



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria Agroalimentària  
i de Biosistemes de Barcelona

# ESTUDIO DE APLICABILIDAD DEL MODELO SWAT PARA LA GESTIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS DE MONTAÑA

Treball final de grau

Enginyeria Agroambiental i del Paisatge

Autor: José Manuel Muñoz Guijarro

Tutores: Agnès Hereter Quintana

Antonio Jaime Molina Herrera

Mariano Moreno De las Heras

26 / septiembre / 2022

## Resum

Les conques de muntanya de Catalunya estan veient incrementada la seva superfície forestal de manera progressiva a les darreres dècades. Comptar amb eines que ens permetin avaluar l'impacte dels canvis d'usos de sòl als recursos hídrics és essencial per a una ordenació i planificació correctes. En aquest sentit, aquest treball ha configurat, calibrat i validat el model hidrològic "Soil and Water Assessment Tool" (SWAT) a la subconca tributària de l'Embassament de la Baells, una conca de muntanya ubicada a cavall entre el Pirineu i el Prepirineu català pertanyent a la conca del Riu Llobregat. S'ha seguit un Calibratge-Validació del tipus "Split-sample test" amb dades de cabal restituïdes a règim natural a la sortida de l'embassament, amb un període de calibratge del 01/01/1988 al 31/12/1999 (12 anys) i 12 anys d'escalfament, i amb un període de validació del 01/01/1978 al 31/12/1987 (10 anys) i 2 anys d'escalfament. Després d'identificar els paràmetres que més millora del comportament proporcionaven, se'n van provar combinacions, incrementant el nombre d'1 en 1 en l'ordre de millora individual. D'aquestes combinacions de paràmetres, es van seleccionar les millors en quant a estadístics sobre el comportament del model en el període de calibratge, i a continuació, es va córrer el model calibrat segons aquestes configuracions en el període de validació, escollint la configuració amb millor comportament tant pel període de validació com de calibratge. La configuració escollida ha consistit en el canvi relatiu dels valors dels paràmetres SOL\_AWC (.sol), SOL\_Z (.sol), SOL\_CBN (.sol) de 0.444773, 0.7875 i 4,41853 respectivament, i en el reemplaçament dels valors de CO2 (.sub) i LAI\_INIT (.mgt, {[],1} (Planting)) per 316 i 52.5 respectivament. També es van avaluar els efectes de: a) introduir dades meteorològiques només de temperatura i precipitació (quadrícula Spain02\_v5 de la Universidad de Cantabria (UC) i l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET)), b) fer-ho creant estacions virtuals als centroides de les subconques en funció de la proporció de l'àrea d'influència dels punts de la quadrícula amb dades en relació al cost acumulat en tenir en compte l'orografia, o c) utilitzar dades més completes interpolades per als centroides de les subconques mitjançant l'eina Meteoland App del Laboratori Forestal Català (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals – Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya, CREAM-CTFC). En aquest sentit, la tercera opció va donar els millors resultats, amb millores mitjanes en els estadístics del 14,11% i del 23,86% respectivament respecte a la primera opció durant el període de calibratge per al model sense calibrar.

Com a resultat d'aquest treball, s'ha obtingut una valoració del comportament del model per al període de calibratge molt bona segons el Coeficient de Determinació ( $R^2$ ) (0.86), el coeficient "Nash-Sutcliffe Efficiency" (NSE) (0.81), el "Ratio of Standard Deviation of Observation to Root Mean Square Error" (RSR) (0.44) i el "Index of Agreement" (d) (0.96), i bona segons el "Percent Bias" (PBIAS) (6.7%), amb millores mitjanes en els estadístics del 32.48% respecte al model sense calibrar, mentre que molt bona segons PBIAS (0.1%) i d (0.92), bona segons  $R^2$  (0.81) i satisfactòria segons NSE (0.53) i RSR (0.68) per al període de validació, amb millores mitjanes en els estadístics del 28.05% respecte al model sense calibrar. D'aquesta manera, podem afirmar que el model hidrològic SWAT es pot considerar una eina útil i robusta per a l'estimació dels cabals a la conca d'estudi, i així, quantificar els efectes que canvis en el clima i/o usos del sòl poguessin tenir en aquests.

## Resumen

Las cuencas de montaña de Cataluña están viendo incrementada su superficie forestal de manera progresiva en las últimas décadas. Contar con herramientas que nos permitan evaluar el impacto de los cambios de usos de suelo en los recursos hídricos es esencial para una correcta ordenación y planificación. En este sentido, este trabajo ha configurado, calibrado y validado el modelo hidrológico “Soil and Water Assessment Tool” (SWAT) en la subcuenca tributaria del Embalse de La Baells, una cuenca de montaña ubicada a caballo entre el Pirineo y el Prepirineo catalán perteneciente a la cuenca del Río Llobregat. Se ha seguido una Calibración-Validación del tipo “Split-sample test” con datos de caudal restituidos a régimen natural a la salida del embalse, con un periodo de calibración del 01/01/1988 al 31/12/1999 (12 años) y 12 años de calentamiento, y con un periodo de validación del 01/01/1978 al 31/12/1987 (10 años) y 2 años de calentamiento. Tras identificar los parámetros que mayor mejora del comportamiento proporcionaban, se probaron combinaciones de éstos, incrementando el número de 1 en 1 en el orden de mejora individual. De éstas combinaciones de parámetros, se seleccionaron las mejores en cuanto a estadísticos sobre el comportamiento del modelo en el periodo de calibración, y a continuación, se corrió el modelo calibrado según estas configuraciones en el periodo de validación, escogiéndose la configuración con mejor comportamiento tanto en el periodo de validación como de calibración. La configuración escogida ha consistido en el cambio relativo de los valores de los parámetros SOL\_AWC (.sol), SOL\_Z (.sol), SOL\_CBN (.sol) de 0.444773, 0.7875 y 4,41853 respectivamente, y en el reemplazo de los valores de CO2 (.sub) y LAI\_INIT (.mgt, {[],1} (Planting)) por 316 y 52.5 respectivamente. También se evaluaron los efectos de: a) introducir datos meteorológicos solo de temperatura y precipitación (rejilla Spain02\_v5 de la Universidad de Cantabria (UC) y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)), b) hacerlo creando estaciones virtuales en los centroides de las subcuencas en función de la proporción del área de influencia de los puntos de la rejilla con datos en relación al coste acumulado al tener en cuenta la orografía, o c) utilizar datos más completos interpolados para los centroides de las subcuencas mediante la herramienta Meteoland App del Laboratori Forestal Català (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals – Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya, CREAM-CTFC). En este sentido, la tercera opción arrojó los mejores resultados, con mejoras medias en los estadísticos

del 14,11% y del 23,86% respectivamente respecto la primera opción durante el periodo de calibración para el modelo sin calibrar.

Como resultado de este trabajo, se ha obtenido una valoración del comportamiento del modelo para el periodo de calibración muy buena según el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) (0.86), el coeficiente "Nash-Sutcliffe Efficiency" (NSE) (0.81), el "Ratio of Standard Deviation of Observation to Root Mean Square Error" (RSR) (0.44) y el "Index of Agreement" (d) (0.96), y buena según el "Percent Bias" (PBIAS) (6.7%), con mejoras medias de los estadísticos del 32.48% respecto al modelo sin calibrar, mientras que muy buena según PBIAS (0.1%) y d (0.92), buena según  $R^2$  (0.81) y satisfactoria según NSE (0.53) y RSR (0.68) para el periodo de validación, con mejoras medias de los estadísticos del 28.05% respecto al modelo sin calibrar. De esta manera, podemos afirmar que el modelo hidrológico SWAT puede considerarse una herramienta útil y robusta para la estimación de los caudales en la cuenca de estudio, y con ello, cuantificar los efectos que cambios en el clima y/o usos del suelo pudieran tener en éstos.

## Abstract

The mountain basins of Catalonia have seen their forest area progressively increased in recent decades. Having tools that allow us to assess the impact of changes in land use on water resources is essential for proper management and planning. In this sense, this work has configured, calibrated and validated the "Soil and Water Assessment Tool" (SWAT) hydrological model in the tributary sub-basin of La Baells Reservoir, a mountain basin located halfway between the Pyrenees and the Catalan Pre-Pyrenees belonging to the Llobregat River basin. A "Split-sample test" type Calibration-Validation has been followed with flow data restored to the natural regime at the outlet of the reservoir, with a calibration period from 01/01/1988 to 12/31/1999 (12 years) and 12 years of warming up, and with a validation period from 01/01/1978 to 12/31/1987 (10 years) and 2 years of warming up. After identifying the parameters that provided the greatest improvement in behavior, combinations of these were tested, increasing the number 1 by 1 in the order of individual improvement. The best ones from these combinations of parameters in terms of statistics about the behavior of the model in the calibration period were selected, and then the calibrated model was run according to these configurations in the validation period, choosing the configuration with the best behavior both in the validation and calibration period. The chosen configuration has consisted in the relative change of the values of the parameters SOL\_AWC (.sol), SOL\_Z (.sol), SOL\_CBN (.sol) of 0.444773, 0.7875 and 4.41853 respectively, and in the replacement of the values of CO2 (.sub) and LAI\_INIT (.mgt, {[,1} (Planting)) by 316 and 52.5 respectively. The study also evaluated the effects of: a) introducing only meteorological data for temperature and precipitation (Spain02\_v5 grid of Universidad de Cantabria (UC) and Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)), b) introducing this meteorological data by creating virtual stations at the centroids of the sub-basins based on the proportion of the area of influence of the grid points with data according to the accumulated cost taking into account the orography, or c) the use of more complete data interpolated for the centroids of the sub-basins using the Meteoland App tool of the Laboratori Forestal Català (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals – Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya, CREAM-CTFC). In this sense, the third option yielded the best results, with average improvements in the statistics of 14.11% and 23.86%, respectively, compared to the first option during the calibration period for the uncalibrated model.

As a result of this work, a very good evaluation of the behavior of the model has been obtained for the calibration period according to Coefficient of Determination ( $R^2$ ) (0.86), “Nash-Sutcliffe Efficiency” coefficient (NSE) (0.81), “Ratio of Standard Deviation of Observation to Root Mean Square Error” (RSR) (0.44) and “Index of Agreement” (d) (0.96), and good according to “Percent Bias” (PBIAS) (6.7%), with average improvements in the statistics of 32.48% compared to the uncalibrated model results, while very good according to PBIAS (0.1%) and d (0.92), good according to  $R^2$  (0.81) and satisfactory according to NSE (0.53) and RSR (0.68) for the validation period, with average improvements in the statistics of 28.05% compared to the uncalibrated model results. In this way, we can affirm that the SWAT hydrological model can be considered a useful and robust tool for estimating flows in the study basin, and thereby, for quantifying the effects that changes in climate and/or land use could have in them.

## Sumario

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>8</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>11</b>
<b>SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS</b>	<b>13</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>17</b>
<b>PREFACIO</b>	<b>18</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>19</b>
1.1. Contexto actual .....	19
1.2. Alcance del trabajo.....	21
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>22</b>
2.1. Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT para la cuenca tributaria del embalse de La Baells .....	22
2.2. Comprobación de la sensibilidad del modelo a los cambios de uso del suelo .....	22
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>23</b>
3.1. Modelo SWAT.....	23
3.1.1. Base teórica .....	23
3.1.2. Configuración .....	25
3.1.3. Calibración y validación del modelo .....	36
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>50</b>
4.1. Estudio de la sensibilidad a los cambios de usos del suelo, calibración y validación del modelo hidrológico SWAT para la cuenca tributaria del embalse de La Baells .....	50
4.1.1. Estudio de la necesidad de configurar en el modelo SWAT la variación de usos del suelo para la cuenca de estudio y análisis de la sensibilidad del modelo a los cambios de uso del suelo.....	50
4.1.2. Mejora del ajuste del modelo sin calibrar debida a la calidad de los inputs .....	58
4.1.3. Calibración.....	60
4.1.4. Validación .....	79
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>86</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>88</b>
<b>ANEJOS</b>	<b>119</b>



## Índice de figuras

Figura 3-1 Esquema de caminos posibles para los movimientos del agua en SWAT. _____	24
Figura 3-2 Algoritmo de cálculo de SWAT. _____	24
Figura 3-3 Flujo de trabajo para obtener el raster de cubiertas de 1956-1957 para todo el entorno de la cuenca de estudio. _____	28
Figura 3-4 Dispersión entre precipitaciones mensuales y caudales mensuales en la cuenca de estudio para los periodos 01/1950-12/1977 (previo a la puesta en marcha del embalse de La Baells o de muy reciente explotación), 01/1978-09/2000 (con La Baells en funcionamiento y datos fiables), 10/2000-09/2008 (con La Baells en funcionamiento pero con datos menos fiables). _____	43
Figura 3-5 Dispersión entre caudales mensuales y precipitaciones mensuales en la cuenca de estudio para los periodos de calibración y de validación, definitivos y alternativos. _____	44
Figura 3-6 Evolución temporal de las precipitaciones y los caudales en la cuenca de estudio. _____	44
Figura 3-7 Algoritmo “Sequential Uncertainty Fitting” (SUFI-2). _____	46
Figura 3-8 Flujo de trabajo llevado a cabo para recopilar los parámetros de SWAT que podrían afectar en la magnitud y la temporalidad de los caudales de salida de la cuenca. [90] _____	47
Figura 3-9 Flujo de trabajo llevado a cabo para eliminar los parámetros de SWAT no calibrables. _____	47
Figura 3-10 Tipología de errores de ajuste del modelo SWAT y posibles soluciones. _____	48
Figura 3-11 Flujo de trabajo llevado a cabo para calibrar los parámetros del modelo SWAT. _____	48
Figura 3-12 Flujo de trabajo llevado a cabo para validar la calibración realizada del modelo SWAT. _____	49

- Figura 4-1 Evolución temporal de las medias quinquenales de precipitaciones anuales, caudales anuales, diferencias P-Q anuales y  $ET_0$  anuales para el periodo 1987-1997 en la cuenca de estudio. \_\_\_\_\_ 51
- Figura 4-2 Evolución de las cubiertas y usos del suelo en la cuenca de estudio entre 1956 y 2017. \_\_\_\_\_ 54
- Figura 4-3 Fecha del último cambio de las cubiertas y usos del suelo en la cuenca de estudio entre 1956 y 2017, con énfasis en el periodo entre 1956 y 1997. \_\_\_\_\_ 55
- Figura 4-4 Residuos absolutos acumulados entre los caudales mensuales observados y los simulados utilizando diferentes capas de usos y cubiertas de suelo para los periodos 1987 (1985-1989), 1992 (1990-1994) y 1997 (1995-1999). \_\_\_\_\_ 57
- Figura 4-5 Comparación entre los caudales observados y los simulados con el modelo sin calibrar (periodo de calibración). Incluye la identificación de errores de ajustes según la documentación técnica de SWAT y la guía de la aplicación “SWAT Calibration Helper - Monthly v1.0”. \_\_\_\_\_ 75
- Figura 4-6 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 11 parámetros en 220 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales (periodo de calibración). \_\_\_\_\_ 75
- Figura 4-7 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 5 parámetros en 100 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales (periodo de calibración). \_\_\_\_\_ 75
- Figura 4-8 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 11 parámetros en 500 simulaciones dentro de los rangos de variación modificados según las iteraciones previas (periodo de calibración). \_\_\_\_\_ 76
- Figura 4-9 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 5 parámetros en 500 simulaciones dentro de los rangos de variación modificados según las iteraciones previas (periodo de calibración). \_\_\_\_\_ 76

- Figura 4-10 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 5 parámetros en 500 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales (periodo de calibración). \_\_\_\_\_ 76
- Figura 4-11 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 8 parámetros en 160 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales (periodo de calibración). \_\_\_\_\_ 77
- Figura 4-12 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 4 parámetros en 80 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales (periodo de calibración). \_\_\_\_\_ 77
- Figura 4-13 Gráficos de dispersión entre caudales observados y simulados para la cuenca de estudio en el periodo de calibración según diferentes configuraciones del modelo SWAT. \_ 78
- Figura 4-14 Comparación entre los caudales observados y los simulados para el periodo de validación con el modelo sin calibrar. \_\_\_\_\_ 83
- Figura 4-15 Comparación entre los caudales observados y los simulados para el periodo de validación con la configuración de la mejor simulación para el periodo de calibración modificando 5 parámetros en 100 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales. \_\_\_\_\_ 83
- Figura 4-16 Comparación entre los caudales observados y los simulados para el periodo de validación con la configuración de la mejor simulación para el periodo de calibración modificando 11 parámetros en 220 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales. \_\_\_\_\_ 83
- Figura 4-17 Gráficos de dispersión entre caudales observados y simulados para la cuenca de estudio en el periodo de validación según diferentes configuraciones del modelo SWAT. \_ 84
- Figura 4-18 Gráficos de dispersión entre caudales observados y simulados para la cuenca de estudio en el periodo de validación según diferentes configuraciones del modelo SWAT (ejercicio ficticio: ajuste sin tener en cuenta los caudales observados y simulados de noviembre de 1982). \_\_\_\_\_ 84

## Índice de tablas

Tabla 3-1 “Global_landuses table”, código numérico de usos del suelo leído por SWAT. _____	26
Tabla 3-2 Equivalencias consideradas entre las diferentes clasificaciones de cubiertas y usos del suelo y “global_landuses”, utilizado por el modelo SWAT. _____	29
Tabla 3-3 Equivalencia entre clasificaciones de suelo para las diferentes tipologías presentes en la cuenca de estudio según los mapas de suelo obtenidos antes de la publicación del Mapa de Sòls de Catalunya 1:250.000. _____	31
Tabla 3-4 Equivalencia entre las clases de suelo en la cuenca de estudio según el Mapa de Sòls de Catalunya 1:250.000 (ICGC, 2019) y las clases de suelo de la tabla “global_soils” de SWAT. 33	
Tabla 3-5 Clasificación de pendientes. _____	33
Tabla 3-6 Criterios de evaluación del comportamiento del modelo (“PEC”) según diferentes estadísticos. _____	37
Tabla 3-7 Estadísticos utilizados en el estudio del comportamiento de modelos hidrológicos ____	40
Tabla 3-8 Ajuste entre precipitaciones y caudales en diferentes periodos _____	43
Tabla 3-9 Estudio sobre los caudales y las precipitaciones en la cuenca de estudio durante diferentes periodos de tiempo. _____	44
Tabla 4-1 Cubiertas y usos del suelo en la cuenca de estudio entre los años 1956 y 2017 (en % de superficie de la cuenca). _____	51
Tabla 4-2 Matriz de variación entre las cubiertas y usos del suelo en la cuenca de estudio entre los años 1987 y 1992 (en % de superficie de la cuenca). _____	52
Tabla 4-3 Matriz de variación entre las cubiertas y usos del suelo en la cuenca de estudio entre los años 1992 y 1997 (en % de superficie de la cuenca). _____	53

