



**UCAM**

UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE MURCIA

# MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA DE LA CUENCA DE LA RAMBLA DEL ALBUJÓN MEDIANTE EL USO DE DATOS DE TELEDETECCIÓN

Murcia, mayo de 2019

## Índice

1.- INTRODUCCIÓN.....	4
1.1.- Motivación .....	4
1.2.- Objetivos del proyecto .....	5
1.3.- Área de estudio .....	5
1.4.- Metodología.....	7
1.5.- Equipo de trabajo.....	8
1.6.- Interés de los resultados .....	9
2.- DATOS DE ENTRADA.....	10
2.1.- Consideraciones generales .....	10
2.2.- Información climatológica .....	10
2.2.1.- Precipitación y temperatura .....	12
2.2.2.- Humedad, radiación solar y velocidad del viento.....	12
2.3.- Información espacial del modelo hidrológico .....	13
2.3.1.- Modelo de elevación digital (MED).....	13
2.3.2.- Usos del suelo .....	14
2.3.3.- Parámetros del suelo, geológicos y geomorfológicos.....	16
2.4.- Delimitación de subcuencas .....	17

3.- CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO .....	18
3.1.- Calibración de la hidrología superficial .....	18
3.1.1.- Evapotranspiración .....	19
3.2.- Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT .....	20
3.2.1.- Evaluación del modelo .....	23
3.2.2.- Función objetivo para la calibración .....	24
3.2.3.- Periodos de calentamiento, calibración y validación .....	24
4.- RESULTADOS .....	26
4.1.- Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo SWAT .....	26
4.2.- Calibración y validación del modelo SWAT .....	28
4.3.- Caudales de la Rambla del Albuñón vertidos al Mar Menor <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	
5.- CONCLUSIONES .....	32
ANEXO1. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....	35
ANEXO2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO SWAT .....	38
Componentes del modelo SWAT .....	40

# 1.- INTRODUCCIÓN

## 1.1.- Motivación

La correcta estimación de los recursos hídricos de un territorio es fundamental para una adecuada gestión de los mismos. Especialmente en zonas semiáridas como la cuenca del Segura donde se sufre el mayor estrés hídrico de toda Europa (Senent-Aparicio et al., 2015). La cantidad de recursos hídricos producidos en un territorio se suele estimar a partir de modelización hidrológica, siendo éstos modelos calibrados mediante el uso de datos reales, fundamentalmente datos de caudales procedentes de estaciones de aforos. En el caso de la cuenca de la Rambla del Albuñón, su ciclo hidrológico está sometido a un alto grado de antropización, lo que unido a que se trata de cauces efímeros, hace que apenas existan datos de aforo que permitan la correcta calibración de los modelos hidrológicos.

Por otro lado, en los últimos años se ha avanzado mucho en la obtención de distintas variables físicas como la precipitación, la temperatura o la evapotranspiración mediante técnicas de teledetección a partir de imágenes obtenidas mediante satélites (Long et al., 2014). En un clima semiárido como el de la cuenca del Segura, el control que ejerce la vegetación sobre el ciclo hidrológico es tal que hasta un 90% de la precipitación vuelve a la atmósfera por evaporación o evapotranspiración (Pilgrim et al., 1998).

En los últimos años, han surgido una serie de productos satelitales de teledetección, como por ejemplo MODIS, que pueden ser utilizados para la calibración de modelos hidrológicos reduciendo la incertidumbre asociada a los mismos. España es uno de los países a nivel mundial con un mayor grado de regulación sobre sus recursos hídricos, lo que implica una mayor dificultad a la hora de encontrar puntos de control en régimen natural, por lo que la aplicación de datos de teledetección resulta de gran interés con objeto de obtener estimaciones de recursos hídricos más precisas.

## 1.2.- Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto consiste en la calibración utilizando datos de evapotranspiración obtenidos a partir de productos satelitales de un modelo hidrológico distribuido en la cuenca de la rambla del Albuji3n mediante la aplicaci3n del modelo SWAT. Los objetivos espec3ficos del presente proyecto son los siguientes:

1. Elaborar una base de datos suficiente para la calibraci3n/validaci3n del modelo a partir de productos satelitales de teledetecci3n que permitan la calibraci3n del modelo mediante variables distintas a los aforos, como es la evapotranspiraci3n.
2. Modelizar la hidrolog3a de la cuenca de la Rambla del Albuji3n incluyendo la gesti3n agr3cola y el desarrollo de los cultivos para una mejor cuantificaci3n de los recursos h3dricos a escala de subcuenca.
3. Calibrar y validar el modelo incluyendo un an3lisis de la incertidumbre

## 1.3.- 3rea de estudio

El 3rea de estudio es la cuenca hidrogr3fica de la Rambla del Albuji3n (Figura 1) , la cual forma parte de la cuenca vertiente a la laguna del Mar Menor. La cuenca de la Rambla del Albuji3n se localiza en el extremo sur de la cuenca del Segura y abarca una superficie de unos 543 km<sup>2</sup> y una longitud de 40 km, desde Fuente 3lamo hasta su desembocadura en el Mar Menor.

La Rambla del Albuji3n constituye la principal red de drenaje de la comarca del Campo de Cartagena. Se caracteriza geomorfol3gicamente por ser una extensa llanura con elevaciones moderadas, donde destacan algunos cerros y cabezos. La elevaci3n media es de 220 m, oscilando desde una m3xima de 1065 m hasta el nivel del mar.

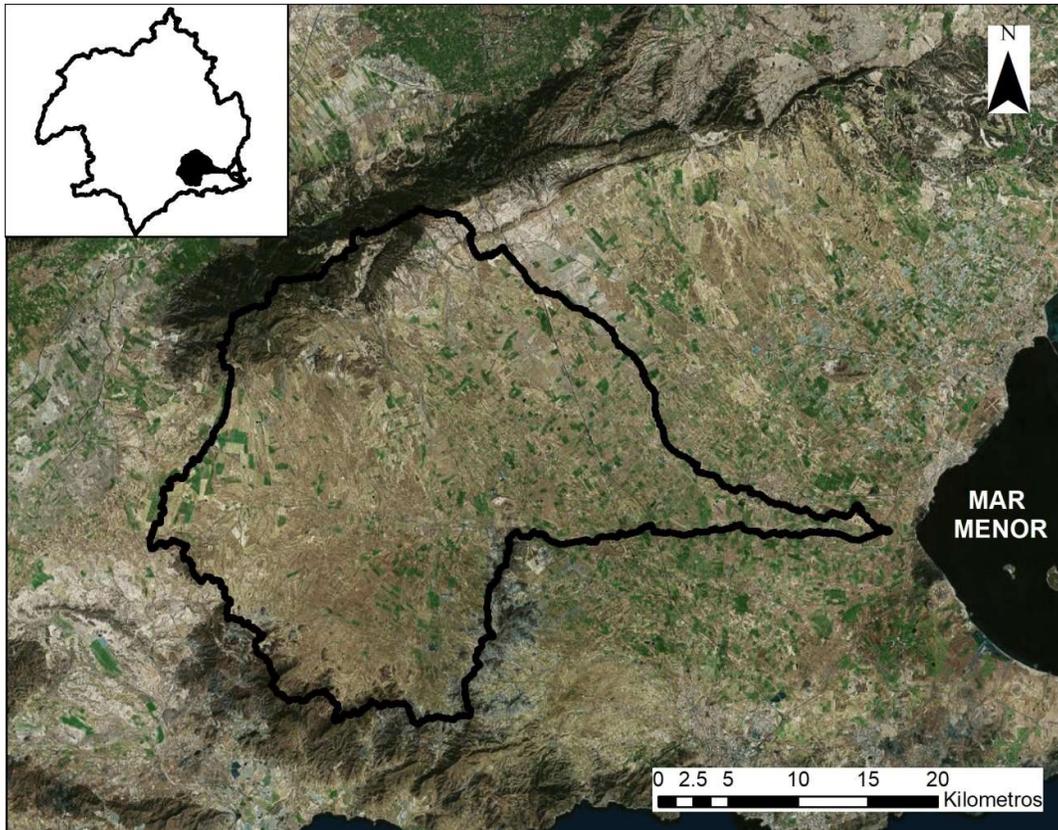


Figura 1. Localización del área de estudio en la Cuenca del Segura y en el Campo de Cartagena

La cuenca se caracteriza por un clima mediterráneo semiárido. Su posición marítima suaviza las temperaturas y la oscilación térmica es menos acusada que en otras comarcas por la influencia moderadora del mar. La amplitud térmica diaria no suele superar los 10°C. La temperatura diaria media está entorno a los 11°C en invierno y a los 25°C en verano. Las precipitaciones son escasas y torrenciales, caracterizadas por su variabilidad interanual y la baja cuantía media anual (Conesa-García, 1990). La precipitación media anual es de 300 mm, con la mayoría de las precipitaciones concentradas en tormentas de episodios cortos en otoño y primavera (García-Pintado, 2007). El clima ofrece una escasa nubosidad, elevada luminosidad y abundancia de horas de sol.

La cuenca se asienta sobre un heterogéneo subsuelo formado por sedimentos de las eras Terciaria y Cuaternaria, se trata de una amplia cuenca de sedimentación neógena

que desciende hacia la laguna homónima. Los perfiles de suelo son profundos, poco desarrollados, limosos y tienen una baja permeabilidad.

La cuenca se caracteriza por su marcado carácter agrícola. En esta área se localiza una de las zonas con mayor producción agrícola de toda la cuenca hidrográfica del Segura. En la cuenca ha habido un cambio de cultivo extensivo de secano a regadío intensivo durante los últimos 30 años, siendo, por tanto, la actividad agrícola de regadío la principal presión que soportan los cauces en esta cuenca. El uso de la tierra en la cuenca comprende tierra cultivable no irrigada (43%) zonas agrícolas irrigadas (33%), zonas naturales con arbustos y pinos (20%), suelo improductivo (3%) y canales y masas de agua para riego (1%). La mayor parte del agua utilizada para el riego procede del transvase Tajo-Segura. El agua transferida ha producido un aumento del nivel piezométrico debido, sobre todo, a la recarga del acuífero por parte de los retornos de riego. En consecuencia, la rambla del Albujión mantiene un caudal base en el tramo final de la desembocadura alimentado por la descarga del acuífero durante determinados momentos del año (García-Pintado, 2009).

#### **1.4.- Metodología**

Para alcanzar los objetivos anteriormente mencionados, se ha utilizado el programa SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1998). Este modelo ha sido desarrollado para evaluar el impacto de las distintas prácticas de gestión del suelo sobre los recursos hídricos, los sedimentos o la aplicación de sustancias químicas como el nitrógeno o el fósforo de origen agrícola en cuencas con distintos suelos, usos del suelo y condiciones de gestión a lo largo de grandes periodos de tiempo. El modelo SWAT se describe en el ANEXO 2.

Para el desarrollo de este proyecto se escogió este modelo por diversas razones: (a) estrecha relación entre los motivos de desarrollo del modelo y los objetivos marcados en esta investigación; (b) SWAT es un programa de acceso abierto; (c) y ha sido

aplicado con éxito en zonas con diversas condiciones espaciales y medioambientales (Gassman et al., 2007).

Los principales componentes del modelo SWAT son la hidrología, el clima, el ciclo de nutrientes, el transporte de sedimentos, el desarrollo de los cultivos, la gestión agrícola y la dinámica de pesticidas. SWAT es un modelo de simulación continua que opera a escala temporal diaria. La heterogeneidad espacial de una cuenca se preserva mediante la topografía dividiendo la cuenca en múltiples subcuencas. Estas subcuencas son posteriormente subdivididas en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) en función de las características del suelo, los usos del suelo y el mapa de pendientes. Estas subdivisiones permiten al modelo reflejar las diferencias de evapotranspiración para distintos cultivos y suelos (Neitsch et al., 2009).

Dicho trabajo incluye las siguientes actuaciones.

1. Análisis y extracción de datos satelitales disponibles.
2. Entrada de datos al modelo.
3. Calibración del modelo a partir de variables obtenidas a partir de productos satelitales de teledetección.
4. Validación del modelo.

