual que se muestra una clara mejoría en los valores de correlación conforme aumenta la superficie de la cuenca vertiente, pudiéndose afirmar así, que el modelo se ajusta mejor cuanto mayor es la extensión

superficial de la cuenca vertiente y que a su vez se ajusta mejor con datos de humedad del suelo referidos al perfil.

Por otro lado, se observa una discrepancia en el desfase temporal referido al tiempo de respuesta ante un evento de lluvia entre la humedad del suelo y el caudal en ambos modelos. Mientras que el modelo que utiliza datos de humedad del suelo referidos al perfil no muestra ningún desfase temporal en ningún tramo, en el modelo que utiliza datos superficiales se observa un desfase temporal de 10 días a partir de superficies mayores de 10.000 km<sup>2</sup>, punto en el que se observa un aumento notable en la divergencia entre los valores máximos de humedad del suelo de cada modelo. Este hecho podría deberse a la existencia de una sobreestimación en los datos satelitales de humedad del suelo recogidos directamente para la capa superficial y que no ocurre en la estimación de los valores referidos al perfil.

Por otro lado, se observan buenos resultados en la simulación de caudales en el modelo que utiliza datos referidos al perfil, siendo estos mucho más ajustados a los observados cuanto mayor es el tamaño de la cuenca.

Referente al cálculo del punto de desacople entre la humedad del suelo y los caudales registrados, como cabía esperar observando los valores máximos de humedad del suelo para ambos modelos, el punto umbral es mayor en el modelo que utiliza datos superficiales. Esto significa que el modelo que utiliza estos datos se desacopla con una mayor humedad del suelo y, por lo tanto, con un caudal mayor que el que ofrece el modelo referido a datos del perfil. Esto se traduce en un promedio de porcentaje de caudales por debajo del punto de desacople más alto en el modelo con datos superficiales, aunque este modelo ofrezca resultados menos precisos, y un promedio de porcentaje de caudales dentro del umbral más pequeño para el modelo referido al perfil, aunque los resultados sean más precisos.

Los resultados obtenidos en este trabajo ayudan a comprender mejor el comportamiento hidrológico de la cuenca del Duero, estableciendo la relación entre la humedad del suelo obtenida a través de datos satelitales y los caudales registrados en las estaciones de aforo que van desde la cabecera de la cuenca hasta la estación de Zamora. Mediante esta relación se han podido determinar qué productos satelitales se ajustan mejor, así como la profundidad de estudio que ofrece mejores resultados. Además, se ha podido observar el tiempo de respuesta a un evento de precipitación por parte de ambas variables, y a lo largo



de toda la zona de estudio, encontrándose variaciones entre estos tiempos de respuesta en algunos tramos de la cuenca. Además, con la realización de este estudio se han obtenido valores críticos de humedad del suelo y caudales, a partir de los cuales ambas variables dejan de estar relacionadas, así como sus periodos de retorno y probabilidades de ocurrencia, aportando datos de gran utilidad para estudios de riesgo hidrológico en la zona de estudio.