Tabla 4-4 Cubiertas y usos del suelo invariables desde los años 1956, 1987 y 1992 hasta el 1997 (en km <sup>2</sup> de superficie en la cuenca de estudio).	56
Tabla 4-5 Comportamiento del modelo SWAT (sin calibrar) en la cuenca de estudio para el periodo de calibración según los diferentes inputs utilizados.	59
Tabla 4-6 Parámetros modificados para calibrar el modelo SWAT en los estudios consultados.	61
Tabla 4-7 Estudio del comportamiento del modelo SWAT para la cuenca de estudio y el periodo de calibración alcanzado con la mejor simulación de las modificaciones individuales de los parámetros seleccionados para ser modificados y comparación con el del modelo sin calibrar.	66
Tabla 4-8 Recopilación de la tipología de errores de ajuste (según la documentación técnica de SWAT) identificados en el ajuste entre los caudales mensuales observados y simulados para el periodo de calibración en la cuenca de estudio (Figura 4-5), las modificaciones de parámetros sugeridas por la documentación técnica de SWAT para solucionarlas (Figura 3-11), y la posición de cada uno de estos parámetros en la Tabla 4-7.	70
Tabla 4-9 Estudio del comportamiento del modelo SWAT para la cuenca de estudio y el periodo de calibración que se ha alcanzado con la mejor simulación de cada combinación de parámetros modificados y comparación con el comportamiento del modelo sin calibrar.	74
Tabla 4-10 Estudio del comportamiento del modelo SWAT para la cuenca de estudio y el periodo de validación que se ha alcanzado al modificar los parámetros del modelo según las diferentes modificaciones de parámetros de las simulaciones seleccionadas en la fase de calibración del modelo y comparación con el comportamiento del modelo sin calibrar.	82

## Símbolos y acrónimos

95PPU	95% Prediction Uncertainty
ACA	Agència Catalana de l'Aigua
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CREAF	Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals
EEABB	Escola d'Enginyeria Agroalimentària i de Biosistemes de Barcelona
EEA	European Environment Agency
CEC	Council of the European Union
CORINE	Coordination of the Information on the Environment
CTP	Comunidad de Trabajo de los Pirineos
CTFC	Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya
DEM	Digital Elevations Model (Modelo Digital de Elevaciones del terreno)
DIBA	Diputació de Barcelona
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GIGO	Garbage In, Garbage Out
GIS	Geographic Information System
Glue	Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
Grumets	Grup de Recerca en Teledetecció i Sistemes d'Informació Geogràfica

HRUs	Hydrologic Response Units
HWSD	Harmonized World Soil Database
ICGC	Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya
IDAEA-CSIC	Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua del Consejo Superior de Investigaciones Científicas
IDESCAT	Institut d'Estadística de Catalunya
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
IMDEA	Instituto Madrileño de Estudios Avanzados
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISRIC	International Soil Reference and Information Centre
JRC	Joint Research Centre
LiDAR	Light Detection and Ranging
LHS	Latin Hypercube Sampling
McMc	Markov chain Monte Carlo
MCSC	Mapa de Cobertes de Sòl de Catalunya
MSC250M	Mapa de Sòls de Catalunya 1:250.000
NetCDF	Network Common Data Form
OFC	Observatori Forestal Català

OMM	Organización Meteorológica Mundial
OPCC	Observatorio Pirenaico de Cambio Climático
ParaSol	Parameter Solution
PEC	Performance Evaluation Criteria (criterios de evaluación del comportamiento)
PSO	Particle Swarm Optimization
QGIS	Quantum GIS
QSWAT	QGIS interface for SWAT
SCP	Semi-Automatic Classification Plugin de QGIS
SMC	Servei Meteorològic de Catalunya
SMU	Soil Mapping Units
SQL	Structured Query Language
ST	Soil Taxonomy
SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	SWAT Calibration and Uncertainty Programs
SWAT-LUT	Landuse Update Tool for SWAT
TIF	Tagged Image File format
UAB	Universitat Autònoma de Barcelona
UB	Universitat de Barcelona
UC	Universidad de Cantabria



UPC	Universitat Politècnica de Catalunya
UPV	Universitat Politècnica de València
UN	United Nations
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United States Geological Survey
USLE	Universal Soil Loss Equation
WGEN	Weather Generator
WRB	World Reference Base for Soil Resources

## Agradecimientos

Se quiere agradecer especialmente la ayuda aportada por el Ingeniero Andreu Manzano Rojas (Agència Catalana de l'Aigua, ACA) por la facilitación de los caudales restituidos de la cuenca de estudio y por compartir su gran conocimiento sobre la cuenca y su funcionamiento, así como su espíritu crítico, los cuales han ayudado sin duda a mejorar este estudio, por no decir que han sido indispensables.

También se quiere agradecer especialmente el aprendizaje y la ayuda aportada por el Dr. David Andrés Ribas Tabares (Instituto Madrileño de Estudios Avanzados del Agua (IMDEA Agua) - Ingeoexpert) en cuanto a la configuración de SWAT, y por compartir su gran conocimiento en modelización hidrológica, lo que ha ayudado a desencallar algunas problemáticas encontradas, y que ha servido como punto de partida para poder desarrollar y mejorar más el estudio.

Por otra parte, se querría hacer mención y agradecerle al Dr. Emili Ascaso Sastrón (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, ICGC) haber facilitado la "Cartografia d'unitats edafològiques de Catalunya a escala 1:250:000: Berguedà i Garrotxa (ICGC)", una capa no publicada que supuso una disrupción en la información de suelos necesaria en SWAT obtenida, que pese no haber sido la utilizada finalmente, en su momento fue un impulso clave para no abandonar.

Finalmente, se quiere agradecer al Dr. Víctor Granda García (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAM) por su disposición y rapidez para solucionar la disponibilidad de datos de la herramienta Meteoland App del Laboratori Forestal Català (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals – Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya, CREAM-CTFC), los datos de la cual han supuesto una mejora considerable en el comportamiento del modelo.

No querría olvidar agradecer el más importante apoyo que he tenido, como son mis tutores (la Dra. Agnès Hereter Quintana, como tutora académica desde la Escola d'Enginyeria Agroalimentària i de Biosistemes de Barcelona (EEABB-UPC), y los doctores Antonio Jaime Molina Herrera y Mariano Moreno De las Heras, como tutores externos) y mi familia, que pese a que mi comportamiento con ellos y ellas no haya sido siempre el más ejemplar, siempre han estado ahí.

## Prefacio

El presente Trabajo Final de Grado se ha realizado en colaboración y bajo la tutela de los investigadores postdoctorales Antonio Jaime Molina Herrera y Mariano Moreno De las Heras del Grupo de Investigación sobre Hidrología Superficial y Erosión del Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IDAEA-CSIC), actualmente docentes e investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y de la Universidad de Barcelona (UB), respectivamente.

Primeramente, mis tutores externos me facilitaron bibliografía de referencia sobre la temática del Trabajo Final de Grado, así como compartieron conmigo el conocimiento adquirido desde el IDAEA-CSIC y su trayectoria investigadora en las implicaciones de la cubierta del suelo en el comportamiento hidrológico de las cuencas hidrológicas, haciéndome patente la oportunidad que podía suponer el modelo SWAT para simular diferentes escenarios, motivándome. En la fase de arranque, se realizaron frecuentes reuniones en las que se consensuaba cómo avanzar frente a los diferentes desafíos que nos iban apareciendo al avanzar, como las características de la información input de origen disponible y sus implicaciones en la configuración del modelo SWAT y su comportamiento, etc. En la etapa final he avanzado más libremente, y ellos han ido aportando su buen criterio para validar o no el avance y aportarme nuevos enfoques cuando lo veían interesante y/o necesario.

## 1. Introducción

### 1.1. Contexto actual

La mayor parte de los recursos hídricos que consume Barcelona y su área metropolitana proviene de la cabecera de las cuencas de los ríos Llobregat y Ter, en las regiones montañosas del Pirineo y del Prepirineo Catalán [1]. A su vez, según el Observatori Forestal Català (OFC) [2], Cataluña es un “país de bosques”; el 64,1% de su superficie de Cataluña está ocupada por éstos (Mapa de Cobertes de Sòl de Catalunya (MCSC) 2009), habiéndose incrementado su superficie en las últimas décadas un 4% entre los años 1993 y 2009, como consecuencia de la colonización de espacios nuevos y la densificación de las masas existentes. Este incremento se ha producido en mayor medida en detrimento de los terrenos agrícolas y matorrales, por un proceso de abandono y colonización por parte de la vegetación natural de los cultivos y por el abandono de los usos tradicionales del bosque y los matorrales [3][4][5][6][7][8].

Algunos estudios han constatado que al aumentar la cubierta forestal de una cuenca hidrológica, los caudales pueden disminuir [9][10][11][12][7], posiblemente por una mayor evapotranspiración e interceptación de esta tipología de uso de suelo frente a otras como pastos o matorrales [13][7][14][15][16][17]. Esta posible disminución de caudales por el cambio de cubierta del suelo cobra una especial importancia dados los escenarios a los que parece enfrentarse la región, con una tendencia a la baja de las precipitaciones, episodios de sequía más frecuentes [18][19][20][21][22] y un incremento significativo de temperatura que conllevarían un aumento de la tasa de evaporación y posiblemente de la evapotranspiración [23], lo que reduciría aún más los caudales [24].

A su vez, si contemplamos el escenario demográfico más plausible, en el que la población de Barcelona y su región metropolitana aumentará [25] con el consiguiente aumento de demanda hídrica total, podemos encontrarnos, pese a que la demanda hídrica per cápita se esté reduciendo en la región metropolitana, ante una situación grave en cuanto a la disponibilidad de recursos hídricos [1]. Por ello, conocer las consecuencias de la variación del clima y de los usos del suelo

resulta de vital importancia para la planificación y gestión futura del territorio y sus recursos [26][27][28].

En este sentido, el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IDAEA-CSIC), está llevando a cabo experimentos de campo probando diferentes estrategias de gestión forestal en su área de experimentación de Vallcebre para estudiar las consecuencias hidrológicas de estas, observados de cerca por la Agència Catalana de l'Aigua (ACA) que está interesada en la gestión forestal orientada a la producción de agua [29] [30], en la línea del manejo forestal sostenible que quiere fomentar Naciones Unidas [31][32][33] y de un manejo adaptativo [34][35][36] que incremente la resiliencia de los bosques frente a las nuevas perturbaciones [37][38][39][40][41].

La creciente disponibilidad de series de datos de parámetros ambientales con interés en el ciclo hidrológico ha logrado la mejora y la mayor facilidad de uso de modelos hidrológicos, algunos de los cuales pueden simular las consecuencias de los cambios en la gestión del territorio, con menor impacto ambiental que la experimentación de campo y de una forma más barata y rápida. Esto, facilita la extensión de la escala de los estudios de campo (normalmente de parcela), como por ejemplo los estudios que está realizando el IDAEA-CSIC, los datos de los cuales, a su vez, son útiles para ajustar mejor los modelos hidrológicos a su ámbito. Además, mediante la modificación conjunta en el estudio de variables climáticas y de otras tipologías de variables como los usos de suelo (simulando por ejemplo escenarios climáticos y de gestión activa futuros), como recomienda Macleod *et al.* [42] y permiten muchos modelos, se puede evaluar la repercusión de diferentes escenarios sobre los recursos hídricos y con ello, valorar criterios de gestión en condiciones climáticas más desfavorables.

El modelo escogido en este trabajo es la "Soil and Water Assessment Tool" (SWAT) [43], utilizada por la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) [44] como herramienta de planificación de los usos del suelo y de amplio uso por parte de gestores del territorio e investigadores de todo el mundo, posiblemente porque, según la FAO [44], es el programa de modelización ambiental más exhaustivo y con la base teórica más ampliamente explicada.

## 1.2. Alcance del trabajo

La cuantificación de los servicios ecosistémicos hidrológicos suele analizarse según tres dimensiones: cantidad, tiempo y calidad [45]. En este estudio se estudiará el caudal de agua en el punto de salida de la cuenca y su distribución temporal. La cuenca de estudio será la cuenca tributaria del embalse de La Baells, una cuenca de montaña a caballo del Pirineo y del Prepirineo Catalán, cabecera de la cuenca del río Llobregat, que representa el 30% de las aportaciones del río [1] y en la que se encuentra ubicada el área de experimentación de Vallcebre del IDAEA-CSIC.

## **2. Objetivos**

El presente trabajo supone el primer paso para la utilización del modelo SWAT como herramienta de planificación y gestión del territorio en cuencas de montaña de Cataluña, para poder valorar, desde un punto de vista holístico, el impacto de posibles escenarios de gestión forestal sobre los recursos hídricos según los diferentes pronósticos climáticos del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [46].

### **2.1. Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT para la cuenca tributaria del embalse de La Baells**

El objetivo principal es calibrar y validar el modelo hidrológico SWAT para la cuenca tributaria del embalse de La Baells.

### **2.2. Comprobación de la sensibilidad del modelo a los cambios de uso del suelo**

Dado que se quiere poder utilizar el modelo para evaluar el impacto de diferentes escenarios de gestión forestal y de cambio de usos del suelo, otro objetivo es verificar que el modelo no es insensible al cambio de usos del suelo.

## 3. Metodología

### 3.1. Modelo SWAT

Se ha utilizado la “QGIS interface for SWAT” (QSWAT) 1.9 (versión más reciente hasta el 12/08/2019) [47] junto a la versión de QGIS compatible (QGIS 2.6.1-1) [48], SWAT Editor 2012.10.21 (la versión más reciente) [49] y SWAT Check 1.2.0.10 [50].

#### 3.1.1. Base teórica

SWAT es un modelo semi-distribuido, que opera a tiempo continuo a escala de cuenca y a escala diaria, mensual o anual [44]. Está basado en parámetros físicos, en vez de utilizar ecuaciones de regresión para describir la relación entre las variables de entrada y de salida, de manera que SWAT requiere información específica sobre la meteorología, el suelo, la topografía, la vegetación y el uso del suelo de la cuenca. Los procesos físicos asociados al flujo de agua, al flujo de sedimentos, crecimiento vegetal y de cultivos, ciclo de cultivos, etc., se modelan directamente usando los datos de entrada de SWAT. Esto permite modelar cuencas sin monitoreo de caudal de salida, por ejemplo, o los efectos de variaciones en la climatología, usos del suelo, topografía, etc. [51]

SWAT trabaja con un esquema de desagregación de 2 niveles, el primero identifica las subcuencas a partir de la información topográfica, y después, gracias a datos edafológicos y de usos del suelo, y a criterios de separación por clases de pendientes, divide las subcuencas en “Hydrologic Response Units” (HRUs) [44], que consisten en áreas para las que se asume una respuesta hidrológica similar, de características homogéneas y con una combinación única de uso/cubierta de suelo, edafología y pendiente, diferentes a las de sus HRUs colindantes [52].

Todos los cálculos de SWAT están basados en el balance hídrico (ver Figura 3-1) [51], que de forma simplificada seguiría la fórmula (3-1):

$$\text{Caudal de salida} = \text{Caudal de entrada} - \text{Evapotranspiración} - \text{Retención} \quad (3-1)$$



Estos cálculos se realizan para cada HRU y a partir de estos balances se calcula el caudal de salida de cada subcuenca y de la cuenca total, lo que incrementa la precisión (ver Figura 3-2) [51].

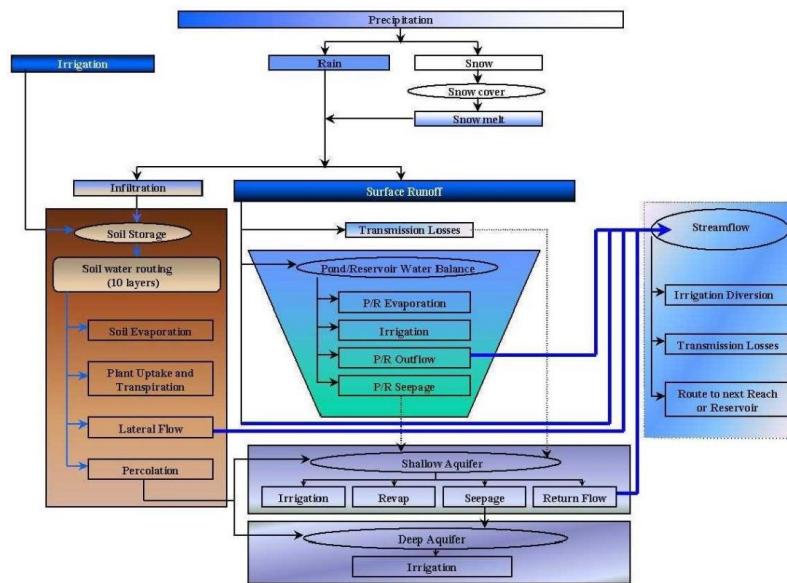


Figura 3-1 Esquema de caminos posibles para los movimientos del agua en SWAT.

Fuente: [51]

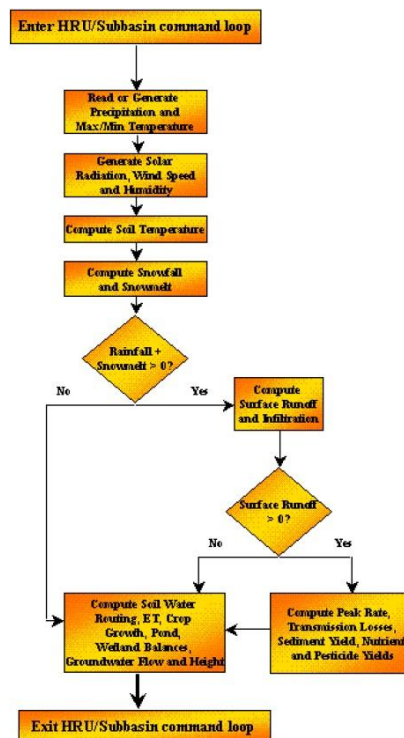


Figura 3-2 Algoritmo de cálculo de SWAT.

Fuente: [51]

SWAT incorpora tres métodos de cálculo de la evapotranspiración de referencia: Penman-Monteith, Priestley-Taylor y Hargreaves. Los datos de entrada necesarios para su cálculo varían según el método utilizado. Si se dispone de todos los datos necesarios (temperatura mínima y máxima, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento), el método utilizado por defecto por SWAT para estimar la evapotranspiración es Penman-Monteith. Por su parte, el método Hargreaves es el que necesita menos datos de entrada y fija la información mínima de la que disponer, las temperaturas máximas y mínimas del aire. Además, también se pueden introducir los datos de evapotranspiración de referencia directamente si se quiere utilizar otro método de cálculo [51]. La asignación de la información meteorológica se realiza asignando el punto con información meteorológica más cercano al centroide de cada subcuenca [53], pudiéndose introducir bandas de elevación para tener en cuenta la variación altitudinal dentro de éstas [51].