### **1.5.- Equipo de trabajo**

Este informe ha sido elaborado por el siguiente equipo investigador de la Universidad Católica de San Antonio de Murcia (UCAM), dirigido por D. Javier Senent Aparicio, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y Director de la Cátedra de Investigación del Agua de la UCAM. El equipo de trabajo está compuesto por las siguientes personas:

1. Javier Senent Aparicio, Director de la Cátedra de Investigación del Agua de la UCAM
2. Julio Pérez Sánchez, Profesor Contratado Doctor (UCAM)

3. Raghavan Srinivasan, Catedrático en Modelización Hidrológica de la Texas Agricultural & Mechanical University (Texas, EEUU)
4. Patricia Jimeno Sáez, Ayudante de Investigación
5. Adrián López Ballesteros, Becario Predoctoral

## 1.6.- Interés de los resultados

La disponibilidad de un modelo de este tipo es fundamental para la realización de otras investigaciones científicas que necesitan inexorablemente partir de un modelo a escala de cuenca correctamente calibrado y validado que refleje el comportamiento hidrológico de la cuenca de la Rambla del Albujón.

Los resultados obtenidos permitirán reducir la incertidumbre asociada a otros cálculos relacionados con el estado ecológico del Mar Menor derivados de su relación con las cuencas vertientes. Entre ellos se pueden destacar los siguientes:

1. La recarga del acuífero Cuaternario obtenida en este trabajo puede ser utilizada como dato de entrada en el desarrollo de un modelo de flujo de agua subterráneo que permita estimar la descarga de dicho acuífero sobre el Mar Menor.
2. Modelización del transporte de sedimentos y de contaminantes en la cuenca de la Rambla del Albujón.
3. Impacto del Cambio Climático tanto sobre los recursos hídricos como sobre el ciclo de sedimentos y transporte de nutrientes.
4. Analizar los efectos previsibles de distintas prácticas agrícolas orientadas a reducir la entrada de sedimentos y de nutrientes a la laguna del Mar Menor.
5. Análisis Coste-Eficacia de medidas para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor.

## 2.- DATOS DE ENTRADA

### 2.1.- Consideraciones generales

Para la simulación de los procesos hidrológicos, el modelo SWAT divide la cuenca hidrográfica en subcuencas basándose en la red de drenaje y en la topografía. SWAT considera la heterogeneidad espacial de una cuenca dividiendo las subcuencas en múltiples unidades de respuesta hidrológica (HRUs). El modelo SWAT integra diversos datos geoespaciales (modelo de elevación del terreno, un mapa de usos del suelo, datos sobre el tipo de suelo) y datos climáticos de la zona de estudio.

Este capítulo recoge la información necesaria para la implementación del modelo: información climatológica (precipitación, temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación solar) y la información espacial (modelo de elevación digital del terreno, usos del suelo y parámetros del suelo).

A continuación, se aborda la descripción de la información recopilada requerida por el modelo como datos de entrada.

### 2.2.- Información climatológica

Los datos climáticos empleados fueron obtenidos de la Red del Sistema de Información Agrario de Murcia (SIAM). Las variables medidas por estas estaciones son: La temperatura y humedad relativa del aire, la radiación global incidente, la velocidad y dirección del viento y la precipitación. Los registros son evaluados, validados y almacenados en un servidor por el IMIDA, al que se pueden acceder de forma gratuita desde la Web del SIAM (<https://geoportal.imida.es/siam/>).

En la Figura 2 se muestra la localización de las estaciones utilizadas y en la Tabla 1 se recoge la información de las mismas.

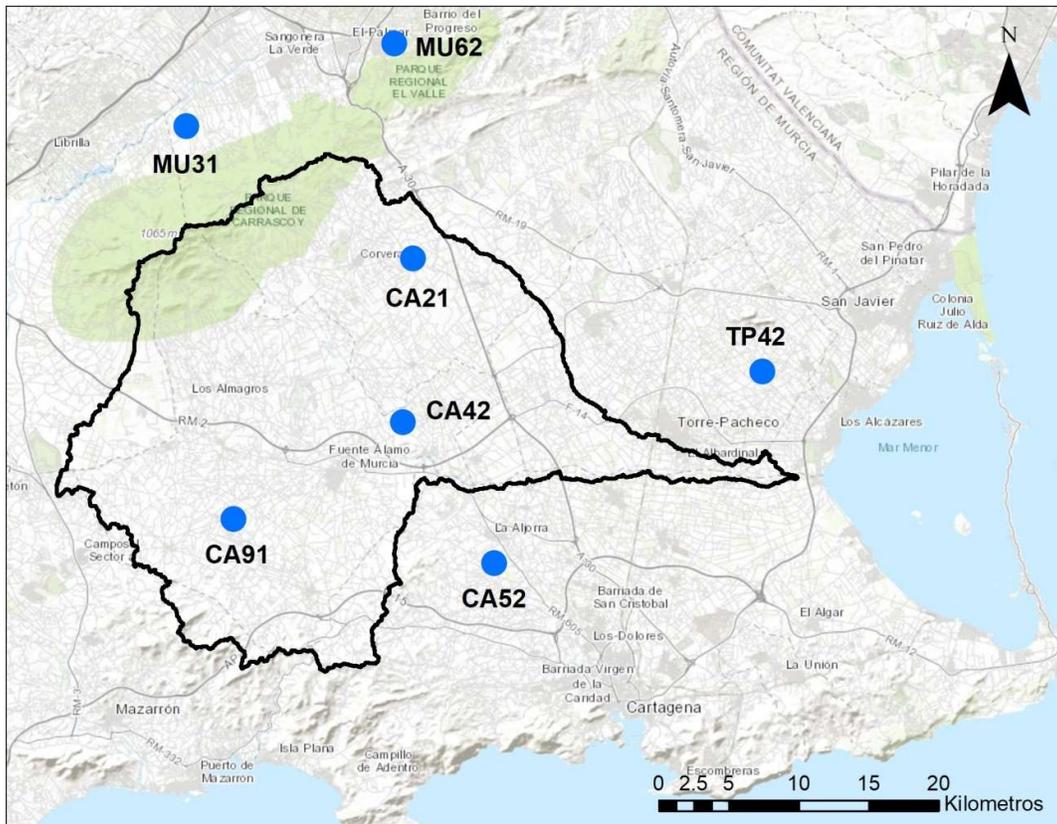


Figura 2. Mapa de situación de las estaciones agro-meteorológicas

Tabla 1: Estaciones agro-meteorológicas

Nombre	Código	X_UTM	Y_UTM	Cota (m)	Municipio
Corvera	CA21	665.200	4.188.754	227	Murcia
Balsapintada	CA42	664.813	4.179.533	138	Fuente Álamo
La Aljorra	CA52	670.129	4.171.693	84	Cartagena
El Campillo	CA91	655.332	4.173.881	175	Fuente Álamo
Sangonera La Verde	MU31	652.257	4.195.930	140	Murcia
La Alberca	MU62	663.907	4.200.807	56	Murcia
Torre Blanca	TP42	685.074	4.182.798	31	Torre Pacheco

### 2.2.1.- Precipitación y temperatura

El modelo SWAT requiere los datos de precipitación diarios siempre que el método del número de curva SCS sea escogido como modelo para la escorrentía superficial. SWAT también necesita los datos diarios de temperaturas máximas y mínimas. En la Figura 3, se muestran los valores medios mensuales de la precipitación y de las temperaturas máximas y mínimas para el periodo 2003-2015.

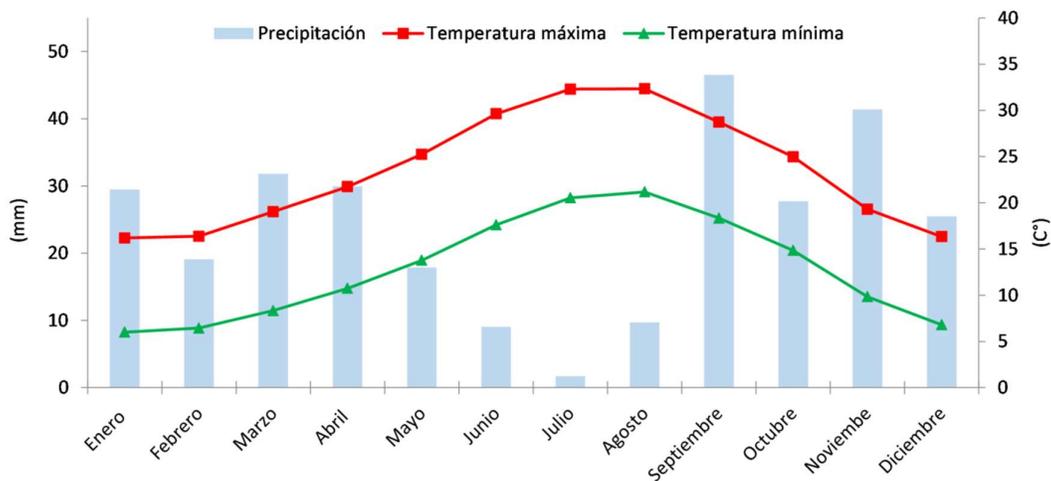


Figura 3. Precipitación y temperatura media mensual

### 2.2.2.- Humedad, radiación solar y velocidad del viento

El modelo SWAT requiere también los datos de evapotranspiración. Dada la ausencia de medidas, ha sido necesario el cálculo de la evapotranspiración potencial a partir de la fórmula de Penman-Monteith (Monteith, 1965). El método de Penman-Monteith, descrito en el Anexo 2, requiere además de los datos de temperatura, los datos de humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. En la Figura 4 y Figura 5 se muestran los valores medios mensuales de estas variables climáticas para el periodo 2003-2015.

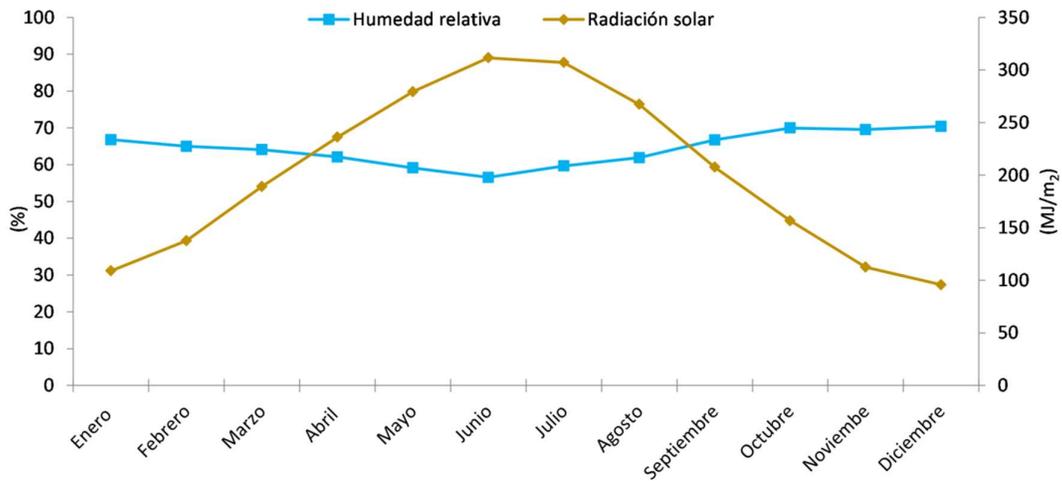


Figura 4. Humedad relativa y radiación solar media mensual

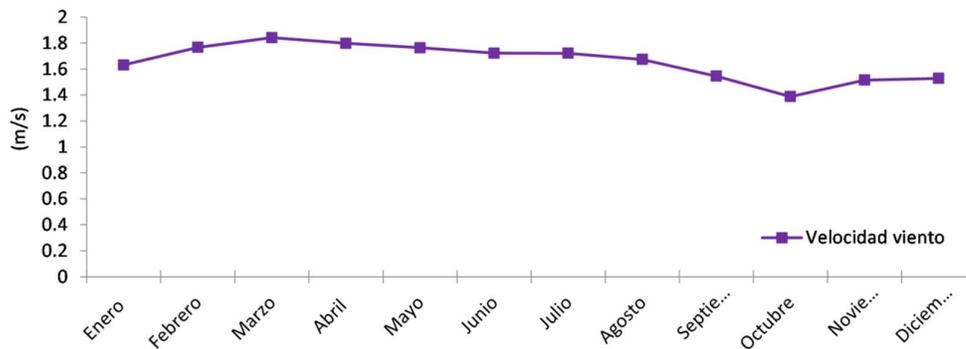


Figura 5. Velocidad del viento media mensual

## 2.3.- Información espacial del modelo hidrológico

### 2.3.1.- Modelo de elevación digital (MED)

Como modelo digital del terreno se ha empleado el modelo MDT25 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) con paso de malla de 25 m (MDT25) (<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=LIDA2>). En la Figura 6 se encuentra representado el MED y la red de drenaje.