## Bibliografía

- Ashkar, F., & Aucoin, F. (2012). Choice between competitive pairs of frequency models for use in hydrology: A review and some new results. *Hydrological Sciences Journal*, 57(6), 1092-1106. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.701746>
- Aubert, D., Loumagne, C., & Oudin, L. (2003). Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in a conceptual rainfall–runoff model. *Journal of Hydrology*, 280(1-4), 145-161. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00229-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00229-4)
- Azimi, S., Dariane, A. B., Modanesi, S., Bauer-Marschallinger, B., Bindlish, R., Wagner, W., & Massari, C. (2020). Assimilation of Sentinel 1 and SMAP – based satellite soil moisture retrievals into SWAT hydrological model: The impact of satellite revisit time and product spatial resolution on flood simulations in small basins. *Journal of Hydrology*, 581, 124367. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124367>
- Baldwin, D., Manfreda, S., Lin, H., & Smithwick, E. A. H. (2019). Estimating Root Zone Soil Moisture Across the Eastern United States with Passive Microwave Satellite Data and a Simple Hydrologic Model. *Remote Sensing*, 11(17), 2013. <https://doi.org/10.3390/rs11172013>
- Bartsch, A. (2010). Monitoring of Terrestrial Hydrology at High Latitudes with Scatterometer Data. En P. Imperatore & D. Riccio (Eds.), *Geoscience and Remote Sensing New Achievements*. InTech. <https://doi.org/10.5772/9095>
- Booij, M. J., & de Wit, M. J. M. (2010). Extreme value statistics for annual minimum and trough-under-threshold precipitation at different spatio-temporal scales. *Hydrological Sciences Journal*, 55(8), 1289-1301. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.528764>
- Champagne, C., Davidson, A., Cherneski, P., L'Heureux, J., & Hadwen, T. (2015). Monitoring Agricultural Risk in Canada Using L-Band Passive Microwave Soil Moisture from SMOS. *Journal of Hydrometeorology*, 16(1), 5-18. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0039.1>
- Chaparro, D., Vayreda, J., Vall-llossera, M., Banque, M., Piles, M., Camps, A., & Martinez-Vilalta, J. (2017). The Role of Climatic Anomalies and Soil Moisture in the Decline of Drought-Prone Forests. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(2), 503-514. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2585505>
- CHD. (2021). *La cuenca del Duero*. Características generales de la cuenca del Duero. <https://www.chduero.es/la-cuenca-del-duero>
- de Jeu, R. A. M., Wagner, W., Holmes, T. R. H., Dolman, A. J., van de Giesen, N. C., & Friesen, J. (2008). Global Soil Moisture Patterns Observed by Space Borne Microwave Radiometers and Scatterometers. *Surveys in Geophysics*, 29(4-5), 399-420. <https://doi.org/10.1007/s10712-008-9044-0>

- Demirel, M. C., Özen, A., Orta, S., Toker, E., Demir, H. K., Ekmekcioğlu, Ö., Tayşi, H., Eruçar, S., Sağ, A. B., Sarı, Ö., Tuncer, E., Hancı, H., Özcan, T. I., Erdem, H., Koşucu, M. M., Başakın, E. E., Ahmed, K., Anwar, A., Avcuoğlu, M. B., ... Booij, M. J. (2019). Additional Value of Using Satellite-Based Soil Moisture and Two Sources of Groundwater Data for Hydrological Model Calibration. *Water*, *11*(10), 2083. <https://doi.org/10.3390/w11102083>
- Dorigo, W. A., Gruber, A., De Jeu, R. A. M., Wagner, W., Stacke, T., Loew, A., Albergel, C., Brocca, L., Chung, D., Parinussa, R. M., & Kidd, R. (2015). Evaluation of the ESA CCI soil moisture product using ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, *162*, 380-395. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.023>
- Dorigo, W. A., Wagner, W., Albergel, C., Albrecht, F., Balsamo, G., Brocca, L., Chung, D., Ertl, M., Forkel, M., Gruber, A., Haas, E., Hamer, P. D., Hirschi, M., Ikonen, J., de Jeu, R., Kidd, R., Lahoz, W., Liu, Y. Y., Miralles, D., ... Lecomte, P. (2017). ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment*, *203*, 185-215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>
- Fleischmann, A. S., Al Bitar, A., Oliveira, A. M., Siqueira, V. A., Colossi, B. R., Paiva, R. C. D. de, Kerr, Y., Ruhoff, A., Fan, F. M., Pontes, P. R. M., & Collischonn, W. (2021). Synergistic Calibration of a Hydrological Model Using Discharge and Remotely Sensed Soil Moisture in the Paraná River Basin. *Remote Sensing*, *13*(16), 3256. <https://doi.org/10.3390/rs13163256>
- González-Zamora, Á., Sánchez, N., Pablos, M., & Martínez-Fernández, J. (2019). CCI soil moisture assessment with SMOS soil moisture and in situ data under different environmental conditions and spatial scales in Spain. *Remote Sensing of Environment*, *225*, 469-482. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.010>
- Ikonen, J., Vehviläinen, J., Rautiainen, K., Smolander, T., Lemmetyinen, J., Bircher, S., & Pulliainen, J. (2016). The Sodankylä in situ soil moisture observation network: An example application of ESA CCI soil moisture product evaluation. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, *5*(1), 95-108. <https://doi.org/10.5194/gi-5-95-2016>
- Kerr, Y. H., Al-Yaari, A., Rodriguez-Fernandez, N., Parrens, M., Molero, B., Leroux, D., Bircher, S., Mahmoodi, A., Mialon, A., Richaume, P., Delwart, S., Al Bitar, A., Pellarin, T., Bindlish, R., Jackson, T. J., Rüdiger, C., Waldteufel, P., Mecklenburg, S., & Wigneron, J.-P. (2016). Overview of SMOS performance in terms of global soil moisture monitoring after six years in operation. *Remote Sensing of Environment*, *180*, 40-63. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.042>