### **3.1.2. Configuración**

La configuración de QSWAT se realiza en 3 pasos. En el primero se delimitan las subcuencas, introduciendo como mínimo el modelo digital de elevaciones del terreno e identificando el output de la cuenca. En el segundo se crean los HRUs, introduciendo el mapa de usos del suelo y el mapa de suelos. Y en el último, se introducen los datos climáticos y se configura la simulación. Sin haber completado un paso, no está disponible el siguiente. En el Anejo A se muestran con más detalle cada uno de los pasos a realizar para configurar el modelo así como la localización de los outputs.

#### **3.1.2.1. Inputs necesarios para construir el modelo SWAT**

##### **3.1.2.1.1 Topografía – Modelo Digital de Elevaciones del terreno (“DEM”)**

Se necesita información de las elevaciones del terreno en formato “Tagged Image File” (TIF). En este estudio, se ha utilizado el Modelo Digital de Elevaciones del terreno 2m x 2m publicado por el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) (realizado a partir de datos de “Light Detection and Ranging” (LiDAR) de vuelos del 2009 y 2010) [54]. Para ello, se descargaron los datos de las hojas correspondientes en formato “American Standard Code for Information Interchange” (ASCII), se convirtió cada hoja a ráster TIF y se unieron en un mismo archivo ráster para, posteriormente, cambiar la resolución espacial a 30 m x 30 m, con la misma alineación de píxeles que los mapas de usos del suelo usados en las modelizaciones. De esta manera, se evita que algunos HRUs pudieran haber sido definidos por existir desacoples entre la información de

entrada, cosa que aumentaría innecesariamente el número de HRUs con el consiguiente aumento del coste de tiempo de computación.

### 3.1.2.1.2 Punto de salida (“output”)

Se necesita introducir un punto de salida de la cuenca. Se puede dibujar directamente o cargar un archivo en formato ESRI Shapefile de tipo punto con las coordenadas y la tipología de “outlet” (valorando las columnas “INLET” (punto de entrada), “RES” (embalse) y “PTSOURCE” (fuente) como 0) [55]. Se optó por dibujarlo directamente y que el programa le realizara un pequeño desplazamiento a continuación para adaptarlo a la topografía introducida (“Snap”). Para configurar el modelo de nuevo sin que varíe la definición de las subcuencas y cursos fluviales, se puede utilizar el archivo generado por QSWAT “drawoutlets\_snap.shp” en la configuración del proyecto anterior y localizado en la carpeta “Nombre del proyecto anterior/Watershed/Shapes/”.

### 3.1.2.1.3 Usos del suelo (“landuse map”)

Se necesita introducir información de usos del suelo en formato TIF, tratándose de un ráster con valor de píxel igual al código numérico del uso del suelo correspondiente a su localización. Se pueden utilizar diferentes tablas de códigos de usos del suelo (“Landuse table”), pero lo más intuitivo para que SWAT identifique bien los usos del suelo es utilizar la tabla “global\_landuses” (ver Tabla 3-1), localizada en la base de datos QSWATProj2012.mdb, y reclasificar los usos del suelo a esta codificación.

Tabla 3-1 “Global\_landuses table”, código numérico de usos del suelo leído por SWAT.

Fuente: [56]

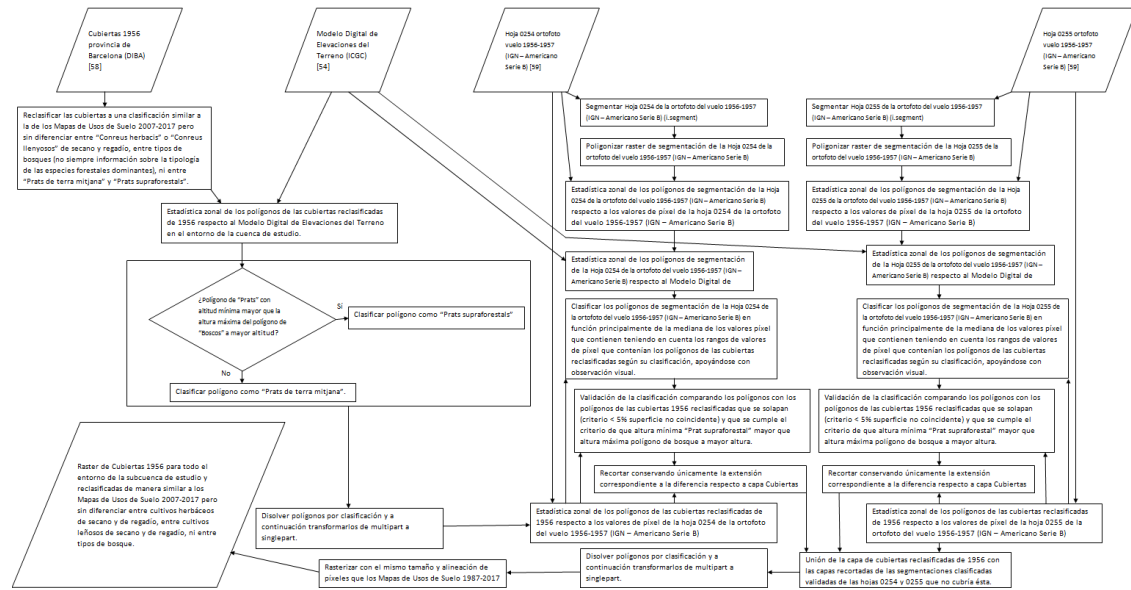
ID	United States Geological Survey (USGS) type	Symbol	Soil and Water Assessment Tool (SWAT) type
1	Urban and Built-Up Land	URMD	Residential Medium density
2	Dryland Cropland and Pasture	CRDY	Average (Agricultural Land-generic and Pasture)
3	Irrigated Cropland and Pasture	CRIR	Average (Agricultural Land-generic and Pasture)
4	Mixed Dryland / Irrigated Cropland	MIXC	Agricultural Land-generic
5	Cropland / Grassland Mosaic	CRGR	Average (Agricultural Land-generic and Range-Grasses)
6	Cropland / Woodland Mosaic	CRWO	Average (Agricultural Land-generic and Forest-Mixed)
7	Grassland	GRAS	Range-Grasses
8	Shrubland	SHRB	Range-Brush
9	Mixed Grassland / Shrubland	MIGS	Average (Range-Grasses and Range-Brush)
10	Savanna	SAVA	Average (Range-Grasses and Southwestern United States (arid) Range)
11	Deciduous Broadleaf Forest	FODB	Forest-Deciduous
12	Deciduous Needleleaf Forest	FODN	Forest-Deciduous
13	Evergreen Broadleaf Forest	FOEB	Forest-Evergreen
14	Evergreen Needleleaf Forest	FOEN	Forest-Evergreen
15	Mixed Forest	FOMI	Forest-Mixed
16	Water Bodies	WATB	Water
17	Herbaceous Wetland	WEHB	Wetlands-Mixed
18	Wooded Wetland	WEWO	Wetlands-Forested
19	Barren or Sparsely Vegetated	BSVG	Southwestern United States (arid) Range
20	Herbaceous Tundra	TUHB	Altai Wildrye
21	Wooded Tundra	TUWO	Average (Altai Wildrye and Range-Brush, reduced temperature)
22	Mixed Tundra	TUMI	Average (Southwestern United States (arid) Range and Altai Wildrye, reduced temperature)
23	Bare Ground Tundra	TUBG	Average (Southwestern United States (arid) Range and Altai Wildrye, reduced temperature)
24	Snow or Ice	ICES	Water

<sup>100</sup>Al marcar los tipos de usos del suelo de SWAT con fuente de color rojo se quiere señalar los tipos que se corresponden con promedios de varios usos.

Se dispuso de los mapas de usos y cubiertas del suelo de 1987 (v2), 1992, 1997, 2002, 2007, 2012 y 2017, publicados por el Departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya y elaborados, a partir de datos de  $\pm 2$  años respecto el año que le da nombre, por el ICGC del 1987 al 2002 y por el Grup de Recerca en Teledetecció i Sistemes d'Informació Geogràfica (Grumets, Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals - Universitat Autònoma de Catalunya, CREA-UAB) del 2007 al 2017, todos ellos con una resolución espacial de 30 m x 30 m [57]. El criterio de clasificación de usos del suelo cambió a partir del 2007 [57]. Dado que la mayoría de datos (meteorológicos y de caudales) de los que se disponían series eran anteriores a esta fecha, y que se pasó de una clasificación más simple a una más compleja, los mapas de usos y cubiertas del suelo de 2007 a 2017 se reclasificaron (mediante la herramienta r.reclass de QGIS) con el criterio anterior a 2007, para armonizar el criterio de clasificación entre mapas. Para que SWAT entendiera los datos, se reclasificaron los usos del suelo a la codificación correspondiente de su equivalente más cercano en la tabla global\_landuses de SWAT [56]. Ver Tabla 3-2.

También se ha contado, a partir de junio de 2022, con un mapa de cubiertas del año 1956, que se ha obtenido principalmente a partir del mapa "Cobertes del sòl (1956)" de la provincia de Barcelona realizado por la Diputació de Barcelona (DIBA) a partir de las ortofotos del vuelo americano de 1956-1957 [58]. Dado que parte de la subcuenca de estudio se encuentra fuera de la provincia de Barcelona, una superficie total de 11,7 ha, dividida en 2 zonas, no disponía de información sobre las cubiertas y usos del suelo. Para obtener esta información faltante, se segmentaron 2 hojas de la ortofoto del vuelo americano del 1956-1957 [59], la 0254 y la 0255, que cubrían estas zonas sin clasificar. A continuación, en gran medida mediante la comparación de los estadísticos de valores de píxel que contenían los polígonos que estaban clasificados y los segmentos identificados, se clasificaron estos últimos. Una vez validada la clasificación mediante la comparación de polígonos en la zona de solape del mapa de cubiertas con los mapas de segmentos clasificados creados, se procedió a crear el raster que cubriría todo el entorno de la cuenca de estudio. En la Figura 3-3 se puede ver con mayor detalle el procedimiento seguido. Previamente se intentó realizar esta clasificación mediante el Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) de QGIS, pero no se obtuvieron firmas espectrales de suficiente calidad para que la clasificación fuera adecuada, posiblemente porque la ortofoto del vuelo americano de 1956-1957 solo dispone de una banda. En el Anejo B, se expone con más detalle la correspondencia entre la

clasificación de cubiertas del mapa de “Cobertes del sòl (1956)” de la DIBA y la reclasificación expuesta en la Tabla 3-2.



Nota: Los trapecios se corresponden con inputs u outputs, mientras que los rectángulos identifican procesos. Los rombos indican decisiones.

Figura 3-3 Flujo de trabajo para obtener el raster de cubiertas de 1956-1957 para todo el entorno de la cuenca de estudio.

Una vez creado el modelo, para que éste tenga en cuenta que los usos del suelo han ido variando a lo largo del tiempo, se utilizó la herramienta “Landuse Update Tool for SWAT” (SWAT-LUT) [60][61] para introducir estas variaciones en la base de datos. Con ella, se le asignó una fecha a la capa de usos del suelo que se implementó para configurar el modelo SWAT (capa del año 1987), y se implementaron, asignándoles también una fecha y la manera de estimar la variación entre capas de usos del suelo, 5 capas adicionales (SWAT-LUT solo admite añadir 5 capas adicionales). Se introdujeron las capas de los años 1992, 1997, 2002, 2007 y 2017, ya que cubrían el máximo de periodo hasta la actualidad (siendo la del año 2017 la última capa de usos del suelo disponible), pero dándole prioridad al periodo 1976-1999 en el que se enmarca el periodo de calibración y el periodo de validación y sus correspondientes periodos de calentamiento utilizados en este estudio como se verá en el [apartado 3.1.3.3](#). En el momento en el que se realizó este paso no se disponía de la capa de cubiertas del año 1956 para toda la cuenca de estudio. Se asignó a cada capa de usos del suelo implementada una fecha correspondiente al año de denominación de la capa, el mes 12 y el día 31, así como una variación gradual anual (“Yearly”) entre cada una de las capas, ya que solo se dispone de información sobre el año (y de manera orientativa,  $\pm 2$  años en

realidad) en cuanto a la fecha de los usos y cubiertas del suelo que definen las capas rasters, no siendo suficiente información de la fecha de partida u llegada para poder establecer una variación gradual mensual (“Monthly”) correcta, pero tampoco considerando adecuado establecer una variación de manera abrupta al llegar a la fecha del siguiente raster de usos del suelo (“Abrupt”), ya que difícilmente sería reflejo de la realidad. En el Anejo A se muestra con más detalle de qué manera se implementan estas variaciones de usos del suelo en el modelo SWAT mediante la herramienta SWAT-LUT.

Tabla 3-2 Equivalencias consideradas entre las diferentes clasificaciones de cubiertas y usos del suelo y “global\_landuses”, utilizado por el modelo SWAT.

Reclasificación Cobertes 1956		Clasificación ussol 1987-2002 [57]		Clasificación ussol 2007-2017 [57]		Clasificación global_landuses table [56]				Clasificación simplificada
Description	ID	Description	ID	Description	ID	Abbreviation	Description	ID	SWAT type	
Aigües continentals	1	Aigües continentals	1	Aigües continentals	1	WATB	Water Bodies	16	Water	Agua y humedales
Aigües marines	2	Aigües marines	2	Aigües marines	2	WATB	Water Bodies	16	Water	Agua y humedales
Congestes	3	Congestes	3	Congestes	3	ICES	Snow or Ice	24	Water	Agua y humedales
Infraestructures viàries	4	Infraestructures viàries	4	Infraestructures viàries	4	URMD	Urban and Built-Up Land	1	Residential Medium density	Zonas urbanizadas e infraestructuras
Urbanitzacions	5	Urbanitzacions	5	Urbanitzacions	5	URMD	Urban and Built-Up Land	1	Residential Medium density	Zonas urbanizadas e infraestructuras
Nuclis urbans / Zones urbanes	6	Nuclis urbans	6	Nuclis urbans / Zones urbanes	6	URMD	Urban and Built-Up Land	1	Residential Medium density	Zonas urbanizadas e infraestructuras
Zones industrials i comercials	7	Zones industrials i comercials	7	Zones industrials i comercials	7	URMD	Urban and Built-Up Land	1	Residential Medium density	Zonas urbanizadas e infraestructuras
Conreus herbacis (no arrossars)	8	Conreus herbacis de secà	8	Conreus herbacis de secà	8	CRDY	Dryland Cropland and Pasture	2	Average (Agricultural Land-generic and Pasture)	Cultivos
		Conreus herbacis de regadiu	9	Conreus herbacis de regadiu (no arrossars)	9	CRIR	Irrigated Cropland and Pasture	3	Average (Agricultural Land-generic and Pasture)	Cultivos
Conreus llenyosos (no vinyes)	10	Fruïters de secà	10	Fruïters de secà	10	CRWO	Cropland / Woodland Mosaic	6	Average (Agricultural Land-generic and Forest-Mixed)	Cultivos
		Fruïters de regadiu	11	Fruïters de regadiu	11	CRWO	Cropland / Woodland Mosaic	6	Average (Agricultural Land-generic and Forest-Mixed)	Cultivos
Vinyes	12	Vinyes	12	Vinyes	12	CRWO	Cropland / Woodland Mosaic	6	Average (Agricultural Land-generic and Forest-Mixed)	Cultivos
Prats supraforestals	13	Prats supraforestals	13	Prats supraforestals	13	TUHB	Herbaceous Tundra	20	Altai Wildrye	Prados y matorrales
Matollars	14	Bosquines i prats	14	Matollars	14	MIGS	Mixed Grassland / Shrubland	9	Average (Range-Grasses and Range-Brush)	Prados y matorrales
Prats de terra mitjana	15			Prats de terra mitjana	15	MIGS	Mixed Grassland / Shrubland	9	Average (Range-Grasses and Range-Brush)	Prados y matorrales
Prats de terra baixa	16			Prats de terra baixa	16	MIGS	Mixed Grassland / Shrubland	9	Average (Range-Grasses and Range-Brush)	Prados y matorrales
Boscos	18	Boscos d'esclerofíl·les	15	Boscos d'esclerofíl·les	17	FOEB	Evergreen Broadleaf Forest	13	Forest-Evergreen	Bosques
		Boscos de caducifolis	16	Boscos de caducifolis	18	FODB	Deciduous Broadleaf Forest	11	Forest-Deciduous	Bosques
		Boscos d'aciculifolis	17	Boscos d'aciculifolis	19	FOEN	Evergreen Needleleaf Forest	14	Forest-Evergreen	Bosques
Vegetació de zones humides	20	Vegetació de zones humides	18	Vegetació de zones humides	20	WEHB	Herbaceous Wetland	17	Wetlands-Mixed	Agua y humedales
Sòls / Zones amb vegetació escassa o nul·la	21	Sòls amb vegetació escassa o nul·la	19	Sòls / Zones amb vegetació escassa o nul·la	21	BSVG	Barren or Sparsely Vegetated	19	Southwestern United States (arid) Range	Zonas con vegetación escasa o nula
Zones cremades	22	Zones cremades	20	Zones cremades	22	BSVG	Barren or Sparsely Vegetated	19	Southwestern United States (arid) Range	Zonas con vegetación escasa o nula
Sorrals i platges	23	Sorrals i platges	21	Sorrals i platges	23	BSVG	Barren or Sparsely Vegetated	19	Southwestern United States (arid) Range	Zonas con vegetación escasa o nula

<sup>8020</sup>Los colores quieren mostrar más visualmente algunas posibles agrupaciones entre clasificaciones.

#### 3.1.2.1.4 Edafología – Mapa de suelos (“soil map”)

Se necesita introducir información de los suelos en formato TIF, tratándose de un ráster con valor de píxel igual al código numérico del tipo de suelo correspondiente a su localización. SWAT necesita conocer el grupo hidráulico del suelo (A, B, C o D), la máxima profundidad que alcanzan las raíces en el perfil de suelo (mm), la profundidad de la capa de suelo desde la superficie a su base (mm), la densidad aparente húmeda de la capa de suelo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), el agua útil que puede albergar la capa de suelo ( $\text{mm H}_2\text{O}/\text{mm}$  suelo, incluyendo la fracción gruesa), la conductividad hidráulica saturada de la capa de suelo ( $\text{mm}/\text{hora}$ ), el contenido de carbono orgánico de la capa de suelo (% masa de suelo), los contenidos de arcilla, limo y arena de la capa de suelo (% masa de suelo), el contenido de fracción gruesa de la capa de suelo (% masa de suelo), así como el albedo de suelo húmedo y el factor K de erodibilidad del suelo de la “Universal Soil Loss Equation” (USLE) para la capa superficial de suelo [62]. Se puede crear una tabla de suelos (“Soil table”) con estos datos [62], o se pueden utilizar tablas preestablecidas con tipos de suelo caracterizados y codificados, como la tabla “global\_soils”, localizada en la base de datos QSWATProj2012.mdb del modelo SWAT, y reclasificar el mapa de suelos a la codificación correspondiente a su suelo equivalente más próximo presente en la tabla preestablecida utilizada. La tabla “global\_soils” le da un valor numérico a las Soil Mapping Units (SMU) de la FAO [63]. Dada la escasa información disponible sobre suelos más allá de su tipología, se ha optado por la opción de buscar los equivalentes más próximos en las tipologías presentes en la tabla “global\_soils”.