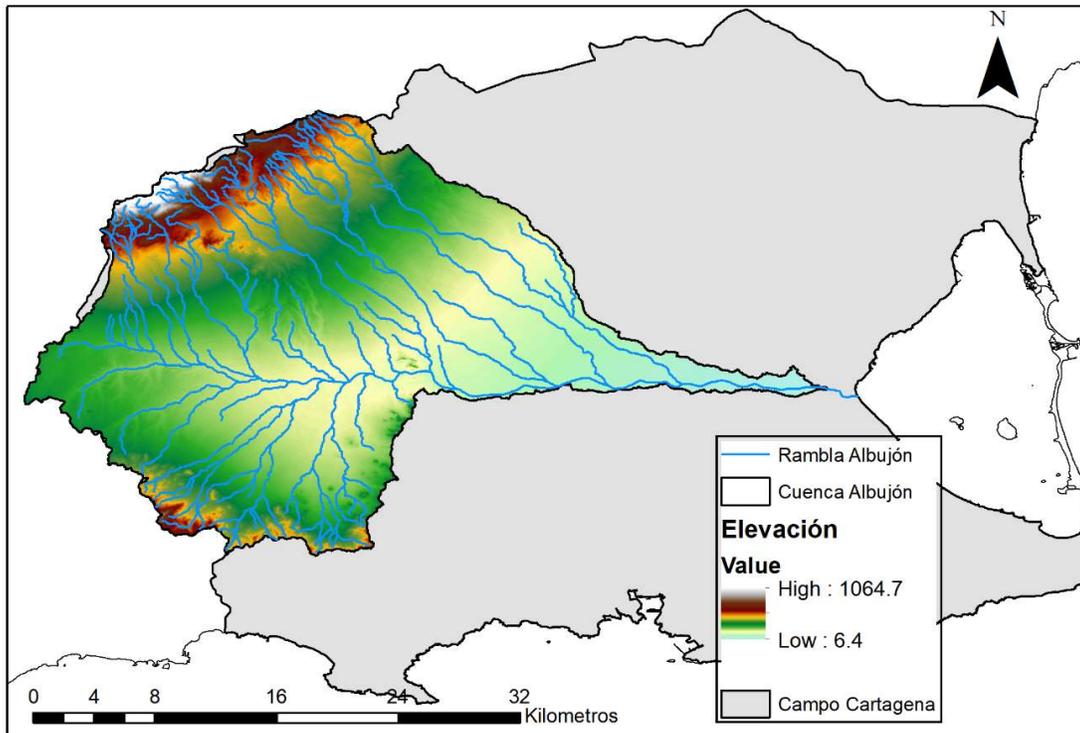


Figura 6. Modelo de elevación digital y red de drenaje

### 2.3.2.- Usos del suelo

Los datos de usos de suelo fueron obtenidos del Mapa de Cultivos y Aprovechamiento 2000-2010 generados por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) a escala 1:50.000. ([https://www.mapa.gob.es/es/cartografia-y-sig/publicaciones/agricultura/mac\\_2000\\_2009.aspx](https://www.mapa.gob.es/es/cartografia-y-sig/publicaciones/agricultura/mac_2000_2009.aspx)). Este mapa corresponde a una cartografía a nivel nacional en la que se delimitan y describen los cultivos y aprovechamientos del suelo, mediante el empleo de códigos. En la Figura 7 se encuentra el mapa de usos del suelo.

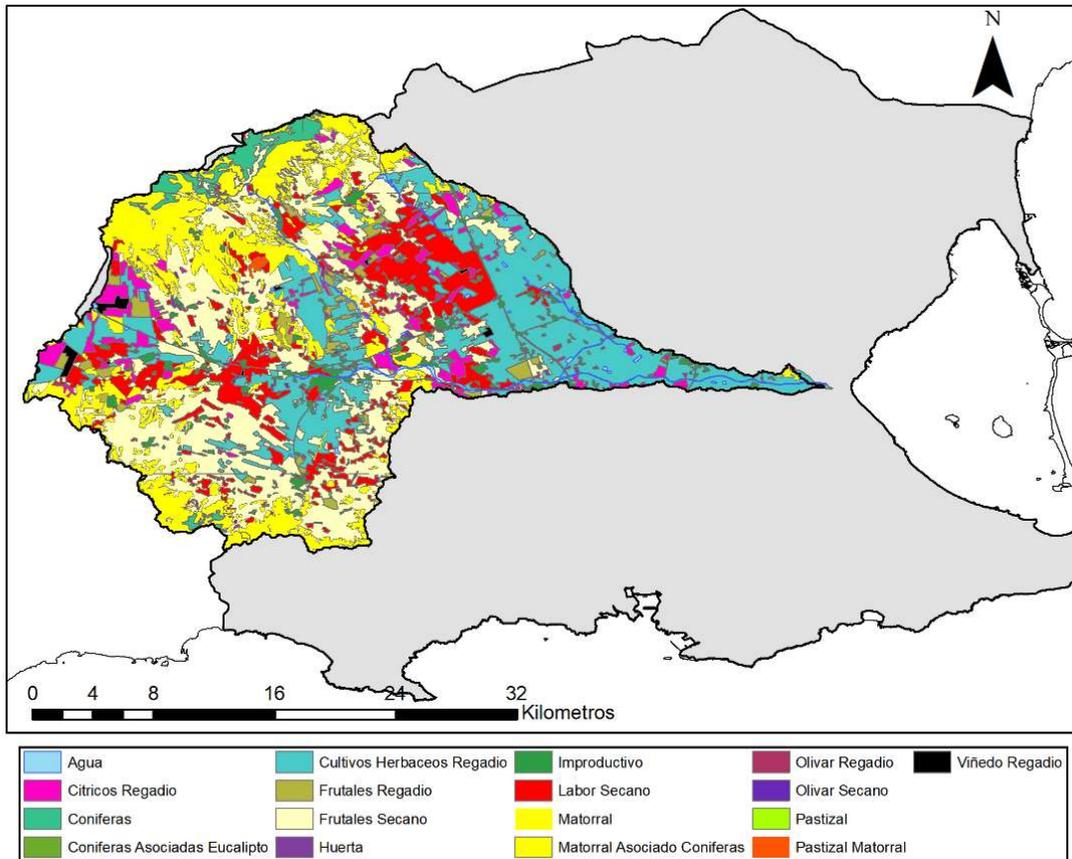


Figura 7. Mapa de usos del suelo

En la Tabla 2 se recogen los diferentes usos del suelo con una pequeña descripción de los mismos, superficie y porcentaje de ocupación en la zona de estudio. Tanto en la Figura 7 como en la Tabla 2 se observa que predominan los frutales de secano, los cultivos herbáceos de regadío, matorral y zonas de labor de secano, lo que supone un 29,83%, 23,20%, 16,02% y 13,08% de la superficie de la zona de estudio respectivamente.

Tabla 2: Usos del suelo de la cuenca Rambla del Albujón

Descripción	Superficie (km <sup>2</sup> )	%
Frutales de secano	162	29,83
Cultivos herbáceos de regadío	126	23,20
Matorral	87	16,02
Labor de secano	71	13,08
Cítricos de regadío	28	5,16
Improductivo	20	3,68
Frutales de regadío	17	3,13
Coníferas	12	2,21
Matorral asociado a coníferas	9	1,66
Agua	4	0,74
Viñedo de regadío	3	0,55
Huerta	1	0,18
Olivar de regadío	1	0,18
Olivar de secano	1	0,18
Pastizal de matorral	1	0,18

### 2.3.3.- Parámetros del suelo, geológicos y geomorfológicos

Los datos del suelo se obtuvieron de la base de datos Harmonized World Soil (HWSD) (<http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>).

Esta Base de Datos armonizada de los Suelos del Mundo consiste en una base de celdas de 30 arcosegundos, la cual incluye más de 15.000 unidades cartográficas de suelo a lo que armoniza actualizaciones regionales y nacionales de información de suelos del mundo (SOTER, ESD, Mapa de Suelos de China, WISE) con la información contenida a escala 1:5.000.000 del Mapa Mundial de Suelos de la FAO-UNESCO.

La base de datos compiladas de raster consisten en 21600 filas y 43200 columnas, estas se entrelazan a datos de propiedades de suelo armonizados. El uso de esa estructura permite la asociación de los datos de atributo con el mapa raster para su ilustración o consultar la estructura en términos de unidades de suelo y la caracterización propiedades del suelo seleccionadas (carbono orgánico del suelo, pH, capacidad de almacenamiento de agua, profundidad del suelo, capacidad de

intercambio catiónico del suelo y la fracción de arcilla, bases intercambiables totales, contenido de limo y yeso, porcentaje de sodio intercambiable, salinidad, clases texturales y granulometría).

En la cuenca Rambla del Albuñón el tipo de suelo predominante es el Calcaric Cambisols. En la Tabla 3 se recogen los diferentes suelos de la zona de estudio.

Tabla 3: Tipos de suelo de la cuenca Rambla del Albuñón

Suelos	Tipo de suelo FAO	
	Grupo de suelos de referencia	Calificador principal
1	Cambisols	Calcaric
2	Gypsisols	Haplic
3	Calcisols	Haplic

## 2.4.- Delimitación de subcuencas

El modelo SWAT se basa en la creación de unas HRUs, las cuales se obtienen mediante la combinación de los usos del suelo, los tipos de suelo y las pendientes. Para la simulación de procesos hidrológicos, una cuenca hidrográfica es dividida en diferentes subcuencas. En la Figura 8, se muestra el esquema de SWAT para la creación de las HRUs a partir de los tres tipos de mapas.



Figura 8. Esquema SWAT para creación de las HRUs

## 3.- CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

### 3.1.- Calibración de la hidrología superficial

Debido a la ausencia de información específica sobre caudales, la calibración de la hidrología superficial se ha llevado a cabo utilizando datos de evapotranspiración. Un conocimiento preciso de la evapotranspiración es necesario para el estudio de los recursos hídricos disponibles en una cuenca. En este proyecto, para el cálculo de la evapotranspiración potencial que requiere SWAT se utilizó el método Penman-Monteith. La evapotranspiración potencial es la evapotranspiración que se daría en una superficie uniformemente cubierta de vegetación, en un momento de crecimiento, con acceso ilimitado a humedad en el suelo y sin estar expuesta a inclemencias meteorológicas adversas.

Como mapas topográficos, el modelo SWAT utiliza los modelos digitales del terreno para la obtención de la orografía de la zona de estudio. El MED, con un tamaño de malla de 25 m, se utilizó para determinar los límites de la cuenca hidrográfica y las subcuencas.

El uso del suelo tiene una gran influencia en cuanto a las propiedades hidrológicas de las cuencas, por ello es necesario considerarlo durante la modelización hidrológica. El modelo SWAT incorpora una base de datos de usos del suelo propia, por ello es necesario realizar la equivalencia entre los usos del suelo empleados por SWAT y los usos del suelo utilizados por el proyecto Corine Land Cover. Los mapas de suelo se utilizaron para caracterizar cada tipo de suelo a partir de información sobre la textura del suelo, la conductividad hidráulica y el contenido de agua disponible, entre otros. El uso del suelo es uno de los factores más importantes que controlan eventos como la escorrentía, la evapotranspiración, la deposición de sedimentos y la erosión del suelo.