- Kim, S., Dong, J., & Sharma, A. (2021). A Triple Collocation-Based Comparison of Three L-Band Soil Moisture Datasets, SMAP, SMOS-IC, and SMOS, Over Varied Climates and Land Covers. *Frontiers in Water*, 3, 693172. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.693172>
- Li, Z., Brissette, F., & Chen, J. (2013). Finding the most appropriate precipitation probability distribution for stochastic weather generation and hydrological modelling in Nordic watersheds: APPLICABILITY OF PRECIPITATION PROBABILITY DISTRIBUTIONS. *Hydrological Processes*, 27(25), 3718-3729. <https://doi.org/10.1002/hyp.9499>
- López López, P., Sutanudjaja, E. H., Schellekens, J., Sterk, G., & Bierkens, M. F. P. (2017). Calibration of a large-scale hydrological model using satellite-based soil moisture and evapotranspiration products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 3125-3144. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3125-2017>
- Mason, P. J., Zillman, J. W., Simmons, A., Lindstrom, E. J., Harrison, D. E., Dolman, H., Bojinski, S., Fischer, A., Latham, J., & Rasmussen, J. (2010). *Implementation Plan for the Global Observing System for Climate Support of the UNFCCC (2010 Update)*. World Meteorological Organization (WMO).
- Meier, P., Frömel, A., & Kinzelbach, W. (2011). Hydrological real-time modelling in the Zambezi river basin using satellite-based soil moisture and rainfall data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3), 999-1008. <https://doi.org/10.5194/hess-15-999-2011>
- Pablos, M., González-Zamora, Á., Sánchez, N., & Martínez-Fernández, J. (2018). Assessment of Root Zone Soil Moisture Estimations from SMAP, SMOS and MODIS Observations. *Remote Sensing*, 10(7), 981. <https://doi.org/10.3390/rs10070981>
- Pablos, M., Martínez-Fernández, J., Sánchez, N., & González-Zamora, Á. (2017). Temporal and Spatial Comparison of Agricultural Drought Indices from Moderate Resolution Satellite Soil Moisture Data over Northwest Spain. *Remote Sensing*, 9(11), 1168. <https://doi.org/10.3390/rs9111168>
- Pablos, M., Piles, M., González-Haro, C., & BEC Team. (2019). *BEC SMOS Land Products Description*. <http://bec.icm.csic.es/doc/BEC-SMOS-0003-PD-Land.pdf>
- Paredes-Trejo, F., Barbosa, H. A., Giovannettone, J., Kumar, T. V. L., Thakur, M. K., Buriti, C. de O., & Uzcátegui-Briceño, C. (2021). Drought Assessment in the São Francisco River Basin Using Satellite-Based and Ground-Based Indices. *Remote Sensing*, 13(19), 3921. <https://doi.org/10.3390/rs13193921>
- Park, H.-J., Choi, M., & Chun, J. A. (2011). The role of remotely sensed soil moisture to predict surface water elevation at the watershed scale in Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(5), 939-944. <https://doi.org/10.1007/s12205-011-1153-5>
- Patil, A., & Ramsankaran, R. (2017). Improving streamflow simulations and forecasting performance of SWAT model by assimilating remotely sensed soil moisture