Inicialmente, se consultaron los mapas e información de suelos (Harmonized World Soil Database (HWSD v.1.2.1, FAO - International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)) [64] [65] [66], “International Soil Reference and Information Centre” (ISRIC) World Soil Information [67], SoilGrids.org [68], Mapa Mundial de Suelos de la FAO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) [69] [66] [70], Digital Soil Map of the World (FAO) [71] [72] [66], Cartografia d’unitats edafològiques de Catalunya a escala 1:250.000: Berguedà i Garrotxa (ICGC) [73], diferentes versiones de Mapas de Suelos de España (Instituto Geográfico Nacional (IGN), ICGC) [74] [75], y otros mapas de suelos en Joint Research Centre (JRC) [76] [77] [78], Europe/Asia Soil Maps de SWAT Global Data (antes Waterbase.org) [79], etc.). A continuación se creó un mapa de suelos con la codificación de la tabla “global\_soils” de SWAT a partir de los equivalentes de las Soil Mapping Units (SMU) de la FAO [63] más cercanos, modificando la capa vectorial de la Cartografia d’unitats edafològiques de Catalunya a escala 1:250.000: Berguedà i Garrotxa (ICGC)

[73], al no cubrir esta toda la cuenca de estudio, y rasterizándola con una resolución espacial de 30 m x 30 m y una alineación de píxeles igual a la de los mapas de usos del suelo utilizados.

Posteriormente, en el invierno de 2018-2019, el ICGC publicó un mapa de suelos de Catalunya a escala 1:250.000 en wms, aunque se le retiró el acceso público en la primavera del 2019 a la espera de la presentación oficial del nuevo Mapa de Sòls de Catalunya 1:250.000 (20 de septiembre de 2019) [80]. Aprovechando el periodo en el que el acceso a este wms era posible, se realizó una captura de pantalla con la mayor resolución posible, esta imagen se georreferenció y se vectorizó modificando la capa vectorial del mapa de suelos creado con anterioridad. Mediante la comparación con los mapas citados anteriormente, se estimaron las equivalencias entre tipologías de suelo (ver Tabla 3-3) y se introdujo el "SOIL\_ID" correspondiente de la tabla "global\_soils" en la base de datos de la capa vectorial, y finalmente, se rasterizó de igual manera a la realizada con el mapa de suelos creado anteriormente.

Tabla 3-3 Equivalencia entre clasificaciones de suelo para las diferentes tipologías presentes en la cuenca de estudio según los mapas de suelo obtenidos antes de la publicación del Mapa de Sòls de Catalunya 1:250.000.

Valor del wms del Mapa de sòls 1:250.000 2018-2019 del ICGC [80]	Código Soil Taxonomy de la USDA (ST) [68] [78]	Código World Reference Base for soil resources de la FAO/UNESCO (WRB) [68] [78]	SWAT global_soil table ID [63] [71] [72] [66] [79] [70]	SWAT global_soil table Description [63] [71] [72] [66] [79] [70]	Valor Harmonized World Soil Database de la FAO-IIASA (HWSO) [64] [65] [66]	Valor Mapa Mundial de Suelos de la FAO/UNESCO ("w001001") [69] [77] [66]	Código Mapa de sòls 1:250.000 del ICGC, 1ª edición de la versión Soil Taxonomy en papel [80]	Descripción Mapa de sòls 1:250.000 del ICGC, 1ª edición de la versión Soil Taxonomy en papel [80]		
255	U12a	G05b	3024	Bh25-2bc	9739	20	s11p	Udorthents lítics	Humudepts lítics	sobre pissarres i esquists
255	U13d	G10d	6498	E25-2/3ab	9700	45	s12a	Udorthents lítics	Hapludolls lítics	sobre gresos i lutites
237	U13b	G10b	6684	I-Bk-E-c	9702	15	s12a	Udorthents lítics	Hapludolls lítics	sobre gresos i lutites
181	U11a	G04a	6532	I-U-1/2c	9697	61	s12k	Udorthents lítics	Hapludolls lítics	sobre calcàries
255	U13d	G10d	6498	E25-2/3ab	9700	45	s12a, s12q	Udorthents lítics	Hapludolls lítics	sobre conglomerats
237	U13b	G10b	6684	I-Bk-E-c	9702	15	s12q, s11v	Udorthents lítics	Hapludolls lítics	sobre roques plurilítics amb predomini de calcàries
237	U13b	G10b	6684	I-Bk-E-c	9702	15	s12q, s11v	Udorthents lítics	Hapludolls lítics	sobre roques plurilítics amb predomini de calcàries
34	U11b	G04b	6532	I-U-1/2c	9697	61	s13a	Udorthents lítics	Udorthents típics	sobre gresos i lutites
237	U13b	G10b	6684	I-Bk-E-c	9702	15	s13k	Udorthents típics	Udorthents típics	sobre calcàries
237	U13b	G10b	6684	I-Bk-E-c	9702	15	s13q	Udorthents lítics	Udorthents típics	sobre roques plurilítics amb predomini de calcàries
0	U11c	G04c	6532	I-U-1/2c	9697	61	s13q	Udorthents lítics	Udorthents típics	sobre roques plurilítics amb predomini de calcàries
255	U13d	G10d	6498	E25-2/3ab	9700	45	s13q	Udorthents lítics	Udorthents típics	sobre roques plurilítics amb predomini de calcàries
255	U12a	G05b	3024	Bh25-2bc	9739	20	s13q, s11v, s21a	Udorthents lítics	Udorthents típics	sobre roques plurilítics amb predomini de calcàries
112	U22c	G04c	6468	Bk45-2bc	9700	45	s21o	Ustorthents lítics	Haplustolls lítics	sobre conglomerats
0	U22a	G04a	6468	Bk45-2bc	9700	45	s21o	Ustorthents lítics	Haplustolls lítics	sobre conglomerats
153	U21c	G04c	1118	Bk14-2c	9710	52	s21o	Ustorthents lítics	Haplustolls lítics	sobre conglomerats
0	U22a	G04a	6468	Bk45-2bc	9700	45	s21q	Ustorthents lítics	Haplustolls lítics	sobre roques plurilítics amb predomini de calcàries
153	U21c	G04c	1118	Bk14-2c	9710	52	s22a	Ustorthents lítics	Haplustepts càlcics	sobre gresos i lutites
0	U22a	G04a	6468	Bk45-2bc	9700	45	s22q, s32, s22a	Ustorthents lítics	Haplustepts càlcics	sobre roques plurilítics amb predomini de calcàries
136	U23	G36	1118	Bk14-2c	9710	52	s26a	Ustorthents típics	Haplustepts càlcics	sobre gresos i lutites
63	U21d	G04c	1118	Bk14-2c	9710	52	s26a	Ustorthents típics	Haplustepts càlcics	sobre gresos i lutites
0	U11c	G04c	6532	I-U-1/2c	9697	61	s2k	Cryorthents lítics	Haplocryolls lítics	sobre calcàries
0	U11c	G04c	6532	I-U-1/2c	9697	61	s2k	Cryorthents lítics	Haplocryolls lítics	sobre calcàries
0	U11c	G04c	6532	I-U-1/2c	9697	61	s2k	Cryorthents lítics	Haplocryolls lítics	sobre calcàries
181	U11a	G04a	6532	I-U-1/2c	9697	61	s2k	Cryorthents lítics	Haplocryolls lítics	sobre calcàries
0	U11c	G04c	6532	I-U-1/2c	9697	61	s2k	Cryorthents lítics	Haplocryolls lítics	sobre calcàries
34	U11b	G04b	6532	I-U-1/2c	9697	61	s2q	Cryorthents lítics	Haplocryolls lítics	sobre roques plurilítics amb predomini de calcàries

<sup>Nota:</sup> Los colores quieren mostrar más visualmente algunas posibles agrupaciones entre clasificaciones. En negrita se han marcado los valores de la tabla global\_soil de SWAT, una de las codificaciones predeterminadas de SWAT. El significado de los diferentes acrónimos en los encabezados de la tabla es ICGC (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya), USDA (United States Department of Agriculture), FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) e IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis).



Pasado un tiempo de la presentación oficial del Mapa de Sòls de Catalunya 1:250.000 (MSC250M) se dio acceso no solo a su versión en papel, Geopdf y wms, con los que se había ido actuando de igual manera que con el mapa en wms publicado en el invierno 2018-2019 (con un escaneado previo en el caso del mapa en papel), sino también a los archivos Shapefile de su versión según la clasificación Soil Taxonomy (ST) [81] [82] y de su versión según la clasificación World Reference Base for Soil Resources (WRB) [83] [84]. Estos archivos Shapefile se unieron (mediante la herramienta “union” de QGIS) para captar cualquier diferencia geométrica entre clasificaciones y se crearon clases con el código de las dos clasificaciones. A continuación, se seleccionaron por localización todas las clases combinadas localizadas en el ámbito de la cuenca de estudio y de su entorno próximo (un buffer de 2,5 km) y se extendió la selección al resto de polígonos del MSC250M con las mismas tipologías de suelos según WRB, extrayendo los datos en un nuevo Shapefile. Se comparó la localización de estas clases con las del Europe/Asia Soil Maps de SWAT Global Data (antes Waterbase.org) [79] y especialmente con las del Mapa Mundial de Suelos de la FAO-UNESCO [69] [66] [70], en los cuales se clasifican los suelos siguiendo WRB también (misma descripción) pero codificándolos de igual manera que la tabla “global\_soils” (en la columna “SNAM”) de la base de datos de SWAT. Aunque el nivel de detalle del MSC250M es mucho mayor, se obtuvo la codificación de algunas de las clases más extensas según la tabla “global\_soils” y además, con la ayuda de la leyenda del Mapa Mundial de Suelos de la FAO-UNESCO [69] [66] [70], se vislumbró el patrón de la codificación con letras y números utilizada por la tabla “global\_soils”, lo que permitió conocer las letras de la codificación. Mediante el conjunto de características que se expone de cada tipología de suelo de la tabla “global\_soils” en la tabla “usersoil” de la base de datos QSWATRef2012.mdb del proyecto de SWAT, se estimó la equivalencia de las tipologías de suelo restantes del MSC250M (ver Tabla 3-4), introduciendo el “SOIL\_ID” correspondiente de la tabla “global\_soils” en la base de datos de la capa vectorial, y finalmente, ésta se rasterizó de igual manera a la realizada con los mapas de suelos creados anteriormente.

Tabla 3-4 Equivalencia entre las clases de suelo en la cuenca de estudio según el Mapa de Sòls de Catalunya 1:250.000 (ICGC, 2019) y las clases de suelo de la tabla "global\_soils" de SWAT.

MSC250M según Soil Taxonomy (ST) [82]			MSC250M según World Reference Base for soil resources (WRB) [84]			Códigos MSC250M combinados		SWAT "global_soils" table	
Código	Descripción	Código	Descripción	Código	Descripción	SOIL_ID	SNAM		
S21K	Ustorthent lític i Haplustoll lític	W05K	Calcaric Leptosol i Skeletic Leptic Rendzic Phaeozem	S21K_W05K		5203		I-E-c	
S21O	Ustorthent lític i Haplustoll lític	W05O	Calcaric Leptosol i Skeletic Leptic Rendzic Phaeozem	S21O_W05O		5203		I-E-c	
S21Q	Ustorthent lític i Haplustoll lític	W05Q	Calcaric Leptosol i Skeletic Leptic Rendzic Phaeozem	S21Q_W05Q		5203		I-E-c	
S12K	Udorthent lític i Hapludoll lític	W06K	Eutric Leptosol i Skeletic Leptic Rendzic Phaeozem	S12K_W06K		6498		E25-2/3ab	
S02K	Cryorthent lític i Haplocryoll lític	W06K	Eutric Leptosol i Skeletic Leptic Rendzic Phaeozem	S02K_W06K		5201		I-E	
S12O	Udorthent lític i Hapludoll lític	W06O	Eutric Leptosol i Skeletic Leptic Rendzic Phaeozem	S12O_W06O		6499		E26-2/3ab	
S12Q	Udorthent lític i Hapludoll lític	W06Q	Eutric Leptosol i Skeletic Leptic Rendzic Phaeozem	S12Q_W06Q		6500		E26-2/3ab	
S02Q	Cryorthent lític i Haplocryoll lític	W06Q	Eutric Leptosol i Skeletic Leptic Rendzic Phaeozem	S02Q_W06Q		5201		I-E	
S21A	Ustorthent lític i Haplustoll lític	W07A	Eutric Leptosol i Skeletic Leptic Phaeozem	S21A_W07A		6530		I-L-2-3bc	
S12A	Udorthent lític i Hapludoll lític	W07A	Eutric Leptosol i Skeletic Leptic Phaeozem	S12A_W07A		6530		I-L-2-3bc	
S11P	Udorthent lític i Humudept lític	W08P	Dystric Leptosol i Skeletic Leptic Umbrisol	S11P_W08P		6532		I-U-1/2c	
S11V	Udorthent lític i Humudept lític	W08V	Dystric Leptosol i Skeletic Leptic Umbrisol	S11V_W08V		6532		I-U-1/2c	
S22A	Ustorthent lític i Haplustept calcic	W13A	Calcaric Leptosol i Calcaric Skeletic Leptic Cambisol (Protocalcic)	S22A_W13A		3026		Bk45-2bc	
S22Q	Ustorthent lític i Haplustept calcic	W13Q	Calcaric Leptosol i Calcaric Skeletic Leptic Cambisol (Protocalcic)	S22Q_W13Q		6468		Bk45-2bc	
S13A	Udorthent lític i Udorthent típic	W19A	Eutric Leptosol i Eutric Skeletic Leptic Regosol	S13A_W19A		6309		Re77-2bc	
S13K	Udorthent lític i Udorthent típic	W19K	Eutric Leptosol i Eutric Skeletic Leptic Regosol	S13K_W19K		6310		Re78-2bc	
S13Q	Udorthent lític i Udorthent típic	W19Q	Eutric Leptosol i Eutric Skeletic Leptic Regosol	S13Q_W19Q		6311		Re79-3bc	
S14P	Humudept lític i Eutrudept fluventic	W25P	Skeletic Leptic Umbrisol i Eutric Fluvic Cambisol	S14P_W25P		1235		I-Bf-bc	
S32	Ustifluent oxiàquic i Haplustoll fluventic	W40	Calcaric Fluvisol (Oxyaquic) i Skeletic Fluvic Phaeozem	S32_W40		3140		Jc49-1-3a	
S16	Udifluent oxiàquic i Hapludoll fluventic	W41	Eutric Skeletic Fluvisol (Oxyaquic) i Skeletic Fluvic Phaeozem	S16_W41		1359		Je1	
S26A	Ustorthent típic i Haplustept calcic	W52A	Calcaric Leptic Regosol i Calcaric Leptic Cambisol (Protocalcic)	S26A_W52A		1118		Bk14-2c	

<sup>82</sup>MSC250M se refiere al "Mapa de Sòls de Catalunya 1:250.000" del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (2019).

### 3.1.2.1.5 Clases de pendientes y bandas de elevación

Para caracterizar mejor el comportamiento hidrológico se decidió realizar una diferenciación adicional por clases de pendientes. El número de clases de pendiente aumenta el número de HRUs obtenido y, por lo tanto, también aumenta el coste computacional. Por ello, se buscó la máxima representatividad con el mínimo número de clases. Ver Tabla 3-5.

Tabla 3-5 Clasificación de pendientes.

GUIDELINES FOR SOIL DESCRIPTION (FAO) [85]			Global Agro-ecological Zones (IIASA-FAO) [86]		CORINE Soil Erosion Risk Assessment and Soil Evaluation (CORINE-CEC) [87] [88]			Clasificación de pendientes escogida	
Class	Description	Slope rank (%)	Class	Slope rank (%)	Class	Description	Slope rank (%)	Class	Slope rank (%)
1	Flat	0-0.2	1	0-0.5	1	De muy suave a llano	0-5.0	1	0-5.0
2	Level	0.2-0.5							
3	Nearly level	0.5-1.0							
4	Very gently sloping	1.0-2.0							
5	Gently sloping	2.0-5.0	3	2.0-5.0	2	Suave	5.0-15.0	2	5.0-15.0
6	Sloping	5.0-10.0	4	5.0-8.0					
7	Strongly sloping	10.0-15.0	5	8.0-16.0	3	Pendiente	15.0-30.0	3	15.0-30.0
8	Moderately steep	15.0-30.0	6	16.0-30.0					
9	Steep	30.0-60.0	7	30.0-45.0					
10	Very steep	> 60.0	8	> 45.0	4	Muy pendiente	> 30.0	4	30.0-60.0
					5		> 60.0	5	> 60.0

<sup>85</sup>En color rosa se marca la clasificación implementada en la configuración del modelo SWAT para la cuenca de estudio. El significado de los diferentes acrónimos en los encabezados de la tabla es FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis), CORINE (Coordination of the Information on the Environment) y CEC (Council of the European Union).

Dado que se trata de una cuenca de montaña, habiendo subcuencas en las que la amplitud altitudinal supera los 1000 m (ver Anejo B), y teniendo en cuenta que SWAT asigna los valores climáticos de la estación más cercana al centroide de la subcuenca para toda la subcuenca, se decidió implementar 10 bandas de elevación para representar mejor los fenómenos influenciados por la variación climática altitudinal (innivación, heladas, deshielo, evapotranspiración, etc.) [89]. En el Anejo B, se muestran las bandas de elevación que se definieron para cada subcuenca en la tabla "ElevationBand" de la base de datos "nombre del proyecto SWAT".mdb del proyecto SWAT.