En SWAT, la combinación de estos tres conjuntos de datos, (MED), mapas de suelo y mapas de usos del suelo) es utilizada para obtener en la cuencas hidrográficas las HRUs. Se definieron tres categorías de pendiente (0-2%, 2-8% y > 8%) (Figura 9) y se estableció un nivel de umbral del 10% para simplificar el procesamiento del modelo y eliminar pendientes, suelos y usos menores utilizados para cada subcuenca.

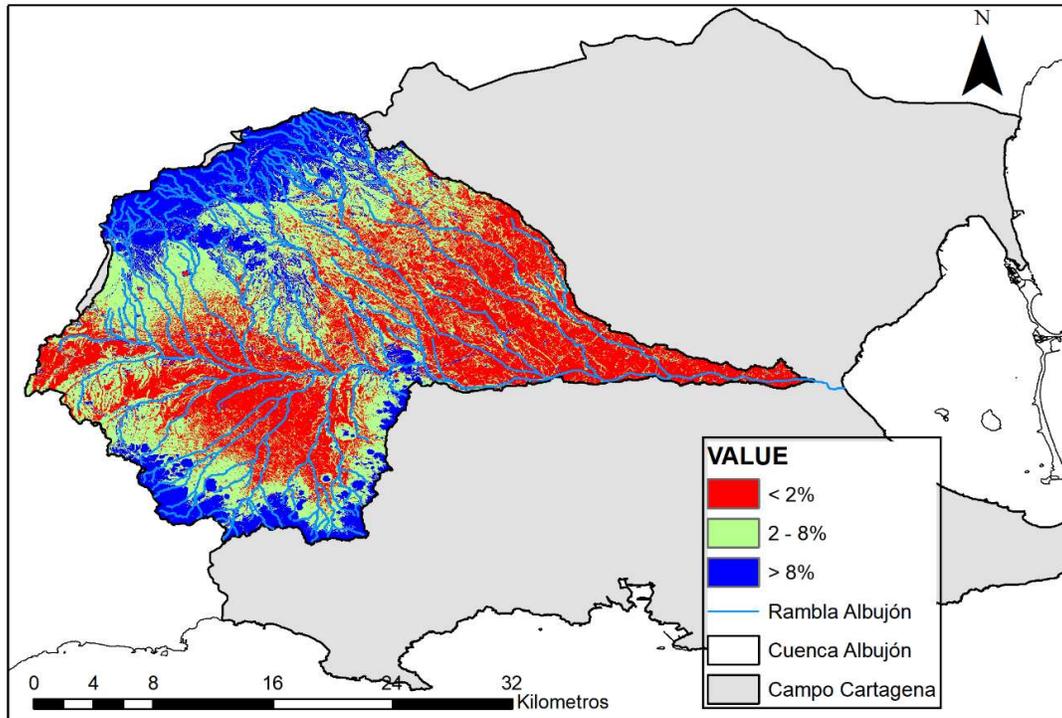


Figura 9. Pendientes de la cuenca Rambla del Albuñón

### 3.1.1.- Evapotranspiración

Debido a la ausencia de cauces permanentes en la zona de estudio y a su alta antropización, el modelo ha sido calibrado mediante medidas satelitales de evapotranspiración real obtenidas del *Global Land Evaporation Amsterdam Model* (GLEAM, Miralles et al., 2011) desarrollado por la Universidad VU de Amsterdam. Para este estudio se ha empleado la versión GLEAM v3.2b, la cual abarca un periodo de datos desde 2003 a 2015.

El modelo GLEAM, (<http://www.gleam.eu>) está formado por un conjunto de algoritmos que calculan por separado los diferentes componentes de la evaporación terrestre (transpiración, pérdida por interceptación, sublimación de la nieve, evaporación de suelo sin vegetación y evaporación en aguas abiertas) basándose en las observaciones satelitales diarias de los generadores meteorológicos de la evaporación terrestre, en las características de la vegetación y en la humedad del suelo (Miralles et al, 2011; Martens et al., 2017). Además, GLEAM proporciona otras variables como la evaporación potencial, la humedad del suelo en la zona radicular y la humedad superficial del suelo. El fundamento del método GLEAM es maximizar el uso de la información satelital para estimar la evaporación de forma espacialmente coherente.

El modelo global de GLEAM está compuesto por cuatro módulos. En el primer módulo, se calcula la evaporación de la lluvia interceptada por los bosques. En el segundo y tercer módulo se describe el reparto de agua (precipitación y nieve) en el suelo y el estrés hídrico de la vegetación en función del agua disponible en la zona radicular. Y en un cuarto módulo se calcula la evapotranspiración potencial.

### **3.2.- Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT**

El procedimiento de calibración de SWAT implica un análisis de sensibilidad seguido por una calibración y una validación. El análisis de sensibilidad determina cuanto afectan los cambios en los parámetros del modelo a las salidas del modelo. Es un proceso necesario para identificar los parámetros clave necesarios para la calibración, y seleccionar aquellos parámetros que tienen un impacto significativo sobre los resultados del modelo. La calibración del modelo es el proceso para estimar el valor de los parámetros mediante la comparación de las salidas de la simulación del modelo con los datos observados para las mismas condiciones. Y por último, el proceso de validación consiste en ejecutar el modelo utilizando los parámetros determinados en la

calibración para demostrar que el modelo es suficientemente preciso para el caso de estudio (Moriasi et al., 2007).

La calibración automática optimiza los valores de los parámetros utilizando métodos numéricos. Esta calibración implica el cálculo del error de predicción utilizando una ecuación llamada función objetivo, y un procedimiento de optimización automática mediante un algoritmo de búsqueda. Este algoritmo busca los valores de los parámetros que optimizan el valor de la función objetivo (Gupta et al., 1999). En el caso del modelo SWAT, con un gran número de parámetros y de complejo funcionamiento, se opta por la calibración automática. Para esta tarea se emplea el software SWAT-CUP (SWAT – Calibration Uncertainty Procedures). SWAT-CUP es un programa independiente desarrollado para la calibración de SWAT. El programa ofrece cinco métodos de calibración diferentes, e incluye funcionalidades para validación y análisis de sensibilidad. Los cinco algoritmos incluidos en SWAT-CUP son: GLUE (Beven y Binley, 1992), ParaSol (Van Griensven y Meixner, 2006), MCMC (Markov Chain Monte Carlo) (Kuczera y Parent, 1998), PSO (Particle swarm optimization) (Eberhart y Kennedy, 1995) y SUFI-2 (The Sequential Uncertainty Fitting version 2) (Abbaspouret al., 2004, Abbaspour et al., 2007).

Como algoritmo de calibración se seleccionó para este modelo el algoritmo SUFI-2, el cual en comparación con las otras opciones de calibración requiere un menor número de simulaciones para lograr el mismo nivel de rendimiento. Además, para los modelos a gran escala que consumen mucho tiempo, se encontró que SUFI-2 era bastante eficiente (Yang y Chang, 2008). SUFI2 permite un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo, utilizando para ello los resultados de la calibración y un contraste t-Student para evaluar el efecto de los resultados en función del cambio de un parámetro dado sobre el resto del modelo.

El proceso de calibración con SUFI-2 para el ajuste de los valores de los parámetros seleccionados incluye los siguientes pasos:

1. Definición de la función objetivo
2. Definición del rango inicial de los parámetros que se quieren optimizar.
3. Realización de un análisis de sensibilidad de los parámetros.
4. Ejecución de N simulaciones, guardando las variables de salida obtenidas.
5. Cálculo de la función objetivo para evaluar las simulaciones.
6. Definición del nuevo rango de parámetros y repetición de las simulaciones hasta conseguir el ajuste deseado.

El análisis de sensibilidad se lleva a cabo manteniendo todos los parámetros constantes a valores realistas, mientras se varía cada parámetro dentro del rango asignado en el paso dos. Para cada parámetro, se realizan alrededor de cinco simulaciones simplemente dividiendo los rangos absolutos en intervalos iguales y permitiendo que el punto medio de cada intervalo represente ese intervalo. SUFI-2 realiza un análisis de regresión múltiple calculando los valores estadísticos del T-Stat y P-Value. El P-Value de cada término comprueba la hipótesis de si la media de las muestras está cercana a la esperada. Valores pequeños de P-Value ( $< 0,05$ ) indican que el parámetro es significativo en el cálculo de la función objetivo. Valores altos de P-Value significan que el parámetro es poco influyente.

Los resultados de las simulaciones dependen del estado del sistema en el tiempo cero, por lo que debe tenerse especial atención al escoger estas condiciones. Para ello se utiliza el periodo de calentamiento, el cual consiste en un periodo inicial (2-5 años) para que el modelo se estabilice y se ajuste de forma correcta a la realidad y así mejorar la calidad de la simulación.

Finalmente, el proceso de validación consiste en ejecutar el modelo con los valores de los parámetros obtenidos en la calibración. Para la validación se utilizan datos de entrada, en este caso datos climatológicos, de periodos distintos a los empleados en la calibración. Su objetivo es probar el modelo en otros periodos de tiempo a los

calibrados, dándole robustez al modelo y garantizando que puede usarse bajo cualquier escenario.

### 3.2.1.- Evaluación del modelo

En este proyecto se han utilizado cuatro indicadores estadísticos para valorar la bondad de ajuste del modelo y por lo tanto la eficiencia del mismo. Dichos estadísticos se definen a continuación.

El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970) es un estadístico normalizado que determina la relativa magnitud de la varianza residual frente a la varianza de los datos observados y su fórmula es la siguiente:

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \overline{Y^{obs}})^2} \right]$$

donde  $Y_i^{obs}$  es el valor observado en el tiempo  $i$ ,  $Y_i^{sim}$  es el valor simulado para el tiempo  $i$  y  $\overline{Y^{obs}}$  es el valor medio de los datos observados. NSE oscila entre  $-\infty$  y 1, siendo el valor óptimo  $NSE=1$ . Valores comprendidos entre 0 y 1 significa un rendimiento aceptable, mientras que valores inferiores a 0 indica que el valor medio observado es mejor predictor que el valor simulado, indicando un rendimiento inaceptable (Moriasi et al., 2007).

El Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) indica la proporción de la varianza de los datos medidos que puede ser explicada por el modelo.  $R^2$  oscila entre 0 y 1, cuanto mayor sea su valor menor es el error de la varianza, valores por encima de 0,5 son considerados aceptables (Moriasi et al., 2007). La ecuación para el cálculo de  $R^2$  se muestra a continuación:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \overline{Y^{obs}}) \cdot (Y_i^{sim} - \overline{Y^{sim}})]^2}{[(n - 1) \cdot S^{obs} \cdot S^{sim}]}$$

donde  $\overline{Y^{sim}}$  es el valor medio de los datos simulados,  $n$  el número total de observaciones,  $S^{obs}$  es la varianza de los datos observados y  $S^{sim}$  la varianza de los datos simulados.

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) es un índice comúnmente utilizado para cuantificar el error en la estimación en las mismas unidades de los datos. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{n}}$$

Por último, es empleado el porcentaje de sesgo (PBIAS). PBIAS es la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayor o más pequeños que sus homólogos observados. El valor óptimo de PBIAS es 0, los valores de baja magnitud indican una simulación precisa del modelo. PBIAS se calcula con la siguiente ecuación:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}}$$

### 3.2.2.- Función objetivo para la calibración

Al inicio del proceso de calibración es necesario definir la función objetivo, la cual permitirá estimar la incertidumbre de las series de evapotranspiración simuladas respecto a las observadas. Como función objetivo a maximizar se estableció el índice de eficiencia de NSE definido en el apartado anterior.