- observations. *Journal of Hydrology*, 555, 683-696.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.058>
- Portal, G., Vall-llossera, M., Piles, M., Camps, A., Chaparro, D., Pablos, M., & Rossato, L. (2018). A Spatially Consistent Downscaling Approach for SMOS Using an Adaptive Moving Window. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(6), 1883-1894. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2832447>
- Qi, H., Huang, F., & Zhai, H. (2019). Monitoring Spatio-Temporal Changes of Terrestrial Ecosystem Soil Water Use Efficiency in Northeast China Using Time Series Remote Sensing Data. *Sensors*, 19(6), 1481. <https://doi.org/10.3390/s19061481>
- Rodríguez-Fernández, N., de Rosnay, P., Albergel, C., Richaume, P., Aires, F., Prigent, C., & Kerr, Y. (2019). SMOS Neural Network Soil Moisture Data Assimilation in a Land Surface Model and Atmospheric Impact. *Remote Sensing*, 11(11), 1334. <https://doi.org/10.3390/rs11111334>
- Sánchez, N., González-Zamora, Á., Piles, M., & Martínez-Fernández, J. (2016). A New Soil Moisture Agricultural Drought Index (SMADI) Integrating MODIS and SMOS Products: A Case of Study over the Iberian Peninsula. *Remote Sensing*, 8(4), 287. <https://doi.org/10.3390/rs8040287>
- Sanchez-Ruiz, S., Moreno, A., Piles, M., Maselli, F., Carrara, A., Running, S., & Gilabert, M. A. (2017). Quantifying water stress effect on daily light use efficiency in Mediterranean ecosystems using satellite data. *International Journal of Digital Earth*, 10(6), 623-638. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1247301>
- Scipal, K., Scheffler, C., & Wagner, W. (2005). Soil moisture-runoff relation at the catchment scale as observed with coarse resolution microwave remote sensing. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11.
- Srivastava, P. K., Han, D., Ramirez, M. R., & Islam, T. (2013). Machine Learning Techniques for Downscaling SMOS Satellite Soil Moisture Using MODIS Land Surface Temperature for Hydrological Application. *Water Resources Management*, 27(8), 3127-3144. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0337-9>
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1982). *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*.
- van der Schalie, R., van der Vliet, M., Rodríguez-Fernández, N., Dorigo, W. A., Scanlon, T., Preimesberger, W., Madelon, R., & de Jeu, R. A. M. (2021). L-Band Soil Moisture Retrievals Using Microwave Based Temperature and Filtering. Towards Model-Independent Climate Data Records. *Remote Sensing*, 13(13), 2480. <https://doi.org/10.3390/rs13132480>
- Vittucci, C., Guerriero, L., Ferrazzoli, P., Rahmoune, R., Barraza, V., & Grings, F. (2014). River Water Level Prediction Using Passive Microwave Signatures—A Case Study: The

- Bermejo Basin. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(9), 3903-3914. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2321457>
- Wadsworth, E., Champagne, C., & Berg, A. A. (2020). Evaluating the utility of remotely sensed soil moisture for the characterization of runoff response over Canadian watersheds. *Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 45(1), 77-89. <https://doi.org/10.1080/07011784.2019.1691943>
- Wagner, W., Lemoine, G., Borgeaud, M., & Rott, H. (1999). A study of vegetation cover effects on ERS scatterometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(2), 938-948. <https://doi.org/10.1109/36.752212>
- Wagner, W., Lemoine, G., & Rott, H. (1999). A Method for Estimating Soil Moisture from ERS Scatterometer and Soil Data. *Remote Sensing of Environment*, 70(2), 191-207. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00036-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00036-X)
- Weibull, W. (1951). *A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*. <http://web.cecs.pdx.edu/cgshirl/Documents/Weibull-ASME-Paper-1951.pdf>
- Wu, X., Lu, G., Wu, Z., He, H., Scanlon, T., & Dorigo, W. (2020). Triple Collocation-Based Assessment of Satellite Soil Moisture Products with In Situ Measurements in China: Understanding the Error Sources. *Remote Sensing*, 12(14), 2275. <https://doi.org/10.3390/rs12142275>
- Yang, G., Guo, P., Li, X., Wan, H., Meng, C., & Wang, B. (2020). Assessment with remotely sensed soil moisture products and ground-based observations over three dense network. *Earth Science Informatics*, 13(3), 663-679. <https://doi.org/10.1007/s12145-020-00454-9>
- Zhang, X., Zhang, T., Zhou, P., Shao, Y., & Gao, S. (2017). Validation Analysis of SMAP and AMSR2 Soil Moisture Products over the United States Using Ground-Based Measurements. *Remote Sensing*, 9(2), 104. <https://doi.org/10.3390/rs9020104>
- Zhou, K., Li, J., Zhang, T., & Kang, A. (2021). The use of combined soil moisture data to characterize agricultural drought conditions and the relationship among different drought types in China. *Agricultural Water Management*, 243, 106479. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106479>
- Zhu, L., Wang, H., Tong, C., Liu, W., & Du, B. (2019). Evaluation of ESA Active, Passive and Combined Soil Moisture Products Using Upscaled Ground Measurements. *Sensors*, 19(12), 2718. <https://doi.org/10.3390/s19122718>
- Zhuo, L., & Han, D. (2016). The Relevance of Soil Moisture by Remote Sensing and Hydrological Modelling. *Procedia Engineering*, 154, 1368-1375. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.499>