### 3.1.2.2. Inputs necesarios para correr el modelo SWAT (datos climáticos)

Para una correcta estimación de los caudales mensuales, además de los datos de precipitación diaria, al menos, y la ubicación de las estaciones meteorológicas a las que corresponden, al utilizar el método Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración, el modelo SWAT necesita al menos información diaria de las temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa media, radiación solar media y velocidad del viento media, así como, de nuevo, la ubicación de las estaciones meteorológicas a las que corresponden [90]. En el Anejo B se muestra la estructura de los archivos en los que se introduce la información diaria de estas variables meteorológicas en SWAT. Si no hubiera datos diarios de alguna de estas variables durante algún periodo, SWAT puede simular sus valores mediante la herramienta Weather Generator (WGEN) a partir de bases de datos de tiempo mensual (“Monthly Weather Database”), también conocidas como “tablas WGEN”. Estas tablas se crean y cumplimentan en la base de datos QSWATRef2012.mdb del proyecto. En el Anejo B se muestran en detalle las variables climáticas y sus valores cumplimentados en la tabla WGEN, junto a las fórmulas y consultas en “Structured Query Language” (SQL) utilizadas para su cálculo.

Para cumplimentar la información meteorológica, inicialmente solo se tenía acceso a una rejilla regular de 0,1º (longitud) por 0,1º (latitud) (~8,25 km x ~11,1 km) de datos meteorológicos diarios de precipitación y de temperatura máxima, mínima y media desde el 01/01/1950 al 31/12/2015 generada por la Universidad de Cantabria (UC) y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para toda España (Spain02\_v5) [91] [92] [93] [94] [95] [96], lo que solo permitía a priori estimar la evapotranspiración mediante el método Hargreaves. La información de esta rejilla de datos meteorológicos se encuentra en 9 archivos, 4 de datos diarios (“DD”) de precipitación (“pr”, mm), temperatura media (“tas”, °C), temperatura máxima (“tasmax”, °C) y temperatura mínima (“tasmin”, °C), y la versión mensual de estos de datos (“MM”), y otro archivo con la cota de cada punto de la rejilla (“orog”, msnm). Los archivos tienen formato “Network Common Data Form” (NetCDF), por lo que para extraerlos se utilizó el programa Netcdf-Extractor (v2.1) [97]. En el Anejo B se explica con más detalle cómo se extrajeron los datos.

Posteriormente, en 2020, desde el Laboratori Forestal Català (CREAF-CTFC) [98] se desarrolló y se dio acceso a la herramienta “Meteoland App” [99] [100] en la que se pueden obtener datos diarios interpolados de las estaciones meteorológicas del AEMET y del Servei Meteorològic de

Catalunya (SMC) desde el 1 de enero de 1976 hasta la actualidad para polígonos (resolución espacial de 1 km) o puntos (resolución espacial de 30 m) ubicados en Cataluña. Los datos interpolados para puntos concretos se descargan en un archivo Geopackage, lo que permite trabajar con los datos fácilmente mediante consultas SQL en el mismo QGIS. Las variables meteorológicas que se obtienen son la temperatura media (°C), la temperatura mínima (°C), la temperatura máxima (°C), la amplitud térmica (°C), la humedad relativa media (%), la humedad relativa mínima (%), la humedad relativa máxima (%), la precipitación (mm), la radiación (MJ/m<sup>2</sup>), la velocidad del viento (m/s) y la evapotranspiración potencial (mm), lo que cubre todas las variables que se pueden introducir como input en SWAT a excepción de la máxima precipitación de 30 minutos, la cual se estimó a partir de los datos de precipitación y las fórmulas de Salas [101], ver Anejo B. De esta manera, al disponer de todos los datos necesarios, se puede estimar la evapotranspiración mediante Penman-Monteith, que es el método recomendado por la FAO por su precisión y comportamiento consistente tanto en climas áridos como húmedos [102].

Para el periodo 1976-actualidad, se interpolaron los datos para los centroides de las subcuencas definidas por SWAT mediante la herramienta Meteoland App, mientras que para el periodo 1950-1975 se crearon estaciones virtuales en los centroides de las subcuencas en función de la proporción de la subcuenca que ocupa el área de influencia de cada punto de la rejilla de Spain02\_v5. Estas áreas de influencia se estimaron mediante una aproximación de costes acumulados en función de los datos topográficos a través de la herramienta r.cost de QGIS, para tener en cuenta la orografía. Aún así, para el cálculo de las normales climáticas a implementar en la tabla WGEN, dado que no interesa solo el valor de cada variable meteorológica sino también la relación entre los valores de las diferentes variables, se descartaron los datos anteriores a 1976 dado que, como se ha visto, no se dispone de información de todas las variables hasta 1976. Aún así, la extensión de la serie de datos meteorológicos, del 1976 al 2021, con 46 años de datos continuos, es suficientemente larga como para considerar que los valores medios pueden tener una representatividad significativa del clima de la cuenca, ya que supera en gran medida, no solo el valor mínimo de 20 años que se recomienda en la documentación técnica de SWAT [90], sino también el periodo normalizado de 30 años definido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) [103] [104]. Esto puede ser interesante para variables como la precipitación para alcanzar la estabilidad estadística, aunque podría ser un inconveniente en climas cambiantes, en los que podría ser recomendable utilizar una serie más corta y próxima al periodo de estudio [103] [104].

En el Anejo B se muestra con más detalle cómo se puede verificar si la longitud de la serie de datos meteorológicos es suficientemente extensa para obtener un valor climático de cierta variable, la evaluación de la calidad de las series de datos meteorológicos [105] [106] y la determinación de si el clima es cambiante y no se pueden utilizar series tan largas [107].

### **3.1.3. Calibración y validación del modelo**

La calibración es el proceso en el que se ajustan los parámetros del modelo para que los valores simulados por éste sean lo más similares posible a los valores observados bajo las mismas condiciones y así asegurar que el modelo reproduce razonablemente lo que ocurre en la cuenca de estudio [108] [109] [110] [111]. Para asegurar que esta calibración no solo es válida para el propio periodo de calibración y así poder utilizar el modelo para simular otros periodos (incluyendo escenarios futuros), se necesita una validación del modelo una vez calibrado, en la que se verifica que los valores simulados se asemejan de manera razonable a los valores observados durante un periodo diferente al periodo de calibración [108] [109] [112]. El concepto de “asemejarse de manera razonable” varía según el propósito para el que se utilice el modelo [109] [113] y, según la United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) [114], se debe definir previamente el criterio para que pueda ser validado y aceptado o se rechace [109]. En este estudio, en el que se quiere utilizar el modelo para simular caudales de salida mensuales de la cuenca de estudio, se han seguido los criterios de evaluación del comportamiento del modelo (“Performance Evaluation Criteria” o “PEC”) definidos en el [apartado 3.1.3.1](#) (Tabla 3-6). Aspirando a una valoración mínima de “Bueno” del comportamiento del modelo en el periodo de calibración, y aceptando la calibración cuando la peor valoración del comportamiento del modelo en el periodo de validación según los diferentes criterios sea “Satisfactorio”.

#### **3.1.3.1. Criterios de valoración del comportamiento del modelo**

Se han utilizado los criterios de evaluación del comportamiento del modelo (“PEC”) definidos por Moriasi *et al.* [108] [109] para el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ), el coeficiente “Nash-Sutcliffe Efficiency” (NSE), el “Percent Bias” (PBIAS) y el “Ratio of Standard Deviation of Observation to Root Mean Square Error” (RSR) (ver Tablas 3-6 y 3-7), estadísticos que proporciona SWAT-CUP, el programa utilizado para realizar la calibración como se verá en [apartado 3.1.3.4](#), y que pueden ser configurados en éste como función objetivo. Que SWAT-CUP proporcione los valores para la

mejor simulación de cada iteración, facilita las valoraciones del comportamiento de éstas. Además, al poder ser implementados como función objetivo en SWAT-CUP, se puede configurar la calibración para buscar en cada iteración la mejora específica de uno (en la versión gratuita) o de varios de ellos (en la versión de pago). Por no cumplir estas 2 características, y por estar recomendado para una escala a nivel de parcela y no a nivel de cuenca según Moriasi *et al.* [108], el “Index of Agreement” (d) solo se utilizó al final del proceso de validación a modo informativo sobre el comportamiento del modelo, pero no como estadístico cuya valoración según el PEC asociado fuera descartante durante el proceso de calibración y el proceso de validación.

Tabla 3-6 Criterios de evaluación del comportamiento del modelo (“PEC”) según diferentes estadísticos.

Estadístico	Escala espacial	Output a evaluar	Escala temporal D (diaria), M (mensual), A (anual)	Model Performance Evaluation Criteria (“PEC”)				Referencia bibliográfica
				Muy bueno	Bueno	Satisfactorio	No satisfactorio	
<b>Coefficient of Determination (<math>R^2</math>)</b>	Cuenca	Caudal	D-M-A	$R^2 > 0.85$	$0.75 < R^2 \leq 0.85$	$0.60 < R^2 \leq 0.75$	$R^2 \leq 0.60$	Moriasi <i>et al.</i> [108]
<b>Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)</b>	Cuenca	Caudal	D-M-A	$NSE > 0.80$	$0.70 < NSE \leq 0.80$	$0.50 < NSE \leq 0.70$	$NSE \leq 0.50$	Moriasi <i>et al.</i> [108]
<b>Percent Bias (PBIAS) (%)</b>	Cuenca	Caudal	D-M-A	$PBIAS < \pm 5$	$\pm 5 \leq PBIAS < \pm 10$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$PBIAS \geq \pm 15$	Moriasi <i>et al.</i> [108]
<b>Index of Agreement (d)</b>	Parcela	Caudal	M	$d > 0.90$	$0.85 < d \leq 0.90$	$0.75 < d \leq 0.85$	$d \leq 0.75$	Moriasi <i>et al.</i> [108]
<b>Ratio of Standard Deviation of Observation to Root Mean Square Error (RSR)</b>	No especificada en [109].	Caudal	M	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$RSR \geq 0.70$	Moriasi <i>et al.</i> [109]

<sup>108,109</sup>En negrita se han marcado los estadísticos cuyo PEC se ha utilizado como descartante en este estudio, así como las características coincidentes (escala espacial, output a evaluar y escala temporal) con las de este estudio.

En el pequeño meta-análisis (recopilación de información publicada en estudios previos [108] [115] [116] [117] [118]) realizado sobre la bibliografía de valoración de modelos (ver Tabla 3-7), se ha observado que los estadísticos más utilizados (NSE,  $R^2$ , PBIAS, Root Mean Square Error (RMS), Coeficiente de Correlación de Pearson (r) y RSR) coinciden prácticamente con los estadísticos para los que Moriasi *et al.* [108] [109] ha definido un PEC (d, NSE, PBIAS,  $R^2$  y RSR). Sin embargo, mucha de esta bibliografía cita a Moriasi *et al.* [108] [109], por lo que se entiende que podría estar influenciada. Aún así, estas citas ayudan a reafirmar la decisión sobre el uso de estos PEC definidos por Moriasi *et al.* [108] [109].

La utilización de varios estadísticos para evaluar el comportamiento del modelo se debe a que cada estadístico describe el ajuste del modelo de una forma concreta. Por ejemplo, de los que se han utilizado en este estudio para valorar el comportamiento del modelo al tener un PEC asociado:

$R^2$ : Evalúa la proporción de la varianza de los datos observados que explica el modelo [109].  $R^2$  no detecta las diferencias aditivas ni proporcionales entre los valores observados y simulados, y es

muy sensible al desacople temporal pero no al de magnitudes [108] [119] [120]. Se recomienda que se muestre acompañado de la pendiente y la intercepción con el eje, más sensibles a los valores altos extremos y a los desacoples de magnitud, para valorar si hay un buen ajuste entre los valores observados y simulados [108] [119].

NSE: Evalúa cómo de bien representa el modelo las tendencias de los datos observados, especialmente para simulaciones de periodos largos, ya que representa bien la adaptación media del modelo a los datos observados. De hecho, según Servat and Dezzetter [121], se trata del estadístico que mejor refleja la adaptación general. Determina la magnitud de la varianza entre los valores observados y simulados (“ruido”) comparada con la varianza observada (“información”) [108] [109] [122]. NSE detecta bien las diferencias aditivas y proporcionales, pero no detecta el desacople temporal entre los valores observados y simulados [108]. No es sensible a valores altos extremos.

PBIAS: Evalúa cómo de bien simula el modelo las magnitudes medias, indicando claramente el mal comportamiento del modelo en caso de producirse, tanto de sobrestimación cómo de subestimación. Sin embargo, si éstas se producen en similar magnitud puede dar como bueno el modelo erróneamente por una compensación de errores [108] [109]. Detecta muy bien las diferencias aditivas y proporcionales entre los datos observados y simulados, pero no detecta el desacople temporal ni de magnitudes de los picos [108]. Se recomienda mostrar PBIAS junto a otros estadísticos y métodos gráficos para evaluar el comportamiento general del modelo [108].

d: Detecta las diferencias aditivas o proporcionales entre los datos observados y simulados, es sensible a los desacoples y valores altos extremos [108] [109] [120].

RSR: Detecta bien las diferencias aditivas y proporcionales entre los valores observados y simulados. Aúna los beneficios de los índices estadísticos de errores y de los índices escalados o normalizados [108] [109].

El hecho de que NSE y PBIAS sean unos estadísticos a los que se les puede incorporar cálculos de incertidumbre según Harmel *et al.* [108] [123] [124] (lo que permite estimar mejor la fiabilidad de las predicciones del modelo como se verá en el [apartado 3.1.3.4](#)), además de tener definidos criterios de valoración por Moriasi *et al.* [108] [109], ser devueltos por SWAT-CUP al realizar una iteración, permitiendo valorar fácilmente su evolución, y fundamentalmente, ser unos de los

estadísticos que permite SWAT-CUP implementar como función objetivo, hizo que se convirtieran en los estadísticos prioritarios para ser utilizados como función objetivo. Ser de los parámetros más utilizados en los estudios consultados en el meta-análisis sobre estadísticos utilizados para valorar modelos hidrológicos (ver Tabla 3-7) reforzó esta idea. También era interesante que se tratara de parámetros de grupos diferentes según Muleta (2012) [125], para que cubrieran diferentes aspectos del comportamiento del modelo si se hubiera tenido que realizar una calibración utilizando 2 funciones objetivo diferentes. De ellos, se eligió como prioritario para definir el tipo de función objetivo en la calibración mediante SWAT-CUP al estadístico NSE, ya que, además de todas las características citadas y de ser el estadístico más utilizado según el meta-análisis realizado (ver Tabla 3-7), es el estadístico configurado por defecto como función objetivo en SWAT-CUP y representa bien la adaptación media del modelo a los datos observados, tratándose del estadístico que mejor refleja la adaptación general según Servat and Dezzetter [121].

Además de los criterios de valoración numéricos citados, se realizaron valoraciones gráficas, para que esta evaluaciones fueran más robustas, ya que aportan información complementaria muy interesante y visual del comportamiento del modelo [108] [126] [127] [128] [129]. Por ello, tanto para la calibración como para la validación, la valoración del comportamiento de las diferentes configuraciones del modelo se realizó:

- numéricamente, mediante:

- la comparación de los valores respecto a los del modelo sin calibrar de los estadísticos descriptivos que proporcionó SWAT-CUP para las diferentes iteraciones sobre la sensibilidad de los parámetros y el comportamiento del modelo, así como de la valoración de éstos en función de los criterios (PEC) de aceptación previamente fijados,
- la comparación de los estadísticos descriptivos básicos (promedio, máximo, mínimo, desviación estándar, coeficiente de variación (CV) y percentiles) de cada serie de caudales (observados y simulados), tal y como recomienda Moriasi *et al.* [108].

- y visualmente, mediante:

- la comparación de los gráficos proporcionados por SWAT-CUP (series temporales de caudales observados y simulados (junto a su incertidumbre); y gráficos de sensibilidad del modelo a la modificación de los diferentes parámetros),
- la comparación de curvas de duración de caudales y distribuciones acumuladas, gráficos de dispersión (con sus respectivas pendientes, intersecciones y  $R^2$ ) y error acumulado realizados mediante MS Excel a partir de las series de caudales.



Tabla 3-7 Estadísticos utilizados en el estudio del comportamiento de modelos hidrológicos