### 3.2.3.- Periodos de calentamiento, calibración y validación

Las medidas obtenidas de las simulaciones dependen explícitamente del estado del sistema en el tiempo cero, por lo que debe tenerse especial atención al escoger estas condiciones. Para ello se utiliza el periodo de calentamiento el cual consiste en dejar una serie de años iniciales para que el modelo se ajuste de forma correcta a la realidad

y así mejorar la calidad de nuestra simulación. En este estudio se ha aplicado un periodo de calentamiento tanto para la calibración como para la validación, ya que el modelo SWAT lo requiere para la simulación de la cuenca. En la Tabla 4 se especifican los periodos utilizados.

*Tabla 4. Periodo de calentamiento y calibración*

Fase	Periodo	Años
<b>Calentamiento (Calibración)</b>	2001-2002	2
<b>Calibración</b>	2003-2008	6
<b>Calentamiento (Validación)</b>	2007-2008	2
<b>Validación</b>	2009-2015	7

## 4.- RESULTADOS

Tras la introducción de los datos de entrada del modelo (Series climáticas, mapa topográfico, mapa de usos del suelo y mapa de tipos de suelo), se procedió a la calibración del modelo mediante el uso de datos observados medios de evapotranspiración (GLEAM) para toda la cuenca de la Rambla del Albuñón.

En el análisis de sensibilidad se comprobó la sensibilidad de los parámetros escogidos y se seleccionaron los más sensibles y a continuación se realizó la calibración de dichos parámetros. El periodo de calibración seleccionado durante la aplicación del modelo SWAT fue de 6 años (2003-2008), considerándose un periodo de calentamiento de 2 años. Tras la calibración de los parámetros se procedió a la validación del modelo con un periodo de 7 años (2009-2015). En los apartados siguientes se describen los resultados obtenidos en cada una de estas etapas: análisis de sensibilidad, calibración y validación.

### 4.1.- Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo SWAT

El análisis de sensibilidad y la calibración de los parámetros del modelo SWAT se llevaron a cabo automáticamente en SWAT-CUP utilizando el algoritmo SUFI-2. Para identificar los parámetros más sensibles para el modelo hidrológico, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad. Los parámetros utilizados inicialmente en el análisis se incluyeron por ser parámetros frecuentemente utilizados en estudios similares. Los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad del presente modelo quedan descritos en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad del modelo SWAT

Parámetro	Unidades	Descripción
V_ALPHA_BF.gw	días <sup>-1</sup>	Coefficiente de agotamiento del flujo base
V_CANMX.hru	mm	Capacidad máxima de interceptación vegetal
R_CN2.mgt	-	SCS número de curva
V_EPCO.hru	-	Factor de compensación de la captación de las plantas
V_ESCO.hru	-	Factor de compensación de la evaporación del suelo
A_GWQMN.gw	mm	Límite de profundidad del acuífero superficial para que se produzca flujo de retorno
A_GW_DELAY.gw	días	Tiempo de retardo del agua subterránea
V_GW_REVAP.gw	-	Coefficiente evaporación del flujo subterráneo
A_REVAPMN.gw	mm	Umbral de profundidad del agua en el acuífero superficial para evaporación a la capa de suelo o percolación al acuífero profundo
R_SOL_AWC().sol	mm H <sup>2</sup> O/mm suelo	Capacidad de agua disponible de la capa del suelo
R_SOL_K().sol	mm/h	Conductividad hidráulica saturada

Tras realizar 100 simulaciones en el software SWAT-CUP con todos los parámetros (11 parámetros), se obtuvieron los valores de los estadísticos t-Stat y P-Value. En la Figura 10 se observa la sensibilidad de cada parámetro, es decir, la influencia relativa de cada parámetro en los resultados finales obtenidos con el modelo.

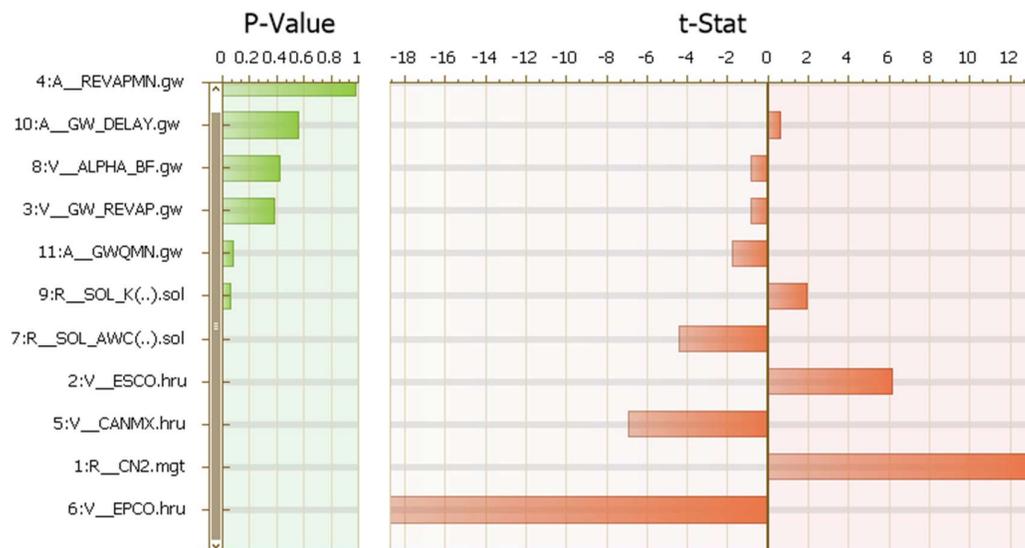


Figura 10. Resultados del análisis de sensibilidad obtenido en SWAT-CUP

A partir de este análisis se pudo comprobar que seis de los parámetros escogidos eran muy influyentes en el modelo, es decir, obtuvieron un P-Value inferior a 0,05. Los parámetros más sensibles fueron: EPCO, CN2, CANMX, ESCO, SOL\_AWC y SOL\_K.

#### 4.2.- Calibración y validación del modelo SWAT

Tras el análisis de sensibilidad, se procedió a la calibración de los seis parámetros más sensibles mediante SWAT-CUP y su algoritmo SUFI-2. Se realizaron un total de 1000 simulaciones divididas en dos lotes de 500 simulaciones cada una. Empleándose como función objetivo el coeficiente NSE. Los valores calibrados de los parámetros se presentan en la Tabla 6. En el nombre de los parámetros (Figura 10 y Tabla 6), R\_ se refiere a cambio relativo, es decir, el parámetro existente debe de ser multiplicado por (1+el valor obtenido en la calibración), V\_ significa que el valor del parámetro existente debe ser reemplazado por el valor dado en la calibración, y A\_ se refiere a cambio absoluto, es decir, el valor dado debe ser añadido al valor existente del parámetro.

Tabla 6. Valores calibrados de los parámetros

Parámetro	Valor calibrado
V_CANMX.hru	2,36
R_CN2.mgt	0,11
V_EPCO.hru	0,20
V_ESCO.hru	0,54
R_SOL_AWC().sol	-0,14
R_SOL_K().sol	-0.06

Durante el proceso de calibración se logró maximizar la función objetivo hasta alcanzar un valor de NSE igual a 0,71. La Tabla 7 muestra las medidas de error y ajuste de las series de evapotranspiración obtenidas en calibración y validación para los diferentes estadísticos.

Tabla 7. Medidas de error y ajuste del modelo SWAT

Estadísticos	Calibración 2003-2008	Validación 2009-2015
<b>NSE</b>	0,71	0,74
<b>R<sup>2</sup></b>	0,72	0,77
<b>RMSE</b>	7,47	7,23
<b>PBIAS (%)</b>	-1,15	-8,46

Los resultados de salida del modelo SWAT se muestran también gráficamente. En la Figura 11 y 12 se muestran las series mensuales de evapotranspiración (ET) simuladas frente a observadas para el periodo de calibración (Figura 11) y validación (Figura 12).

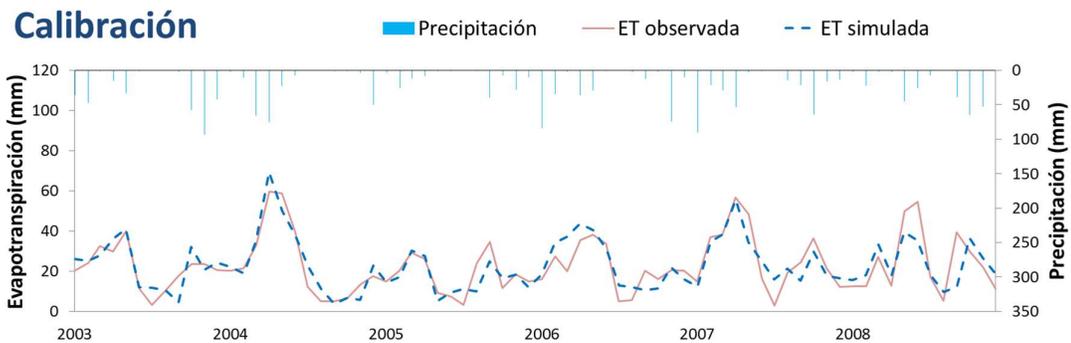


Figura 11. Serie de evapotranspiración obtenida en el modelo SWAT para el periodo de calibración

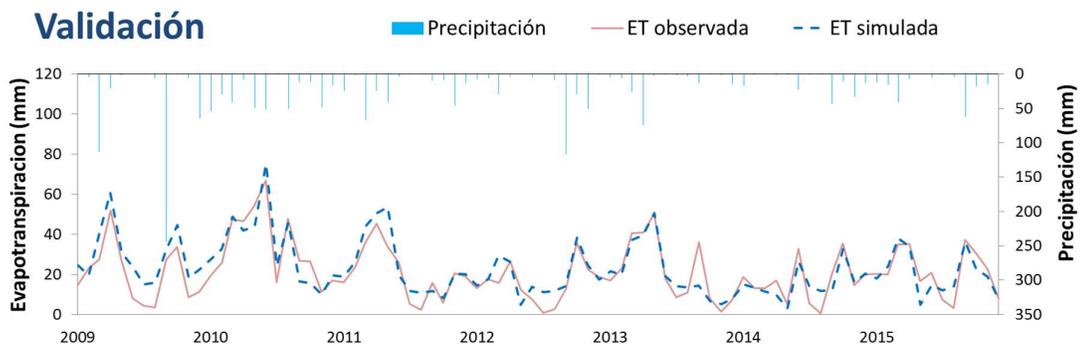


Figura 12. Serie de evapotranspiración obtenida en el modelo SWAT para el periodo de validación

### 4.3.- Cuantificación de la descarga superficial al Mar Menor desde la Rambla del Albuñón

Una vez calibrado y validado el modelo, se procedió al cálculo de los caudales que vierte la Rambla del Albuñón al Mar Menor. Con tal objetivo, el modelo fue simulado para el periodo 2000-2015 utilizando como datos climatológico de entrada los de las estaciones IMIDA (Tabla 1, apartado 2.2). En esta simulación la evapotranspiración potencial fue calculada con el método de Penman-Monteith. Las descargas medias anuales para este periodo 2000-2015 y con los datos de las estaciones IMIDA se muestran en la Figura 13, donde la descarga media obtenida fue de 28,04 hm<sup>3</sup>.

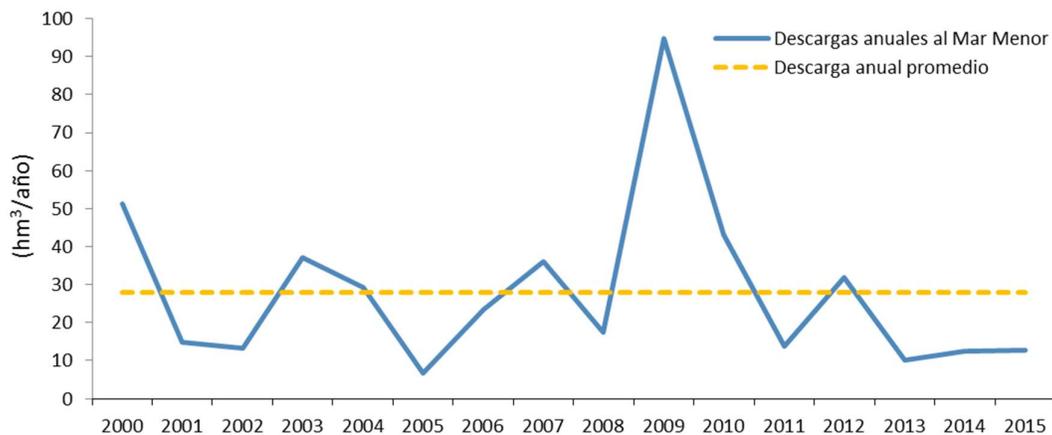


Figura 13. Descargas medias anuales al Mar Menor desde la Rambla del Albuñón obtenidas en el modelo SWAT a partir de los datos de las estaciones IMIDA para el periodo 2000-2015.

Con el objetivo de obtener las descargas superficiales al Mar Menor para un periodo histórico más largo, se simuló el modelo empleando los datos de precipitación y temperatura de AEMET-SPAIN02 para el periodo 1951-2015. En esta simulación, la evapotranspiración potencial fue calculada con la fórmula de Hargreaves al no disponer de los datos de humedad, velocidad del viento y radiación solar.

Los datos de precipitación fueron obtenidos de la rejilla a escala diaria que AEMET ha generado a partir de las series temporales de observaciones pluviométricas de las

estaciones del Banco Nacional de Datos Climatológicos. La geometría de esta rejilla es la del modelo de predicción numérica HIRLAM operativo en AEMET que tiene una resolución aproximada de 5 km. El método utilizado para generar los campos diarios de precipitación es un análisis objetivo por Interpolación Estadística. Los datos de temperatura fueron obtenidos de la rejilla SPAIN02-v5. La cual proporciona datos diarios de temperaturas máximas y mínimas con una malla regular de aproximadamente 10 km.

Las descargas medias anuales al Mar Menor para el periodo 1951-2015 son las que se muestran en la Figura 14, siendo el valor medio para ese periodo de 28,32 hm<sup>3</sup>.

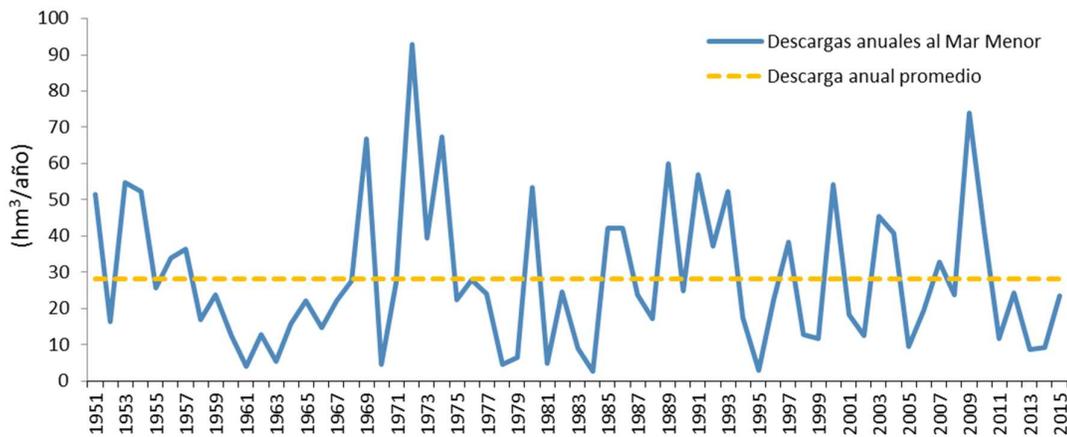


Figura 14. Descargas medias anuales al Mar Menor desde la Rambla del Albuñón obtenidas en el modelo SWAT a partir de los datos de las rejillas AEMET-SPAIN02v5 para el periodo 1951-2015

En la Tabla 8 se muestra un resumen de las descargas al Mar Menor desde la Rambla del Albuñón obtenido con el modelo SWAT a partir de las dos fuentes de datos empleados. También se muestra la descarga máxima y mínima anual para cada periodo de datos.

Tabla 8. Descargas anuales al Mar Menor desde la Rambla del Albuñón

Datos climatológicos	Descarga mínimo (hm <sup>3</sup> /año)	Descarga máximo (hm <sup>3</sup> /año)	Descarga media (hm <sup>3</sup> /año)
<b>IMIDA (2000-2015)</b>	6,72	94,75	28,04
<b>AEMET-SPAIN02 v5 (1951-2015)</b>	2,66	92,80	28,32

## 5.- CONCLUSIONES

En este trabajo se ha modelizado mediante el modelo hidrológico SWAT la cuenca de la rambla del Albuñón. Para ello ha sido necesaria la recopilación de la información necesaria para la implementación del modelo: información meteorológica (precipitación, temperatura, radiación solar, humedad y velocidad del viento) e información espacial (modelo digital del terreno, mapa de usos del suelo y mapa de suelos).

El ciclo hidrológico de la rambla del Albuñón, caracterizada por su alto grado de antropización y por la ausencia de información específica de caudales, se ha calibrado mediante el uso de datos de evapotranspiración real procedentes de teledetección. En la calibración del modelo, la función objetivo se maximizó hasta alcanzar un valor de NSE igual a 0,71. El resto de estadísticos de ajuste del modelo alcanzaron en la calibración un valor de 0,72 para  $R^2$ , 7,47 para RMSE y -1,15 para PBIAS. En la fase de validación del modelo se ha obtenido un valor de 0,74 para NSE, 0,77 para  $R^2$ , 7,23 para RMSE y un valor de -8,46 para PBIAS. Los resultados mostrados en este informe justifican su uso y demuestran la validez del modelo desarrollado. Este modelo puede ser utilizado como base de partida para la realización de otras investigaciones científicas que necesitan inexorablemente partir de un modelo a escala de cuenca correctamente calibrado y validado que refleje el comportamiento hidrológico de la cuenca de la Rambla del Albuñón.

La simulación del modelo para el periodo 1951-2015, empleando como datos de entrada la precipitación y temperatura de AEMET-SPAIN02, muestran una descarga superficial media desde la rambla del Albuñón al Mar Menor de 28 hm<sup>3</sup>/año, llegando esta descarga a alcanzar valores superiores a 90 hm<sup>3</sup>/año en los años más lluviosos.

Los resultados obtenidos permitirán reducir la incertidumbre asociada a otros cálculos relacionados con el estado ecológico del Mar Menor derivados de su relación con las cuencas vertientes. Entre ellos se pueden destacar los siguientes:

1. La recarga del acuífero Cuaternario obtenida en este trabajo puede ser utilizada como dato de entrada en el desarrollo de un modelo de flujo de agua subterráneo que permita estimar la descarga de dicho acuífero sobre el Mar Menor.
2. Modelización del transporte de sedimentos y de contaminantes en la cuenca de la Rambla del Albuñón.
3. Impacto del Cambio Climático tanto sobre los recursos hídricos como sobre el ciclo de sedimentos y transporte de nutrientes.
4. Analizar los efectos previsibles de distintas prácticas agrícolas orientadas a reducir la entrada de sedimentos y de nutrientes a la laguna del Mar Menor.
5. Análisis Coste-Eficacia de medidas para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor.

El investigador principal autor del informe,



Fdo. Javier Senent Aparicio  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos



## ANEXO 1. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., & Van Genuchten, M. T. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340-1352.

Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752.

Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., ... & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of hydrology*, 333(2-4), 413-430.

Arnold, J. G., Allen, P. M., & Bernhardt, G. (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of hydrology*, 142(1-4), 47-69.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.

Beven, K., & Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological processes*, 6(3), 279-298.

Conesa-García, C. (1990). *El campo de Cartagena. Clima e hidrología de un medio semiárido*. Universidad de Murcia, Murcia.

Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). *A new optimizer using particle swarm theory*. In Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on (pp. 39-43). IEEE.

García-Pintado, J., Martínez-Mena, M., Barberá, G. G., Albaladejo, J., y Castillo, V. M. (2007). Anthropogenic nutrient sources and loads from a Mediterranean catchment into a coastal lagoon: Mar Menor, Spain. *Science of the Total Environment*, 373(1), 220-239.

García-Pintado, J., Barberá, G. G., Erena, M., & Castillo, V. M. (2009). Calibration of structure in a distributed forecasting model for a semiarid flash flood: Dynamic surface storage and channel roughness. *Journal of hydrology*, 377(1-2), 165-184.

Gassman, P.W.; Reyes, M.; Green, C.H.; Arnold, J.G. (2007). The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future directions. *Trans. ASABE*, 50, 1211-1250.

Green, W.H. & Ampt, G.A. (1911). Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences*, 4, 11-24.

Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143.

Hargreaves, G. L., Hargreaves, G. H., & Riley, J. P. (1985). Agricultural benefits for Senegal River basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111(2), 113-124.

Kuczera, G., & Parent, E. (1998). Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. *Journal of Hydrology*, 211(1-4), 69-85.

Long, D., Longuevergne, L., Scanlon, B.R. (2014). Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites. *Water Resour. Res.* 50, 1131-1151.

Martens, B., Miralles, D., Lievens, H., Van Der Schalie, R., De Jeu, R., Fernández-Prieto, D., Beck, H., Dorigo, W. and Verhoest, N. (2017). GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture, *Geosci. Model Dev.*, 10(5), 1903-1925.

Miralles, D., Holmes, T., De Jeu, R., Gash, J., Meesters, A. and Dolman, A. (2011). Global landsurface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(2), 453-469.

Monteith, J.L. (1965). *Evaporation and the environment*. p. 205-234. In The state and movement of water in living organisms. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, Cambridge Univ. Press, London, U.K.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.

Nash, J.; Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.

NRCS (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55*. USDA Natural Resource Conservation Service Conservation Engineering Division Technical Release 55, p.164

Neitsch, S.L.; Arnold, G.; Kiniry, J.R.; Williams, J.R. (2009). Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation, Texas.

Pilgrim, D. H., Chapman, T. G., & Doran, D. G. (1988). Problems of rainfall semiarid regions. *Hydrological Sciences Journal*, 33(4), 379-400.

Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2), 81-92.

Senent-Aparicio, J.; Pérez-Sánchez, J.; Bielsa-Artero, A.M. (2016). Assessment of sustainability in semiarid mediterranean basins: case study of the Segura Basin, Spain. *Water Technol. Sci.* 7, 67-84.

Sloan, P.G. & Moore, I.D. (1984). Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, 20(12), 1815–1822.

Smedema, L.K. & Rycroft, D.W. (1983). *Land drainage: planning and design of Agricultural Drainage Systems*, Batsford, London.

SWAT User's Manual, (2000). <https://swat.tamu.edu/media/1290/swat2000theory.pdf>

USDA-SCS (1972). *National Engineering Handbook*. Section 4. Hydrology. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Washington.

Van Griensven, A., & Meixner, T. (2006). Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models. *Water Science and Technology*, 53(1), 51-59.

Yang, J. H., & Chang, C. C. (2008). Efficient residue number system iterative modular multiplication algorithm for fast modular exponentiation. *IET Computers & Digital Techniques*, 2(1), 1-5.

## ANEXO 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO SWAT

SWAT es un modelo de simulación continua, semi-distribuido, y físicamente basado, que opera a escala diaria. Fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos con la Universidad de Texas. SWAT fue principalmente creado para predecir el impacto de las prácticas humanas sobre los recursos hídricos y sobre los sedimentos en cuencas grandes y complejas, con variedad de tipos de suelos, diferentes usos del suelo y condiciones de explotación a lo largo del tiempo. Es un modelo matemático, el cual consiste en la representación de un sistema idealizado con propiedades estructurales importantes de un sistema real, a través de ecuaciones que expresan el funcionamiento de los procesos y las relaciones entre las variables y los parámetros.