Estadístico	Ecuación	Ideal	Nº de ecuación
G1: criterio de eficiencia basado en la minimización de las desviaciones absolutas; G2: criterio de eficiencia basado en la minimización del cuadrado de las desviaciones; G3: criterio de eficiencia utilizando el logaritmo de los valores observados y simulados; G4: medida de las desviaciones entre valores observados y simulados [125]			
Coefficient of determination multiplied by the slope of the linear regression between simulated and observed values. [130] [131] [132] [133]	bR2	$\begin{cases} Sb > 1 & \frac{R^2}{ b } \\ Sb \leq 1 & R^2 \cdot  b  \end{cases}$	1 (3-2) (3-3)
Coefficient of Persistence [109] [132] [134] [135] [136] [137] [138] [139]	CP ó PME	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_{i+1} - O_i)^2}$	1 (3-4)
*Index of Agreement [108] [109] [123] [124] [132] [137] [138] [140] [125] [141] [119] [120] [142]	d (G2)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m +  S_i - O_m )^2}$	1 (3-5)
Modified Index of Agreement [109] [132] [138] [120] [143]	d1 ó md	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n  S_i - O_i }{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m +  S_i - O_m )}$	1 (3-6)
Baseline-adjusted Index of Agreement [138]	d1'	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m +  S_i - O_m )}$	1 (3-7)
Daily Root-Mean Square [109] [136] [138] [139]	DRMS	$100 \cdot \frac{S_m - O_m}{O_m}$	0 (3-8)
Percent deviation of streamflow volume [109] [144] [145] [137] [146] [147] [148] [149] [150]	Dv	$100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n  S_i - O_i }{\sum_{i=1}^n O_i}$	0 (3-9)
Kling-Gupta Efficiency [130] [132] [148] [151] [152] [153] [154]	KGE (2009)	$1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{DT_S}{DT_O} - 1\right)^2 + \left(\frac{S_m}{O_m} - 1\right)^2}$	1 (3-10)
Kling-Gupta Efficiency [132] [155]	KGE (2012)	$\frac{1}{\sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{DT_S}{DT_O} - 1\right)^2 + \left(\frac{S_m}{O_m} - 1\right)^2}}$	1 (3-11)
Nash-Sutcliffe Efficiency calculated from logarithmic values [108] [125]	LNS (G3)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(S_i + 0.001) - \ln(O_i + 0.001))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(O_i + 0.001) - \ln(O_m))^2}$	1 (3-12)
Nash-Sutcliffe Efficiency with calendar day/month mean calculated from logarithmic values [125]	LNSD (G3)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(S_i + 0.001) - \ln(O_i + 0.001))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(O_i + 0.001) - \ln(O_m))^2}$	1 (3-13)
*Mean Absolute Error [109] [132] [138] [108] [125] [156] [157] [158] [159] [160] [161]	MAE (G1)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  S_i - O_i $	0 (3-14)
Mean Absolute Percentage Error or Absolute Relative Bias [138] [162]	MAPE ó ARB ó MNGE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ S_i - O_i }{O_i}$	0 (3-15)
Mean Error or Mean Bias [130] [132] [160] [162]	ME ó MULT ó MB	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)$	0 (3-16)
Modified Nash-Sutcliffe Efficiency [130] [132] [138] [139] [125] [154]	MNS ó MNSE ó E1 ó E <sub>m</sub> (G1)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n  S_i - O_i }{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)}$	1 (3-17)
Modified Nash-Sutcliffe Efficiency with calendar day/month mean. [138] [125]	MNSD ó E1' (G1)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n  S_i - O_i }{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)}$	1 (3-18)
Mean Square Error [109] [133] [130] [132] [138] [140] [153] [156] [160] [163] [164] [165]	MSE ó SSQ ó Z	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2$	0 (3-19)
Normalized Root Mean Square Error [132] [166]	NRMS(1)	$100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{DT_O}}$	0 (3-20)
Normalized Root Mean Square Error [132] [166]	NRMS(2)	$100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{O_{max} - O_{min}}}$	0 (3-21)
Nash-Sutcliffe Efficiency [108] [109] [123] [124] [132] [137] [138] [139] [140] [125] [141] [119] [120] [142]	NSE ó NSSE ó E ó E2 ó E3 (G2)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2}$	1 (3-22)
Nash-Sutcliffe Efficiency with calendar day/month mean as reference model [144] [125] [180]	NSD (G2)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2}$	1 (3-23)
Percent Bias [108] [109] [123] [124] [132] [137] [138] [139] [140] [125] [141] [119] [120] [142]	PBIAS ó PBIAS (G4)	$100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i}$	0 (3-24)
Percent deviation of streamflow volume [138]	PBIASv2 (G4)	$100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n  S_i - O_i }{\sum_{i=1}^n O_i}$	0 (3-25)
Potential Error [138] [143] [201]	PE	$\sum_{i=1}^n ( O_i - O_m  +  S_i - O_m )^2$	0 (3-26)
Percent Streamflow Volume Error [109] [156]	PVE ó PEP	$100 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{ S_i - O_i }{O_i}$	0 (3-27)
(Pearson's) Correlation Coefficient [108] [109] [132] [138] [119] [120] [125] [157] [158] [160] [162] [163] [176] [182] [185] [199] [201]	r	$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(S_i - S_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (S_i - S_m)^2}}$	1 (3-28)
Spearman's Correlation Coefficient [132] [157] [182] [202]	r.Spearman	$\frac{\sum_{i=1}^n ((O_i - O_m)(S_i - S_m))}{DT_O \cdot DT_S}$	1 (3-29)
Coefficient of Determination [130] [108] [109] [53] [168] [169] [131] [132] [133] [137] [138] [139] [140] [125] [141] [119] [120] [147] [149] [150] [151] [153] [154] [157] [158] [163] [166] [171] [172] [173] [175] [176] [177] [178] [179] [180] [181] [182] [184] [186] [188] [190] [192] [193] [196] [197] [198] [199] [200] [201] [203] [204]	R <sup>2</sup> (G2)	r <sup>2</sup>	1 (3-30)
Relative Index of Agreement [132]	rd	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i - O_i}{O_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \frac{(O_i - O_m +  S_i - O_m )^2}{O_m^2}}$	1 (3-31)
Relative Error [108] [144] [119]	RE	$100 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{ S_i - O_i }{O_i}$	0 (3-32)
*Root Mean Square Error [130] [108] [109] [56] [145] [132] [133] [137] [138] [139] [125] [141] [147] [156] [157] [159] [160] [162] [166] [174] [176] [178] [181] [189] [205] [206]	RMS ó RMSD ó RMSE (G2)	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}$	0 (3-33)
RMSE Percent Error or Relative Bias [138]	RMSEPE ó RB	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i - O_i}{O_i}\right)^2$	0 (3-34)
Relative Nash-Sutcliffe Efficiency [132]	RMSE	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i - O_i}{O_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \frac{(O_i - O_m)^2}{O_m^2}}$	1 (3-35)
Ratio of Standard Deviation of Observation to RMSE [130] [108] [109] [169] [132] [137] [138] [125] [165] [171] [172] [173] [174] [176] [187] [194] [195]	RSR (G2)	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2}}$	0 (3-36)
Relative Volume Error or Normalized Mean Bias [140] [160] [162] [176]	RVE ó NMB	$\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i}$	0 (3-37)
Slope [108] [109] [144] [133] [140] [142] [160] [197] [199]	slope (b)	$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(S_i - S_m)}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2}$	1 (3-38)
Sum of the Squared Residuals [130] [132]	SSQR	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2$	0 (3-39)
Sum of residuals [130]	SUM	$\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)$	0 (3-40)
Theil's coefficient [138]	U	$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n O_i^2 + \sum_{i=1}^n S_i^2}}$	0 (3-41)
Volumetric Efficiency [132] [125] [181]	VE (G1)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n  S_i - O_i }{\sum_{i=1}^n O_i}$	1 (3-42)
y-intersection [108] [109] [144] [133] [140] [142] [160] [199]	y-intersection	$S_m - b \cdot O_m$	0 (3-43)
Chi-squared [130] [157] [207]	CHI2 ó X <sup>2</sup>	$\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{DT_S^2}$	0 (3-44)

Se han coloreado de color naranja-amarillo los estadísticos mencionados por Moriasi et al. [108] y/o [109], siendo los de color naranja los estadísticos para los se define un criterio de valoración del comportamiento (PEC) (ver Tabla 3-6), mientras que con la mayor intensidad de los amarillos se quiere mostrar la importancia que les daba Moriasi et al. [108] y/o [109]. Se han marcado de color verde los estadísticos que pueden configurarse como función objetivo en SWAT-CUP, programa de calibración del modelo SWAT, y en función de los cuales se puede realizar la calibración [130]. Los que tienen un color verde más oscuro, SWAT-CUP devuelve su valor para la mejor simulación de cada iteración, así como para el que está de color gris. Se han marcado con un asterisco (\*) algunos de los estadísticos que pueden incorporar cálculos de incertidumbre según Harmel et al. [108] [123] [124]. Los que tienen la fuente en negrita cumplen tener un PEC asociado y que pueden ser utilizados como función objetivo en SWAT-CUP, así como este devuelve su valor al realizar iteraciones. Los que, además, tienen la fuente de color azul oscuro, además de las tres condiciones anteriores, pueden incorporar cálculos de incertidumbre según Harmel et al. [108] [123] [124] y serían, a priori, los más interesantes para utilizar como función objetivo.

### **3.1.3.2. Inputs necesarios para calibrar y validar el modelo SWAT**

#### **3.1.3.2.1 Caudales observados**

Andreu Manzano, técnico del ACA, facilitó los datos de caudales restituidos a régimen natural (los caudales que se hubieran dado si no hubiera regulación en la cuenca) de las cuencas internas de Cataluña desde el 01/10/1940 al 30/09/2008 (en una base de datos de MS Access, SERIES\_SCIC.accdb). Se advirtió que se tomaran con cierta cautela los datos a partir del 01/10/2000, con un cambio de los autores de la restitución, y especialmente desde el 01/01/2002, fecha a partir de la cual se utilizaron estaciones meteorológicas diferentes respecto a las que se habían utilizado con anterioridad, pasándose a utilizar exclusivamente la red de estaciones meteorológicas del SMC, no teniéndose en cuenta las estaciones de otras redes, con lo que la calidad de la restitución se redujo significativamente. En la Figura 3-4 y la Tabla 3-8 se compara la correlación entre los datos de caudales restituidos y los de precipitación de los que se dispone, y se observa que a partir del año 2000, la relación empeora substancialmente, lo que posiblemente respalda la importancia de los efectos de estas variaciones de autores y fuentes de datos en el procedimiento de restitución que ya se habían comentado desde el ACA, por lo que se decide no utilizar los caudales del año 2000 en adelante.

#### **3.1.3.3. Periodos de calibración y validación**

Para una Calibración-Verificación del tipo “Split-sample test” [208] como la utilizada en este trabajo, se recomienda que se reparta el periodo de datos disponibles en 2 mitades entre calibración y validación si el periodo de calibración resultante es suficientemente largo (10 años o más con datos diarios según Moriasi [108]), o que la validación represente al menos un 30% del periodo y el resto sea destinado a la calibración [208]. En este estudio, se ha tomado 10 años como la longitud mínima tanto del periodo de calibración como del periodo de validación.

En función de los datos de los que se dispone (caudales observados de confianza de 01/10/1940 a 30/09/2000, y modelo digital de elevaciones del terreno a partir de vuelos LiDAR de 2009 y 2010), y teniendo en cuenta que la presa de La Baells se inauguró el 7 de febrero de 1976 [209] [210] [211], se considera que el modelo digital de elevaciones del terreno del que se dispone no refleja adecuadamente la topografía previa a este hecho, y dado que: a) SWAT no considera el año hidrológico (del 1 de Octubre al 30 de Septiembre del año siguiente) sino el año según el

calendario, b) no se desea considerar el primer año con datos del caudalímetro de salida del embalse (con datos a partir del día 06/04/1976 [212]) para asegurar su calibración y c) la búsqueda de la estabilización en la simulación de los fenómenos con inercia del sistema, se determina que el periodo con datos disponibles para calibrar y validar el modelo es del 01/01/1978 al 31/12/1999 (22 años).

Dado que se dispone de un periodo de datos diarios de 22 años, se podría haber dividido el periodo 50%-50% entre calibración y validación cumpliendo el periodo mínimo de 10 años para cada periodo. Sin embargo, teniendo en cuenta la disponibilidad de mapas de usos del suelo en el momento en el que se configuró el modelo (1987, 1992, 1997, 2002, 2007, 2012 y 2017), si se hubiera dividido el periodo disponible por la mitad, los mapas del suelo 1987 y 1997, a priori representantes principales de cada uno de los periodos, no hubieran estado localizados a la misma distancia del inicio del periodo correspondiente, añadiendo variabilidad extra entre la calibración y la validación. Además, observando que el ajuste entre los datos de precipitación y de caudal observados empeora a medida que los años avanzan (ver Figura 3-5 y Tabla 3-8), se decidió utilizar un periodo de calibración de 12 años, desde el 01/01/1988 al 31/12/1999, y un periodo de validación de 10 años, del 01/01/1978 al 31/12/1987, siguiendo cumpliendo ambos periodos la duración mínima de 10 años y que el periodo de calibración sea mayor o igual al periodo de validación. Al utilizar los usos del suelo de 1987, 1992, 1997 y 2002, siendo de nuevo los mapas del suelo 1987 y 1997, representantes principales a priori de cada uno de los periodos, el mapa de usos del suelo de 1987 se localizaba a la misma distancia respecto al inicio del periodo de validación que el mapa de usos del suelo de 1997 del inicio del periodo de calibración, como era deseable. Se verificó antes de dar por buena esta división entre validación y calibración del periodo disponible, que ambos periodos incluyen valores altos y bajos de precipitación y caudal y que, además, lo hacen de una forma similar, yendo de valores bajos a valores altos y volviendo a valores bajos al final (ver Figura 3-6), lo que valida también la decisión de esta división. Además, se observa que los valores medios del periodo de calibración y del periodo de validación se parecen más, así como la relación entre los caudales observados y la precipitación es mejor tanto en el periodo de calibración como de validación cuando éstos van de 1988 a 1999 y de 1978 a 1987 respectivamente, que si fueran de 1989 a 1999 y de 1978 a 1988, respectivamente (ver Figura 3-5 y Tablas 3-8 y 3-9).

Al disponer de datos meteorológicos diarios desde el 01/01/1976, para simular mejor los fenómenos con inercia del sistema, se empezará la simulación el 01/01/1976, por lo que se obtendrá un periodo de calentamiento (periodo en el cual el modelo está ejecutándose y adquiriendo “memoria” hasta que empieza la fase de calibración y/o validación) de 12 años para la calibración y de 2 años para la validación, cumpliendo para ambas la recomendación general de que el periodo de calentamiento se encuentre como mínimo entre el 10 y el 20% del periodo a simular y sea mayor o igual a 2 años [130].

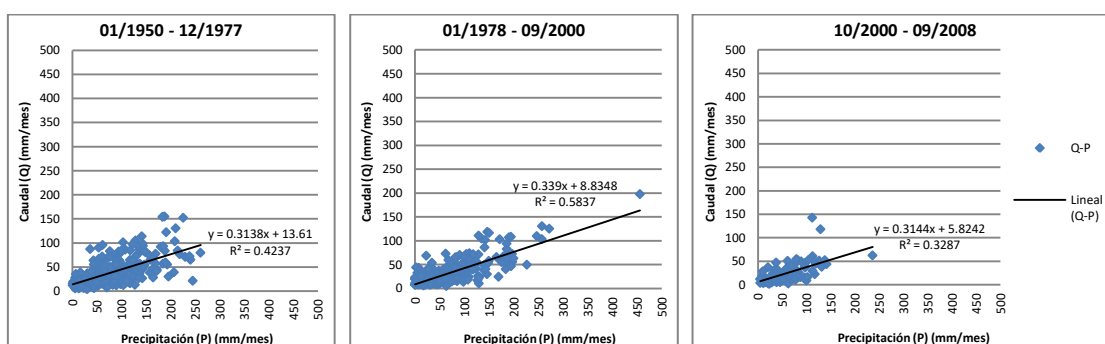


Figura 3-4 Dispersión entre precipitaciones mensuales y caudales mensuales en la cuenca de estudio para los periodos 01/1950-12/1977 (previo a la puesta en marcha del embalse de La Baells o de muy reciente explotación), 01/1978-09/2000 (con La Baells en funcionamiento y datos fiables), 10/2000-09/2008 (con La Baells en funcionamiento pero con datos menos fiables).

Fuente: Caudales restituidos a régimen natural de las cuencas internas (ACA), [91] y [99].

Tabla 3-8 Ajuste entre precipitaciones y caudales en diferentes periodos

Fuente: Caudales restituidos a régimen natural de las cuencas internas (ACA), [91] y [99].

Mes inicial	Mes final	Coefficiente de determinación (R <sup>2</sup> )	Pendiente Caudal-Precipitación	"Caudal base" (mm/mes)	Comentario sobre el periodo	Disponibilidad de datos de Spain02_v5	Disponibilidad de datos de Meteoland app	Embalse de La Baells ya inaugurado	Restitución de caudales por empresa original	Restitución de caudales con estaciones meteorológicas originales
ene-50	dic-75	0.4192	0.314	13.426	P. descartado	x			x	x
ene-76	dic-77	0.4782	0.3018	16.801	P. de Calentamiento	x	x		x	x
ene-78	dic-87	0.6657	0.34	7.3828	P. de Validación definitivo	x	x	x	x	x
ene-88	dic-99	0.5209	0.3393	10.593	P. de Calibración definitivo	x	x	x	x	x
ene-00	sep-08	0.3174	0.3002	6.1895	P. descartado	x	x	x		
ene-76	sep-00	0.5788	0.3382	9.2743		x	x		x	x
mar-76	sep-00	0.5775	0.3379	9.3214		x	x	x	x	x
may-76	sep-00	0.577	0.3381	9.365		x	x	x	x	x
ene-78	sep-00	0.5837	0.339	8.8348		x	x	x	x	x
oct-00	sep-08	0.3287	0.3144	5.8242		x	x	x		
oct-00	dic-01	0.3577	0.2737	8.1725		x	x	x		x
ene-02	sep-08	0.3267	0.3182	5.5819		x	x	x		
ene-78	dic-88	0.6584	0.3337	8.1092	P. de Validación alternativo	x	x	x	x	x
ene-89	dic-99	0.5192	0.3467	10.047	P. de Calibración alternativo	x	x	x	x	x
ene-50	sep-08	0.4825	0.3295	10.252		x				

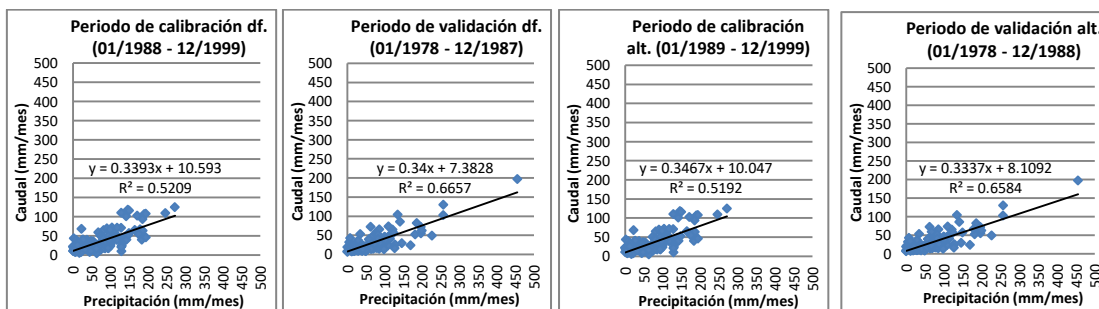
<sup>NOTA:</sup> Los colores quieren mostrar la magnitud de los valores más visualmente, yendo de verde oscuro a rojo, al ir de valores más grandes a valores más pequeños. En las casillas sobre la restitución de caudales, la disponibilidad de datos meteorológicos y la existencia del embalse de La Baells en el periodo, se ha coloreado en color verde oscuro los periodos con características más óptimas, mientras que al adaptarse los verdes, se marcan periodos algo peores, como por ejemplo, estar muy reciente la instalación del caudalímetro de salida del embalse, o incluso tener meses sin que este funcionara. Con la negrita se marcan los periodos definitivos para realizar este estudio.

Tabla 3-9 Estudio sobre los caudales y las precipitaciones en la cuenca de estudio durante diferentes periodos de tiempo.

Fuente: Caudales restituidos a régimen natural de las cuencas internas (ACA), [91] y [99].

Periodo		Caudales				Precipitación			
Mes inicial	Mes final	Máximo (mm/mes)	Promedio (mm/mes)	Mínimo (mm/mes)	Coefficiente de variación (CV) (%)	Máxima (mm/mes)	Promedio (mm/mes)	Mínima (mm/mes)	Coefficiente de variación (CV) (%)
ene-50	dic-75	154.78	37.55	4.23	146.11	260.90	76.82	0.56	71.41
ene-76	dic-77	103.43	43.31	10.37	54.25	208.51	87.84	5.84	61.30
ene-78	dic-87	197.56	31.68	7.19	84.97	455.65	71.46	0	90.38
ene-88	dic-99	125.14	35.59	5.03	73.16	272.04	73.68	0.08	75.17
ene-00	sep-08	142.73	24.53	1.90	85.44	236.60	61.10	2.24	64.38
ene-76	sep-00	197.56	34.04	5.03	76.75	455.65	73.24	0	80.26
mar-76	sep-00	197.56	34.18	5.03	76.55	455.65	73.55	0	79.99
may-76	sep-00	197.56	34.25	5.03	76.55	455.65	73.60	0	80.03
ene-78	sep-00	197.56	33.23	5.03	78.94	455.65	71.96	0	82.15
oct-00	sep-08	142.73	25.33	1.90	85.71	236.60	62.04	4.77	63.81
oct-00	dic-01	60.61	23.83	9.88	57.69	113.01	57.22	9.59	52.51
ene-02	sep-08	142.73	25.61	1.90	89.58	236.60	62.93	4.77	65.48
ene-78	dic-88	197.56	31.60	7.19	83.14	455.65	70.40	0	90.75
ene-89	dic-99	125.14	36.03	5.03	73.74	272.04	74.94	0.08	73.68
ene-50	sep-08	197.56	34.41	1.90	75.73	455.65	73.30	0	74.93

Los colores quieren mostrar la magnitud de los valores más visualmente, yendo de verde oscuro a rojo, al ir de valores más grandes a valores más pequeños, excepto para el coeficiente de variación, donde la escala es inversa.