Para la simulación de procesos hidrológicos, SWAT divide la cuenca hidrográfica en subcuencas basándose en la red de drenaje y en la topografía. SWAT considera la heterogeneidad espacial de una cuenca dividiendo las subcuencas en múltiples unidades de respuesta hidrológica (HRUs). Las HRUs consisten en zonas homogéneas con el mismo tipo de suelo, uso del suelo y pendiente. El modelo SWAT se materializa en ArcGIS o QGIS integrando diversos datos geoespaciales para representar con precisión las características de la cuenca. SWAT necesita un modelo de elevación del terreno, un mapa de usos del suelo, datos sobre el tipo de suelo y datos climáticos de la zona de estudio. Y se utilizan estos datos como entradas para el análisis de la simulación hidrológica de la escorrentía superficial y recarga de aguas subterráneas.

La simulación de la hidrología de la cuenca en SWAT es separada en dos fases. La primera fase es la fase terrestre del ciclo hidrológico (Figura 15). La fase terrestre determina la cantidad de agua, la carga de sedimentos, nutrientes y pesticidas incorporados al cauce principal de cada subcuenca. La segunda fase es la fase del agua del ciclo hidrológico que queda definida por el encauzamiento y movimiento del agua, de los sedimentos y de los demás componentes determinados en la primera fase a

través de la red de cauces de la cuenca hacia el punto de salida. Además de realizar un seguimiento del flujo en el canal, SWAT modela la transformación de las sustancias químicas en la corriente y en el lecho del cauce.

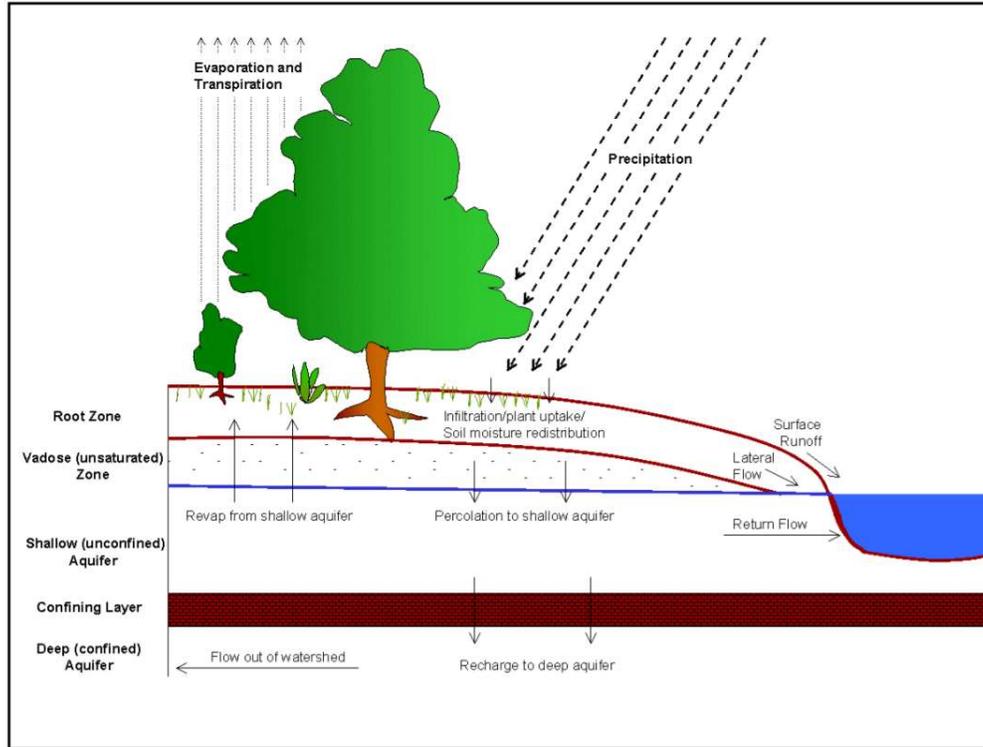


Figura 15. Esquema de la fase terrestre del ciclo hidrológico en SWAT. Fuente: SWAT User's Manual (2000).

SWAT simula el ciclo hidrológico basándose en el balance hídrico, estando este balance controlado por el clima (Abbaspour et al., 2015). La ecuación de balance hídrico que rige los componentes hidrológicos del modelo SWAT es la siguiente (Neitsch et al., 2009):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

donde,  $SW_t$  es cantidad final de agua en el suelo (mm),  $SW_0$  es la cantidad inicial de agua en el suelo en el día  $i$  (mm),  $R_{day}$  es la precipitación caída el día  $i$  (mm),  $Q_{surf}$  es la

cantidad de escorrentía superficial en el día  $i$  (mm),  $E_a$  es la evapotranspiración ocurrida el día  $i$  (mm),  $W_{seep}$  es la cantidad de agua que percola el día  $i$  (mm) y  $Q_{gw}$  es el flujo de retorno el día  $i$  (mm).

El clima de una cuenca proporciona los aportes de humedad y energía que controlan el balance hídrico y que determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Las variables climáticas requeridas por SWAT son la precipitación diaria, la temperatura máxima y mínima del aire, la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa. Estas variables pueden ser introducidas como datos observados o pueden ser generados durante la simulación.

El modelo SWAT asume para la modelización del agua en el cauce que el agua circula por canales trapezoidales y en régimen de lámina libre. Aplica la ecuación de Manning para calcular la velocidad de flujo. El agua circula por la red de canales utilizando el método de enrutamiento de almacenamiento variable o el método de Muskingum. Con este procedimiento se van agregando los flujos drenados en cada HRU hasta el punto de salida.

### **Componentes del modelo SWAT**

La precipitación puede ser interceptada por la vegetación o caer a la superficie terrestre. Una vez en la superficie, el agua se infiltra en el suelo, o bien, fluye por la superficie como escorrentía. La escorrentía fluye relativamente rápido hasta el canal o río, contribuyendo al caudal del río a corto plazo. El agua infiltrada puede quedar retenida en el suelo y después evapotranspirar, puede moverse lateralmente en el perfil del suelo hasta llegar al cauce, o llegar lentamente y a largo plazo al sistema superficial a través de caminos subterráneos. Una última opción es que el agua percole y se convierta en recarga del acuífero. A continuación se describen brevemente los diferentes procesos involucrados en la fase terrestre del ciclo hidrológico recogido en la Figura 15.

### 1.- Escorrentía superficial

La escorrentía superficial se produce cuando la precipitación que alcanza la superficie del suelo excede su capacidad de infiltración. A medida que aumenta la humedad en el suelo, dicha infiltración va disminuyendo. SWAT calcula el volumen de escorrentía superficial mediante dos procedimientos: el método del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS) (USDA-SCS, 1972) y el método de infiltración de Green y Ampt (1911). En el presente estudio se utiliza como procedimiento para estimar la escorrentía superficial el Método del Número de Curva del SCS. La ecuación para el Método del Número de Curva es la siguiente:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)}$$

donde  $Q_{surf}$  es la escorrentía superficial (mm),  $I_a$  es la intercepción y la infiltración previa a la generación de escorrentía (mm),  $R_{day}$  es la precipitación (mm) y  $S$  es el parámetro de retención, el cual varía espacial y temporalmente y se define mediante la siguiente fórmula:

$$S = 25,4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

donde CN es el número de curva y para su cálculo existen tablas que proporcionan el valor del número de curva según el tipo de terreno (NRCS, 1986).

SWAT basa su clasificación de suelos en los cuatro grupos hidrológicos (A, B, C y D) que establece el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) de EE.UU. Estos grupos se basan en su comportamiento frente a condiciones idénticas de precipitación y cubierta vegetal. Los suelos del grupo A son suelos con bajo potencial de escorrentía. Tienen una alta tasa de infiltración. Arenas y gravas con conductividad alta. Los del grupo B son suelos con una tasa de infiltración moderada, poseen texturas que van desde lo moderadamente fino a lo moderadamente grueso con conductividad

media. Los suelos del grupo C son suelos con una tasa de infiltración lenta. Su textura es fina y su conductividad lenta. Y por último, los del grupo D son suelos con alto potencial de escorrentía, con tasa de infiltración muy lenta debido a la presencia de terrenos casi impermeables en capas someras. Su conductividad es muy lenta.

También se tiene en cuenta las condiciones previas de humedad: 1.Seco (punto de marchitez), 2.Humedad media y 3.Húmedo (capacidad del suelo máxima). Donde los números de curva para las condiciones 1 y 3 se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 \cdot (100 - CN_2)}{\left[100 - CN_2 + e^{2,533 - 0,0635 \cdot (100 - CN_2)}\right]} \quad CN_3 = CN_2 \cdot e^{0,00673 \cdot (100 - CN_2)}$$

El parámetro de retención del suelo (S) se puede obtener en SWAT de dos maneras diferentes: Por el método tradicional, que es función del perfil de contenido de humedad del suelo, o de una manera alternativa, según la evapotranspiración acumulada de las plantas, de esta manera se obtiene CN menos dependiente del almacenamiento del suelo y más dependiente del clima precedente. Cuando el parámetro de retención varía con el perfil de humedad contenida en el suelo, la ecuación utilizada es la siguiente:

$$S = S_{\max} \cdot \left[1 - \frac{SW}{(SW + e^{w1 - w2 \cdot SW})}\right]$$

donde S es el valor del parámetro de retención en un día dado (mm),  $S_{\max}$  es el máximo valor que puede alcanzar (mm), SW es el contenido de agua en el suelo del perfil completo excluyendo la cantidad del punto de marchitez (mm), w1 y w2 son coeficientes de las capas que se calculan teniendo en cuenta que el parámetro de retención calculado con CN1 corresponde al punto de marchitez en contenido de agua en el suelo, que el parámetro de retención calculado con CN3 corresponde a la

capacidad del perfil de humedad del suelo y que cuando el suelo está saturado el número de curva es 99 y  $S = 2.54$ .

$$W1 = \ln\left(\frac{FC}{1 - S_3 * S_{max}^{-1}} - FC\right) + W2 * FC$$

$$W2 = \frac{\left(\ln\left(\frac{FC}{1 - S_3 * S_{max}^{-1}} - FC\right) - \ln\left(\frac{SAT}{1 - 2.54 * S_{max}^{-1}} - SAT\right)\right)}{SAT - FC}$$

donde FC es la cantidad de agua en el suelo a su capacidad de campo (mm),  $S_3$  es el parámetro de retención para CN3,  $S_{max}$  es el parámetro de retención para CN1, SAT es la cantidad de agua en el suelo cuando está saturado.

Cuando el parámetro de retención (S) lo calculamos en función de la evaporación de las plantas, se calcula mediante:

$$S = S_{prev} + E_0 \cdot e^{\left(\frac{-CNCOEF \cdot S_{prev}}{S_{max}}\right)} - R_{day} + Q_{surf}$$

donde  $S_{prev}$  parámetro de retención del día anterior (mm),  $E_0$  es la evapotranspiración potencial del día buscado ( $\text{mm d}^{-1}$ ), CNCOEF es el coeficiente de peso para el cálculo de CN dependiendo de la evapotranspiración,  $R_{day}$  la precipitación del día (mm),  $Q_{surf}$  es la escorrentía superficial. El valor inicial del parámetro de retención está definido como  $S=0.9*S_{max}$ .

SWAT incorpora un conjunto de datos de escorrentía para simular el desfase de la escorrentía superficial que se produce cuando el tiempo de concentración (tiempo desde que empieza a llover hasta que el caudal de salida se estabiliza) es superior a 1 día y solo una parte de la escorrentía llega al canal principal el día que es generada. Una vez que se ha calculado la escorrentía la cantidad de ella que llega al canal principal se calcula utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \cdot \left( 1 - e^{\left( \frac{-sur \cdot lag}{t_{conc}} \right)} \right)$$

donde  $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía descargada en el canal principal el día dado (mm),  $Q'_{surf}$  es la escorrentía generada en el día dado (mm),  $Q_{stor,i-1}$  es la escorrentía almacenada o retrasada del día previo (mm),  $sur \cdot lag$  es el coeficiente de retraso de la escorrentía,  $t_{conc}$  es el tiempo de concentración (h).

La intercepción del agua por las ramas y hojas de los árboles puede afectar significativamente a la escorrentía superficial, a la infiltración, y a la evapotranspiración. En el Método del Número de Curva el efecto de la intercepción es considerado dentro de las abstracciones iniciales ( $I_a$ ), aunque también engloba otros efectos como el almacenamiento superficial del suelo y la infiltración previa a la escorrentía. Las abstracciones se suelen aproximar como 20% del parámetro de retención (S).

## 2.- Infiltración y flujo lateral

El agua que penetra en el suelo puede percolar a capas más profundas del suelo e incluso recargar el acuífero. Por otro lado, puede también tener un movimiento lateral y contribuir al caudal subterráneo que aflora en cauces más adelante. El agua que retienen las plantas es la mayor parte de toda la que se precipita al suelo. Aunque el movimiento del agua se produce en condiciones saturadas y en no saturadas, SWAT simula directamente solo el flujo saturado ya que asume que el agua está uniformemente distribuida en cada capa. Este flujo saturado se produce cuando el contenido de agua en el suelo sobrepasa su capacidad de campo. El excedente puede percolar a capas más profundas y originar flujo lateral o contribuir al flujo de un cauce.

La percolación se calcula por capa. El agua percola si el contenido en agua excede la capacidad de campo para esa capa y la inferior no está saturada:

$$SWly,excess=SWly-FClly \quad si \quad SWly > FClly$$

$$SWly, =0 \quad si \quad SWly \leq FClly$$

donde  $SWly$ , es el volumen de agua que puede drenar (mm),  $SWly$  es el contenido de agua y  $FClly$  es la capacidad de campo (mm).

La cantidad de agua que se mueve de una capa a la siguiente se calcula mediante una ecuación de almacenamiento:

$$wperc = SWly \cdot (1-[-\Delta t/TTperc])$$

donde  $wperc$ , es la cantidad de agua que percola de la capa calculada a la siguiente (mm),  $SWly$ , es el volumen de agua en movimiento (mm),  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo del cálculo (h) y  $TTperc$  es el tiempo de viaje de percolación (h).

El flujo lateral será importante en zonas con suelos de alta conductividad hidráulica en las capas superficiales y con una capa impermeable o semipermeable a una profundidad moderada. En esta disposición, la lluvia percolará verticalmente hasta encontrarse con la capa impermeable. El agua entonces se acumula sobre esa capa impermeable creando una zona saturada. Esta es el origen del flujo subsuperficial.

SWAT incorpora un almacenamiento dinámico para modelizar este flujo, subsuperficial desarrollado por Sloan y Moore (1984). En concreto, para calcular el flujo lateral se toma un volumen en una capa inclinada permeable con otra debajo impermeable y, aplicando el principio de continuidad de la masa, se calcula la cantidad de agua acumulada sobre la capa impermeable en la zona saturada.

El caudal desaguado al pie de la pendiente ( $Qlat$ ) vendrá definido por la siguiente ecuación:

$$Qlat = 24 \cdot H_0 \cdot vlat$$

donde  $H_0$  es el espesor saturado en la salida y dirección normal a la capa (mm/mm),  $v_{lat}$  es la velocidad del flujo a la salida (mm-h-1).

En cuencas grandes cuyo tiempo de concentración supera el día, vuelve a aparecer el problema del desfase en la llegada del agua. SWAT aplica una ecuación igual a la del retraso de la escorrentía solo que no hay coeficiente de retraso de la escorrentía, puesto que podemos conocer directamente el tiempo o dejar que SWAT lo estime; en su lugar hay un 1, y en vez del tiempo de concentración, aparece el tiempo de viaje del flujo lateral  $TT_{lag}$  (días).

### 3.- Evapotranspiración

La evapotranspiración es un término que engloba todos los procesos por los cuales el agua líquida o sólida presente en la superficie terrestre o próxima a ella se convierte en vapor. La evapotranspiración, por lo tanto, incluye la evaporación en ríos y lagos, en la superficie del suelo o de las plantas, la evaporación desde dentro de las plantas (transpiración) y la sublimación del hielo y la nieve.

El modelo SWAT ofrece tres métodos para estimar la evapotranspiración potencial: Penman-Monteith (Monteith, 1965), Hargreaves (Hargreaves et al., 1985) y Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972).

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial por Penman-Monteith son requeridos los datos de la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento; para Priestley-Taylor son necesarios los datos de la radiación solar, la temperatura del aire y la humedad relativa; mientras que para Hargreaves sólo es requerida la temperatura del aire (temperatura máxima y mínima). En el presente estudio se emplea como procedimiento para estimar la evapotranspiración potencial el método de Penman-Monteith, cuya ecuación es la siguiente:

$$ETP = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{e_s - e_a}{e_s}}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)}$$

donde  $R_n$  es la radiación neta,  $G$  es el flujo del calor en el suelo,  $(e_s - e_a)$  representa el déficit de presión de vapor del aire,  $\rho_a$  es la densidad media del aire a presión constante,  $c_p$  es el calor específico del aire,  $\Delta$  representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación,  $\gamma$  es la constante psicrométrica, y  $r_s$  y  $r_a$  son las resistencias superficial (total) y aerodinámica.

#### 4.- Percolación

La percolación es calculada para cada capa del perfil del suelo. Cuando el contenido de agua del suelo excede a la capacidad de campo del suelo de una capa, entonces el agua se filtra a la siguiente capa. Cuando la capa de suelo está congelada, SWAT no calcula el flujo de agua de la capa.

#### 5.- Flujo de retorno y recarga al acuífero

El flujo de retorno, o flujo base, es el volumen de caudal que procede de aguas subterráneas. El agua que entra en el perfil del suelo por percolación o infiltración, se filtra a través de la zona vadosa antes de convertirse en recarga superficial del acuífero. El modelo SWAT divide las aguas subterráneas en dos sistemas acuíferos. Un acuífero poco profundo no confinado que contribuye con el flujo de retorno a las corrientes dentro de la cuenca, y un acuífero profundo y confinado que contribuye al flujo de retorno a las corrientes fuera de la cuenca (Arnold et al., 1993). Además del flujo de retorno, el agua almacenada en el acuífero poco profundo puede reponer la humedad en el perfil del suelo en condiciones muy secas o ser eliminada directamente por la planta.

El balance hídrico para el acuífero superficial no confinado se calcula con la siguiente ecuación.

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + W_{rchrg} - W_{revap} - W_{deep} - W_{pump,sh}$$

donde  $aq_{sh,i}$  es la cantidad de agua diaria almacenada en el acuífero superficial (mm),  $aq_{sh,i-1}$  es la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial del día  $i$  al día  $i-1$  (mm),  $W_{rchrg}$  es la cantidad de recarga en el acuífero en un día  $i$  (mm),  $Q_{gw}$  es el flujo base en un día  $i$  (mm),  $W_{revap}$  es la cantidad de agua de la zona suelo en respuesta a las deficiencias en un día  $i$  (mm),  $W_{deep}$  es la cantidad de agua que percola del acuífero superficial al acuífero profundo (mm) y  $W_{pump,sh}$  es la cantidad de agua que proviene del acuífero superficial para ser descargada (mm).

La recarga utilizada por SWAT tiene en cuenta el desfase en la recarga desde que el agua abandona el perfil del suelo y llega al acuífero. La función de retraso se calcula de forma iterativa con datos de campo.

$$W_{rchrg,i} = \left[ 1 - e^{-\frac{-1}{\delta_{gw}}} \right] \cdot W_{deep} + e^{-\frac{-1}{\delta_{gw}}} \cdot W_{rchrg,i-1}$$

donde  $W_{rchrg,i}$  es la recarga que entra a los acuíferos el día  $i$  (mm),  $\delta_{gw}$  es el retraso del tiempo de drenaje desde las formaciones superiores (días),  $W_{deep}$  es la cantidad total de agua existente en la parte inferior del perfil de agua en el día  $i$  (mm),  $W_{rchrg,i-1}$  es la recarga del día  $i-1$ .

SWAT calcular la cantidad de agua existente en la parte inferior del perfil del suelo con la siguiente ecuación:

$$W_{deep} = W_{perc,ly=n} + W_{crk,btm}$$

donde  $W_{perc}$ , es la cantidad de agua que percola de la capa más baja (mm),  $W_{crk}$ , es la cantidad de agua que le llega al acuífero por un tipo de flujo llamado de Bypass.

Toda la recarga así calculada se distribuye entre los acuíferos superficiales y profundo mediante un coeficiente  $\beta_{deep}$ , que es la fracción del flujo total que percola al acuífero profundo ( $W_{deep}$ ). El acuífero superficial contribuye al flujo base del canal principal de la subcuenca ( $Q_{gw}$ ) y el flujo base total generado se obtiene de la siguiente expresión:

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat} \cdot h_{wtbl}}{L_{gw}^2}$$

donde  $K_{sat}$  es la conductividad hidráulica del acuífero (mm/día),  $L_{gw}$  es la distancia desde el sistema de subcuenca que delimita el flujo base hasta el canal principal o cauce (m),  $h_{wtbl}$  es la altura del nivel freático (m).

La variación del nivel freático con el tiempo se calcula en SWAT según Smedema y Rycroft (1983) utilizando lo siguiente expresión:

$$\frac{dh_{wtbl}}{dt} = \frac{W_{rchrg,sh} - Q_{gw}}{800 \cdot \mu}$$

donde  $W_{rchrg,h}$  es la cantidad de recarga que entra al acuífero superficial (mm),  $Q_{gw}$  es el flujo subterráneo hacia el canal principal (mm),  $\mu$  es el rendimiento específico o cociente entre el volumen de agua drenado entre el volumen de material total del acuífero (m/m).

Si se asume que la variación del flujo está relacionada linealmente con la variación del nivel freático se obtiene el flujo base:

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot e^{(-\alpha_{gw} \cdot \Delta t) + W_{chrg,sh} \cdot (1 - e^{(-\alpha_{gw} \cdot \Delta t)})} \quad \text{si } aq_{sh} > aq_{shthr,q}$$

$$Q_{gw,i} = 0 \quad \text{si } aq_{sh} \leq aq_{shthr,q}$$

donde  $Q_{gw,-1}$  es el flujo subterráneo al canal principal del día anterior al considerado (mm),  $\alpha_{gw}$  es la constante de agotamiento del acuífero o constante de recesión del flujo base,  $aq_{sh}$  es la cantidad de agua acumulada en el acuífero superficial (mm) y  $aq_{shthr}$  es el umbral a partir del cual el acuífero superficial contribuye al flujo base (mm).

El agua del acuífero superficial puede abandonarlo en un movimiento de ascenso cuando las capas superiores a él se encuentran secas. El agua en los capilares del límite superior del acuífero que separa las zonas saturada y no saturada ascenderá y se evaporará. SWAT modeliza este movimiento como una función de la demanda de evapotranspiración. Este proceso es importante en cuencas con acuíferos cercanos a la superficie, por eso también es función del tipo de uso del suelo.

La cantidad máxima de agua que puede perder el acuífero por este fenómeno se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$w_{revap,max} = \beta_{rev} \cdot E_0$$

donde  $w_{revap,max}$  es la cantidad de agua máxima que se pierde (mm),  $\beta_{rev}$  es el coeficiente "revap",  $E_0$  es la evapotranspiración potencial para el día calculado (mm).

El balance hídrico para el acuífero profundo confinado se obtiene con la siguiente ecuación:

$$aq_{dp,i} = aq_{dp,i-1} + W_{deep} - w_{pump.dp}$$

donde  $aq_{dp}$ , es la cantidad de agua almacenada en el acuífero profundo (mm),  $aq_{dp,-1}$  es la almacenada en el acuífero profundo el día anterior (mm),  $W_{deep}$  es la percolación

desde el acuífero superficial al profundo (mm) y  $W_{\text{pump,dp}}$  es la cantidad de agua extraída del acuífero profundo si existiese algún bombeo (mm).

Finalmente, el agua que alcanza el acuífero profundo se considera una pérdida del sistema.