Nota: "df.": definitivo; "alt.": alternativo

Figura 3-5 Dispersión entre caudales mensuales y precipitaciones mensuales en la cuenca de estudio para los periodos de calibración y de validación, definitivos y alternativos.

Fuente: Caudales restituidos a régimen natural de las cuencas internas (ACA), [91] y [99].

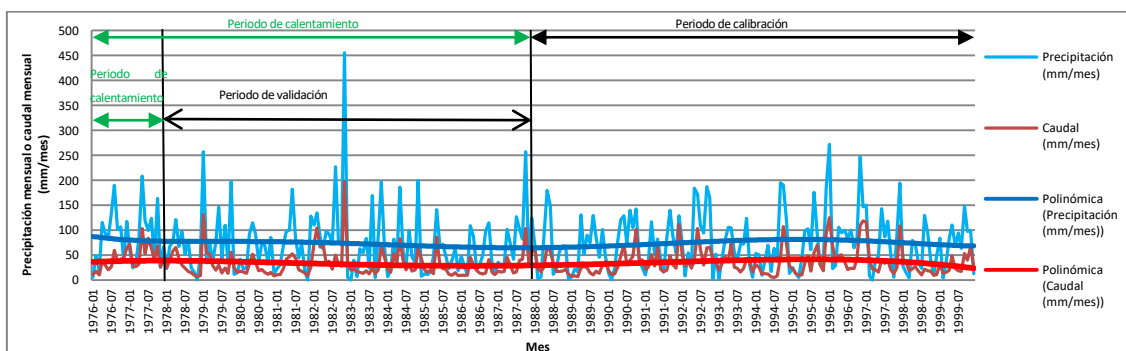


Figura 3-6 Evolución temporal de las precipitaciones y los caudales en la cuenca de estudio.

Fuente: Caudales restituidos a régimen natural de las cuencas internas (ACA), [91] y [99].

### 3.1.3.4. SWAT-CUP y el algoritmo “Sequential Uncertainty Fitting” (SUFI-2) como método de calibración

Pese a que se puede calibrar el modelo modificando manualmente los valores de los parámetros calibrables del modelo mediante QSWAT (“Edit Inputs and Run SWAT / SWAT Simulation / Manual Calibration Helper”), se ha decidido utilizar el software SWAT-CUP 2019 Version 5.2.1.1 [213] [130]. Esta herramienta ofrece la posibilidad de utilizar diferentes algoritmos de calibración, automatizando las modificaciones de los parámetros calibrables, las evaluaciones del comportamiento del modelo y el análisis de sensibilidad e incertidumbres, lo que facilita mucho el proceso de calibración, e incluso, el de validación.

De los algoritmos de calibración disponibles en SWAT-CUP (“Sequential Uncertainty Fitting” (SUFI-2), “Generalized Likelihood Uncertainty Estimation” (Glue), “Parameter Solution” (ParaSol), “Markov chain Monte Carlo” (McMc) y “Particle Swarm Optimization” (PSO)), se escogió el algoritmo de SUFI-2, ya que es fácil de implementar, dando buenos resultados (del análisis de incertidumbres y de sensibilidad de los parámetros) y con el menor número de simulaciones (mejor eficiencia computacional) según Nguyen *et al.* (2015) [214], Abbaspour (2015) [130] y Zhao *et al.* (2018) [215], además de ser el de más amplio uso en la bibliografía existente consultada sobre la calibración del modelo SWAT.

La calibración mediante el algoritmo SUFI-2 tiene un enfoque estocástico y bayesiano, ya que considerando la existencia de errores e incertidumbre en las simulaciones del modelo, con ella se busca que los valores abarcados por el 95% de la distribución de probabilidad de las variables de salida (95% Prediction Uncertainty (95PPU)) recojan el mayor número de valores observados y que a su vez, esta envolvente de valores tenga la menor anchura posible, para que la incertidumbre sea la mínima posible. Estas propiedades son valoradas mediante los estadísticos P-factor y R-factor respectivamente. El 95% de la distribución de probabilidad se calcula entre el 2,5% y el 97,5% de la distribución acumulada generada por la propagación de las incertidumbres de los parámetros mediante Latin Hypercube Sampling (LHS). En la calibración con el algoritmo SUFI-2 se realizan varias iteraciones, en cada una de ellas el rango de los parámetros se reduce, haciendo zoom en las regiones del rango previo (configurado o resultante de la iteración anterior) en las que se han dado mejores resultados en la iteración llevada justo a cabo. Por ello, el resultado de la calibración no es una única solución sino un conjunto de buenas soluciones

definido por un rango de parámetros [130]. En la Figura 3-8 se muestra el flujo de trabajo que lleva a cabo el algoritmo SUFI-2 en el proceso de calibración.

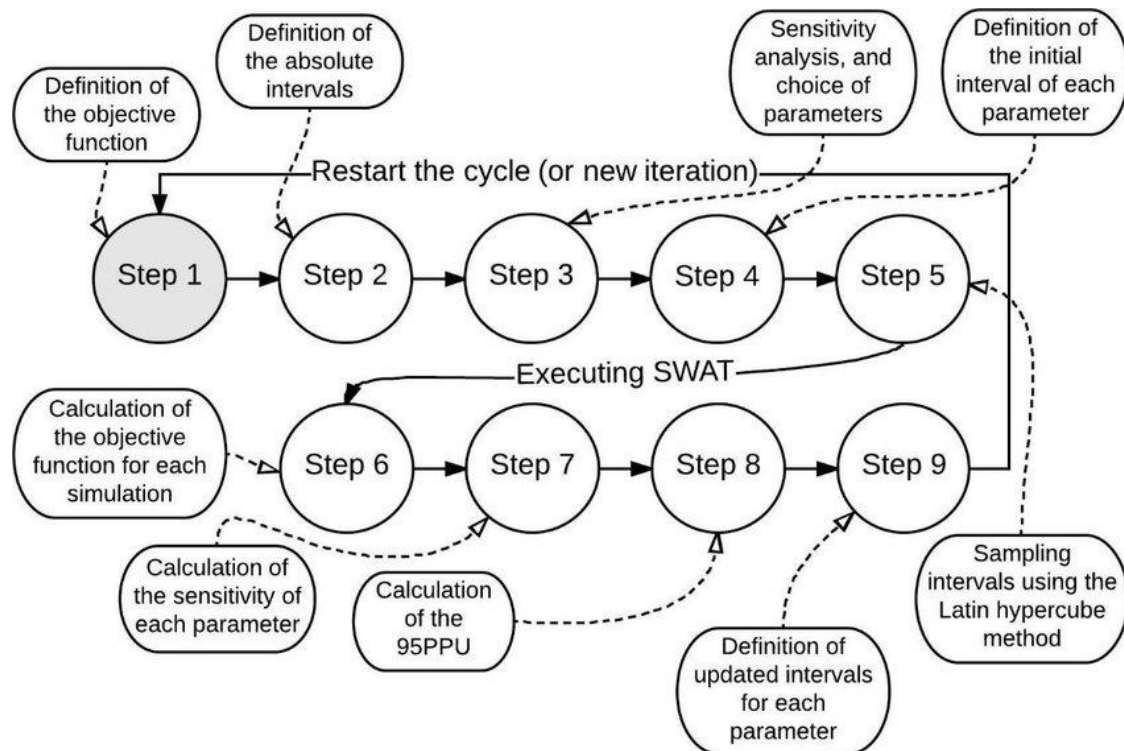


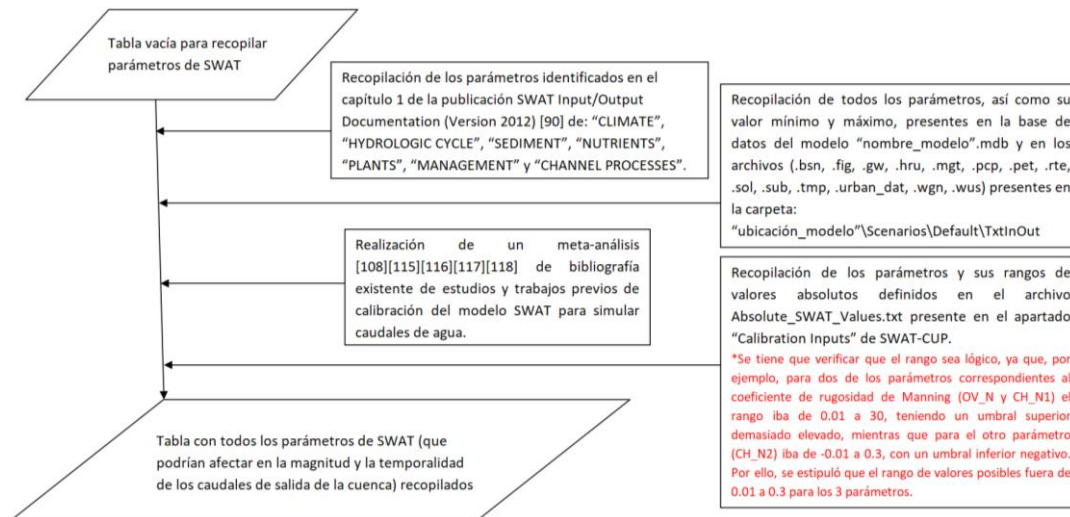
Figura 3-7 Algoritmo “Sequential Uncertainty Fitting” (SUFI-2).

Fuente: De Queiroga *et al.* [216]

En el Anejo C se muestra la configuración de SWAT-CUP utilizando el algoritmo SUFI-2.

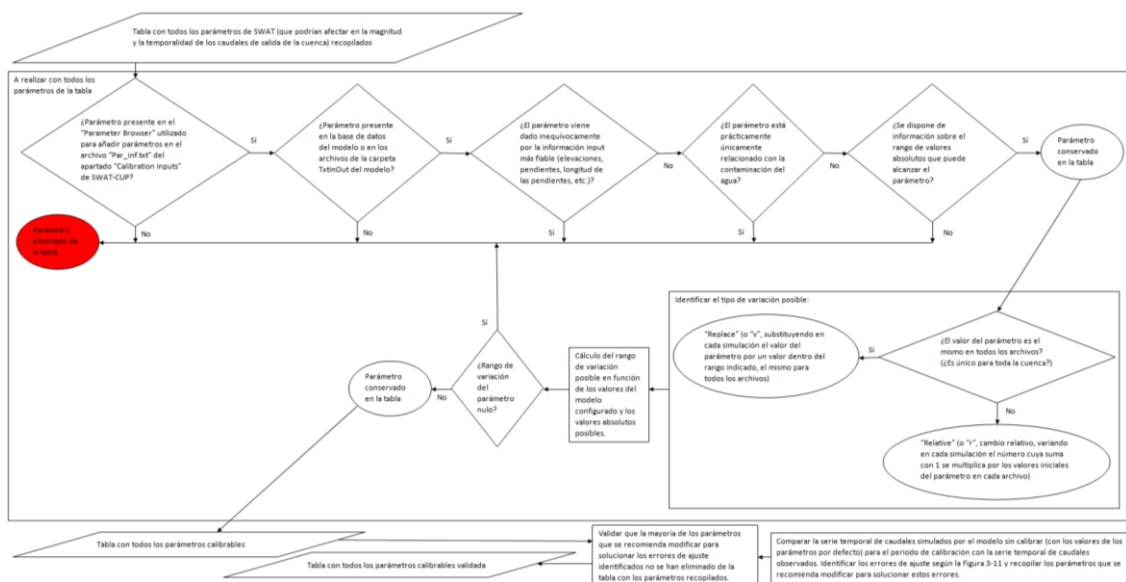
### 3.1.3.5. Parámetros a calibrar y proceso de calibración

Una vez corrido el modelo SWAT para el periodo de calibración con su correspondiente periodo de calentamiento y creado su correspondiente proyecto de SWAT-CUP/SUFI-2, se realizó la calibración del modelo. En las Figuras 3-9, 3-10 y 3-12 se muestra el proceso de calibración seguido.



<sup>Not3</sup> Los trapecios se corresponden con inputs u outputs, mientras que los rectángulos identifican procesos. Con un "\*" y fuente de color rojo se indican las adaraciones.

Figura 3-8 Flujo de trabajo llevado a cabo para recopilar los parámetros de SWAT que podrían afectar en la magnitud y la temporalidad de los caudales de salida de la cuenca.



<sup>Not3</sup> Los trapecios se corresponden con inputs u outputs, mientras que los rectángulos y circunferencias identifican procesos. Los rombos indican decisiones.

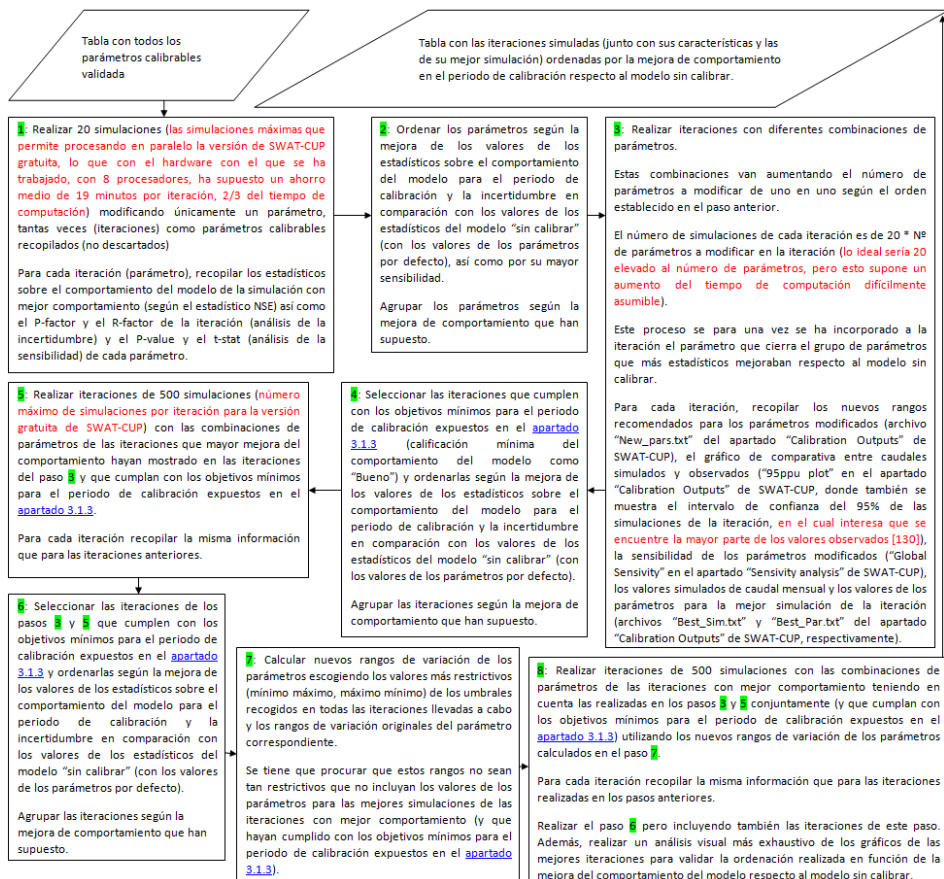
Figura 3-9 Flujo de trabajo llevado a cabo para eliminar los parámetros de SWAT no calibrables.



Issue 1: Model fails to simulate some peak flows	Issue 2: Overprediction of flow	Issue 3: Time lag	Issue 4: Peakier at peaks, flatter at baseflow
<b>Causes:</b> 1.1 The rainfall station/s is not representative. Such system shows no response to localized storms 1.2 OR, some gages (rainfall or discharge) might be malfunctioning	<b>Causes:</b> 2.1 High Surface flow than reality 2.2 Higher Baseflow than reality 2.3 Less evapotranspiration losses than reality	<b>Causes:</b> 3.1 Time of concentration is too long. This might be due to the slope being lesser than reality or surface roughness being overestimated for overland flow.	<b>Causes:</b> 4.1 Higher Surface flow than reality 4.2 Lower Baseflow than reality
<b>Solutions: (1.1)</b> Use precipitation data from representative stations	<b>Solutions: (2.1)</b> Decrease curve number (CN_2) for land use types	<b>Solutions: (3.1)</b> Adjust slope for overland flow (HRU_SLP)	<b>Solutions: (4.1, 4.2)</b> Adjust infiltration parameters
<b>Solutions: (1.2)</b> Careful review of rainfall and discharge data for the model duration	<b>Solutions: (2.2)</b> Increase deep percolation loss (GWQMN) <b>Solutions: (2.3)</b> Increase groundwater revap coefficient (GW_REVAP) Decrease threshold depth of water in shallow aquifer for revap to occur (REVAPMN)	<b>Solutions: (3.1)</b> Adjust Manning's roughness coefficient (OV_N) Adjust overland flow length (SLSUBBSN)	<b>Solutions: (4.1, 4.2)</b> Adjust parameters determining interflow (lateral flow) Adjust baseflow recession parameter (ALPHA_BF)
	<b>Note:</b> In case of <b>opposite problem</b> , try same solutions changing values in opposite manner	<b>Note:</b> In case of <b>opposite problem</b> , try same solutions changing values in opposite manner	<b>Note:</b> In case of <b>opposite problem</b> , try same solutions changing values in opposite manner

Figura 3-10 Tipología de errores de ajuste del modelo SWAT y posibles soluciones.

Fuente: [217] [218]

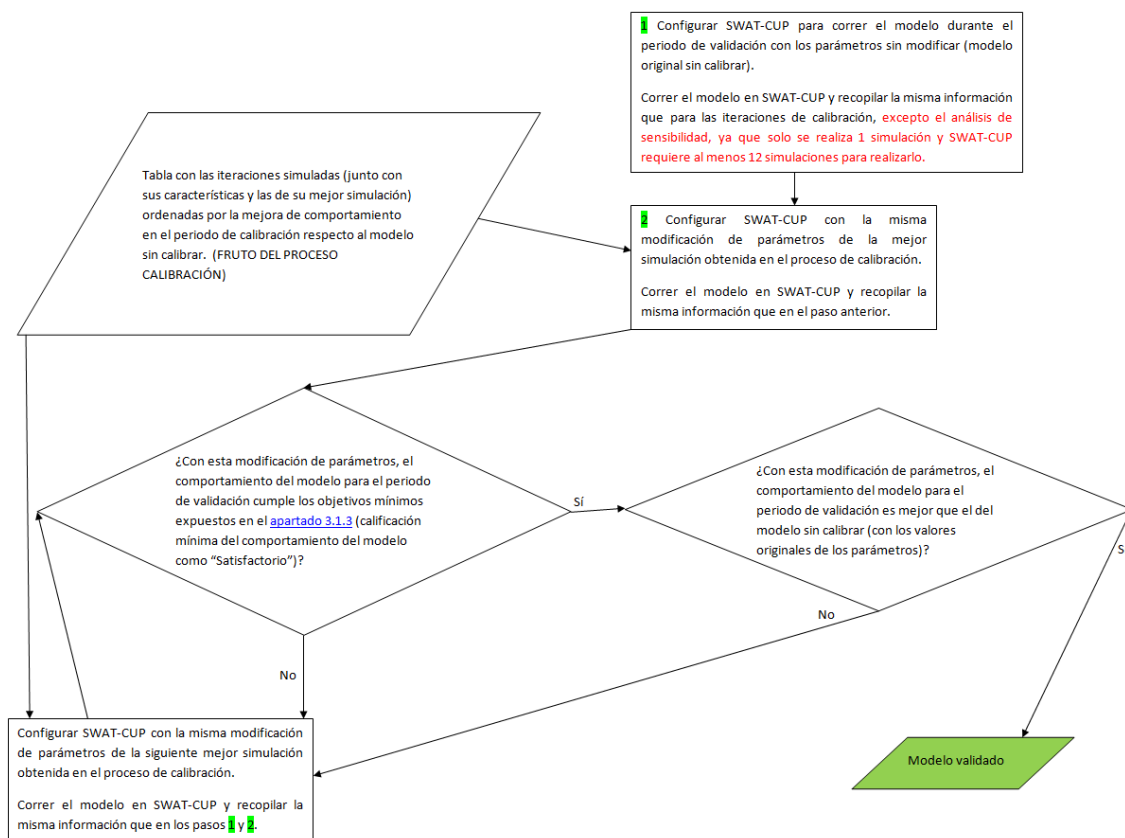


<sup>Nota:</sup> Los trapecios se corresponden con inputs u outputs, mientras que los rectángulos identifican procesos. Con fuente de color rojo se indican las aclaraciones. En verde se identifican los pasos.

Figura 3-11 Flujo de trabajo llevado a cabo para calibrar los parámetros del modelo SWAT.

### 3.1.3.6. Proceso de validación

Una vez identificadas las combinaciones de parámetros y los valores de éstos con que se alcanzaba una mayor mejora del comportamiento del modelo, se verificó que estos valores tenían sentido lógico. A continuación se corrió el modelo SWAT para el periodo de validación con su correspondiente periodo de calentamiento y se creó su correspondiente proyecto de SWAT-CUP/SUFI-2 para proceder a validar la calibración realizada del modelo. En la Figura 3-13 se muestra el flujo de trabajo realizado para validar el modelo.



Nota: Los trapecios se corresponden con inputs u outputs, mientras que los rectángulos identifican procesos. Los rombos son decisiones. Los números en verde identifican algunos de los pasos de la validación. Con fuente de color rojo se indican las aclaraciones.

Figura 3-12 Flujo de trabajo llevado a cabo para validar la calibración realizada del modelo SWAT.

## **4. Resultados y discusión**

### **4.1. Estudio de la sensibilidad a los cambios de usos del suelo, calibración y validación del modelo hidrológico SWAT para la cuenca tributaria del embalse de La Baells**

#### **4.1.1. Estudio de la necesidad de configurar en el modelo SWAT la variación de usos del suelo para la cuenca de estudio y análisis de la sensibilidad del modelo a los cambios de uso del suelo.**

En la Figura 4-1 se muestra la evolución de valores medios quinquenales (valores del año especificado y de  $\pm 2$  años) de las precipitaciones (P) totales anuales, los caudales (Q) totales anuales, las diferencias anuales entre los anteriores (P-Q) y la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) anual en la cuenca de estudio para el periodo de 1987-1997, periodo en el que se disponen de datos fiables de caudal y de información reciente de los usos del suelo (1987 $\pm 2$  años, 1992 $\pm 2$  años, 1997 $\pm 2$  años). Se observa que en el periodo 1987-1997 para la cuenca de estudio la diferencia media entre la precipitación anual (mm/año) y el caudal anual (mm/año) aumentó con una pendiente de 2,7191 mm/año. Sin embargo, la evapotranspiración de referencia media, disminuyó con una pendiente negativa de 9,4382 mm/año, por lo que en el hipotético caso de que la evapotranspiración de referencia fuera la evapotranspiración real, normalmente inferior en ámbitos como el de la cuenca de estudio, hay otros factores que no permitieron aumentar el caudal del río tanto como aumentó la precipitación, y que si estuvieran relacionados plenamente con la evapotranspiración, la magnitud de su impacto habría aumentado con una pendiente de 12,1572 mm/año.

Por otra parte, en las tablas 4-1, 4-2, 4-3 y 4-4, así como en las Figuras 4-2 y 4-3, se muestra la evolución de las cubiertas y los usos del suelo de la cuenca de estudio entre el 1956 y el 2017, con énfasis en el periodo 1987-1997.

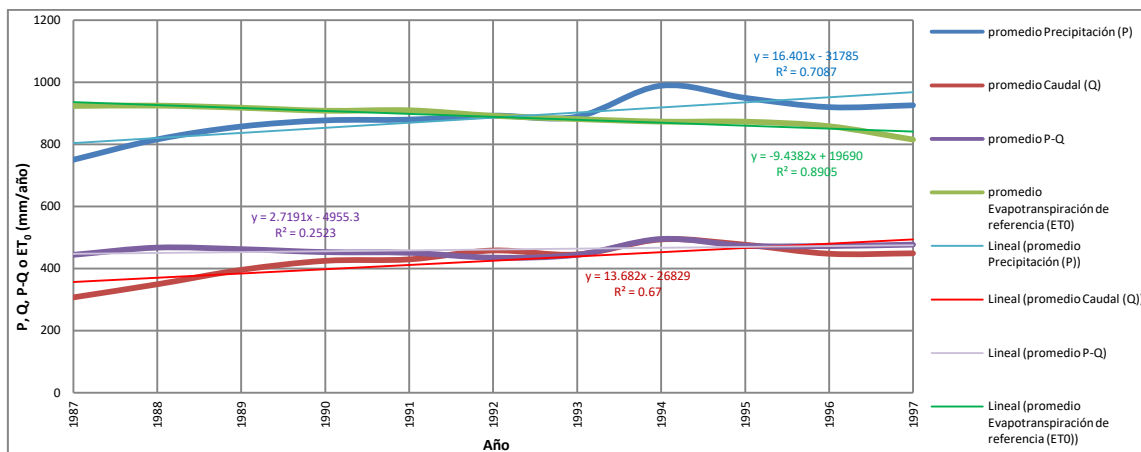


Figura 4-1 Evolución temporal de las medias quinquenales de precipitaciones anuales, caudales anuales, diferencias P-Q anuales y ET<sub>0</sub> anuales para el periodo 1987-1997 en la cuenca de estudio.

Fuente: Caudales restituidos a régimen natural de las cuencas internas (ACA), [91] y [99].

Tabla 4-1 Cubiertas y usos del suelo en la cuenca de estudio entre los años 1956 y 2017 (en % de superficie de la cuenca).

Fuente: Elaboración propia a partir de [57], [58] y [59].

Clasificaciones de los usos y cubiertas del suelo							Porcentaje de superficie de la cuenca tributaria del embalse de La Baells que ocupa cada tipología de usos y cubiertas del suelo en el							
Simplificada	global_landuses		Año 1956	Años 1987-2002		Años 2007-2017	año 1956	año 1987	año 1992	año 1997	año 2002	año 2007	año 2012	año 2017
Agua y humedales	Water Bodies	WATB	16	Aigües continentals	Aigües continentals	1	0.04	0.74	0.76	0.60	0.47	0.54	0.64	0.62
				Aigües marines	Aigües marines	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	Snow or Ice	ICES	24	Congestes	Congestes	3	0.00	0	0	0	0	0	0	0
Zonas urbanizadas e infraestructuras	Urban and Built-Up Land	URMD	1	Infraestructures viàries	Infraestructures viàries	4	0.16	0	0	0.05	0.05	0.10	0.10	0.10
				Urbanitzacions	Urbanitzacions	5	0.21	0.02	0.07	0.07	0.08	0.39	0.39	0.45
				Zones urbanes	Zones urbanes	6	0.10	0.18	0.25	0.26	0.26	0.20	0.20	0.21
				Zones industrials i comercials	Zones industrials i comercials	7	0.04	0.04	0.12	0.13	0.13	0.11	0.11	0.13
Cultivos	Dryland Cropland and Pasture	CRDY	2	Conreus herbacis (no arrossars)	Conreus herbacis de secà	8	10.62	1.62	1.40	1.15	1.19	0.41	0.40	0.57
					Conreus herbacis de regadiu	9	0	0	0	0	0.01	0.00	0.05	
	Irrigated Cropland and Pasture	CRIR	3	Arrossars	Arrossars	24	0	0	0	0	0	0	0	
	Cropland / Woodland Mosaic	CRWO	6	Conreus llenyosos (no vinyes)	Fruiters de secà	10	0.00	0	0	0	0	0	0	0
					Fruiters de regadiu	11	0	0	0	0	0	0	0	
Citrics					25	0	0	0	0	0	0	0		
Vinyes	Vinyes	12	0	0	0	0	0	0.00	0	0				
Prados y matorrales	Herbaceous Tundra	TUHB	20	Prats supraforestals	Prats supraforestals	13	3.38	4.17	3.87	4.03	3.98	7.39	7.35	4.97
					Matollars	14	20.32				10.78	8.60	10.92	
	Mixed Grassland / Shrubland	MIGS	9	Prats de terra mitjana	Bosquines i prats	14	7.14	28.99	25.09	26.45	28.59	3.30	3.44	5.26
					Prats de terra baixa	16	0	0	0	0	0	0	0	
Bosques	Evergreen Broadleaf Forest	FOEB	13	Boscos	Boscos d'escleròfil·les	15	51.88	2.88	2.03	1.54	1.50	9.85	7.04	3.02
	Deciduous Broadleaf Forest	FODB	11		Boscos de caducifolis	16	13.02	14.39	14.96	15.26	23.94	26.86	27.22	
	Evergreen Needleleaf Forest	FOEN	14		Boscos d'aciculifolis	17	44.04	48.49	48.28	46.11	42.27	44.21	44.99	
Agua y humedales	Herbaceous Wetland	WEHB	17	Vegetació de zones humides	Vegetació de zones humides	18	0	0	0	0	0	0	0	0
					Zones amb vegetació escassa o nul·la	19	6.10	4.30	3.53	2.48	2.39	0.69	0.67	1.50
					Zones cremades	20	0	0	0	0	0	0	0	0
					Sorrals i platges	21	0	0	0	0	0	0	0	
Zonas con vegetación escasa o nula	Barren or Sparsely Vegetated	BSVG	19	Zones amb vegetació escassa o nul·la	Zones cremades	22	0	0	0	0	0	0	0	0
					Sorrals i platges	23	0	0	0	0	0	0	0	

Nota: Los colores quieren mostrar la magnitud de los valores más visualmente, yendo de verde oscuro a rojo, al ir de valores de 100% a 0%.

Tabla 4-2 Matriz de variación entre las cubiertas y usos del suelo en la cuenca de estudio entre los años 1987 y 1992 (en % de superficie de la cuenca).

Fuente: Elaboración propia a partir de [57].

Porcentaje de superficie de cada tipología en la cuenca (destino) del embalse de La Barda	Usos y cubiertas de suelo en el año 1992 (origen)																					TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Uso y cubiertas de suelo en el año 1987 (origen)																						
Agües continentals	1	0.67																				
Agües marines	2																					
Congestes	3																					
Infraestructures viàries	4																					
Urbanitzacions	5																					
Zones urbanes	6	0.00																				
Zones industrials i comercials	7																					
Cornus herbacis de secà	8																					
Cornus herbacis de regadiu	9																					
Frutera de secà	10																					
Frutera de regadiu	11																					
Vinyes	12																					
Prats supraforestals	13																					
Bosquines i prats	14	0.04																				
Boscos d'aciculifolis	15																					
Boscos de caducifolis	16	0.00																				
Boscos d'aciculifolis	17	0.01																				
Vegetació de zones humides	18																					
Zones amb vegetació escassa o nul·la	19	0.03																				
Zones cremades	20																					
Sorrals i platges	21																					
TOTAL		0.76	0	0	0	0	0.07	0.23	0.12	1.40	0	0	0	0	3.87	23.09	2.03	14.39	48.40	0	3.53	

Nota: Los colores quieren mostrar la magnitud de los valores más visualmente, yendo de verde oscuro a rojo, al ir de valores más grandes a valores más pequeños. Los valores totales siguen una escala independiente (de 100% a 0%) a la de los valores parciales (del máximo valor al mínimo valor). Los valores parciales recuadrados son % de superficie que no han variado de categoría de usos y cubiertas de suelo (según diferentes agrupaciones).

Se observa que, aunque el periodo entre 1987 y 1997 no fue de los periodos en los que se produjeron más cambios, en el 31,23% de la superficie de la cuenca varió la tipología de cubierta o uso del suelo. En este periodo destacan las variaciones entre “Bosquines i prats” y “Boscos d’aciculifolis”, con cambios en ambos sentidos, pero yendo algo menos de dos tercios de la superficie cambiante entre estas cubiertas hacia “Boscos d’aciculifolis”, especialmente por las variaciones entre 1987 y 1992, ya que entre 1992 y 1997, incluso, fue un poco más de superficie hacia “Bosquines i prats” que hacia “Boscos d’aciculifolis”. También destaca el incremento de los bosques en general (4,83% más de la superficie de la cuenca) y la disminución de los prados y matorrales (2,69% menos de superficie de la cuenca), especialmente los no supraforestales, de los cuales, el 21,49% del cambio se produjo a favor de bosques aciculifolios. Destacar en este sentido también la disminución de las zonas con escasa vegetación o de suelo desnudo (1,81% menos de la superficie de la cuenca), habiéndose producido un 31,10% de este cambio hacia “Bosquines i Prats” y un 17,94% hacia bosques aciculifolios.

Tabla 4-3 Matriz de variación entre las cubiertas y usos del suelo en la cuenca de estudio entre los años 1992 y 1997 (en % de superficie de la cuenca).

Fuente: Elaboración propia a partir de [57].

Tipología de cubierta o uso del suelo en el año 1997 (destino)	Usos y cubiertas de suelo en el año 1992 (origen)	Porcentaje de superficie de cada tipología en la cuenca tributaria del estudio de la Baixa																					TOTAL
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Algües continentals	1	0.58			0.00										0.04	0.00	0.00	0.11		0.02		0.76	
Algües marines	2																					0	
Congestes	3																					0	
Infraestructures variades	4																					0	
Urbanitzacions	5				0.00		0.00	0.00	0.00						0.01			0.00		0.00		0.07	
Zones urbanes	6				0.00	0.00	0.21	0.00	0.00						0.02		0.00	0.00		0.01		0.25	
Zones industrials i comercials	7						0.00	0.09	0.00						0.03			0.00		0.00		0.12	
Conreus herbacis de secà	8					0.00	0.00	0.00	0.94						0.32	0.00	0.03	0.10		0.01		1.40	
Conreus herbacis de regadiu	9																					0	
Fruteres de secà	10																					0	
Fruteres de regadiu	11																					0	
Vinyes	12																					0	
Prats supraforestals	13													3.62	0.14		0.00	0.04		0.07		3.87	
Bosques i prats	14	0.00			0.01	0.01	0.03	0.02	0.14					0.19	21.50	0.03	0.85	2.36		0.15		25.09	
Boscos d'acollida	15								0.01					0.11	1.29	0.11	0.51			0.00		2.03	
Boscos de caducifolis	16	0.00							0.02					0.54	0.05	12.74	1.03			0.00		14.39	
Boscos d'acollida	17	0.01			0.00	0.00	0.00	0.00	0.04					0.08	2.90	0.17	1.22	63.97		0.10		68.63	
Vegetació de zones humides	18																					0	
Zones amb vegetació escassa o nul·la	19	0.00			0.04	0.00	0.00	0.01	0.01					0.14	0.85	0.00	0.01	0.35		2.11		3.53	
Zones cremades	20																					0	
Sorrals i plagues	21																					0	
TOTAL		0.60	0	0	0.06	0.07	0.26	0.13	1.15	0	0	0	0	4.03	26.41	1.54	14.06	68.28	0	2.88	0	108	

Nota: Los colores quieren mostrar la magnitud de los valores más visualmente, yendo de verde oscuro a rojo, al ir de valores más grandes a valores más pequeños. Los valores totales siguen una escala independiente (de 100% a 0%) a la de los valores parciales (del máximo valor al mínimo valor). Los valores parciales recuadrados son % de superficie que no han variado de categoría de usos y cubiertas de suelo (según diferentes agrupaciones).

Por otro lado, si se tienen en cuenta los  $\text{km}^2$  que variaron entre las diferentes tipologías de cubiertas o usos del suelo entre 1987 y 1992, y entre 1992 y 1997, la pendiente resultante es de  $-11,963 \text{ km}^2/\text{año}$  o de  $12,707 \text{ km}^2/\text{año}$ , si el sumatorio de las pendientes de los cambios se realiza en valores absolutos. Aunque con unidades diferentes, ambos valores tienen una magnitud absoluta muy similar a la de la pendiente de  $12,1572 \text{ mm/año}$  del impacto de los factores desconocidos que estaban afectando al caudal respecto a la precipitación si estos factores estuvieran relacionados plenamente con la evapotranspiración de referencia. Este hecho podría mostrar indicios de que parte de esta afectación se debió al cambio de cubiertas o uso del suelo, y que pese a que la evapotranspiración de referencia descendió, quizás la evapotranspiración real del conjunto de la cuenca aumentó por el cambio de usos del suelo. Así como también sería posible que hubiera aumentado la interceptación de las precipitaciones al haber aumentado las masas arbóreas y haberse reducido las cubiertas de prados y matorrales, como se ha evidenciado en algunos estudios [9] [10] [11] [12] [7] [13] [7] [14] [15] [16] [17].

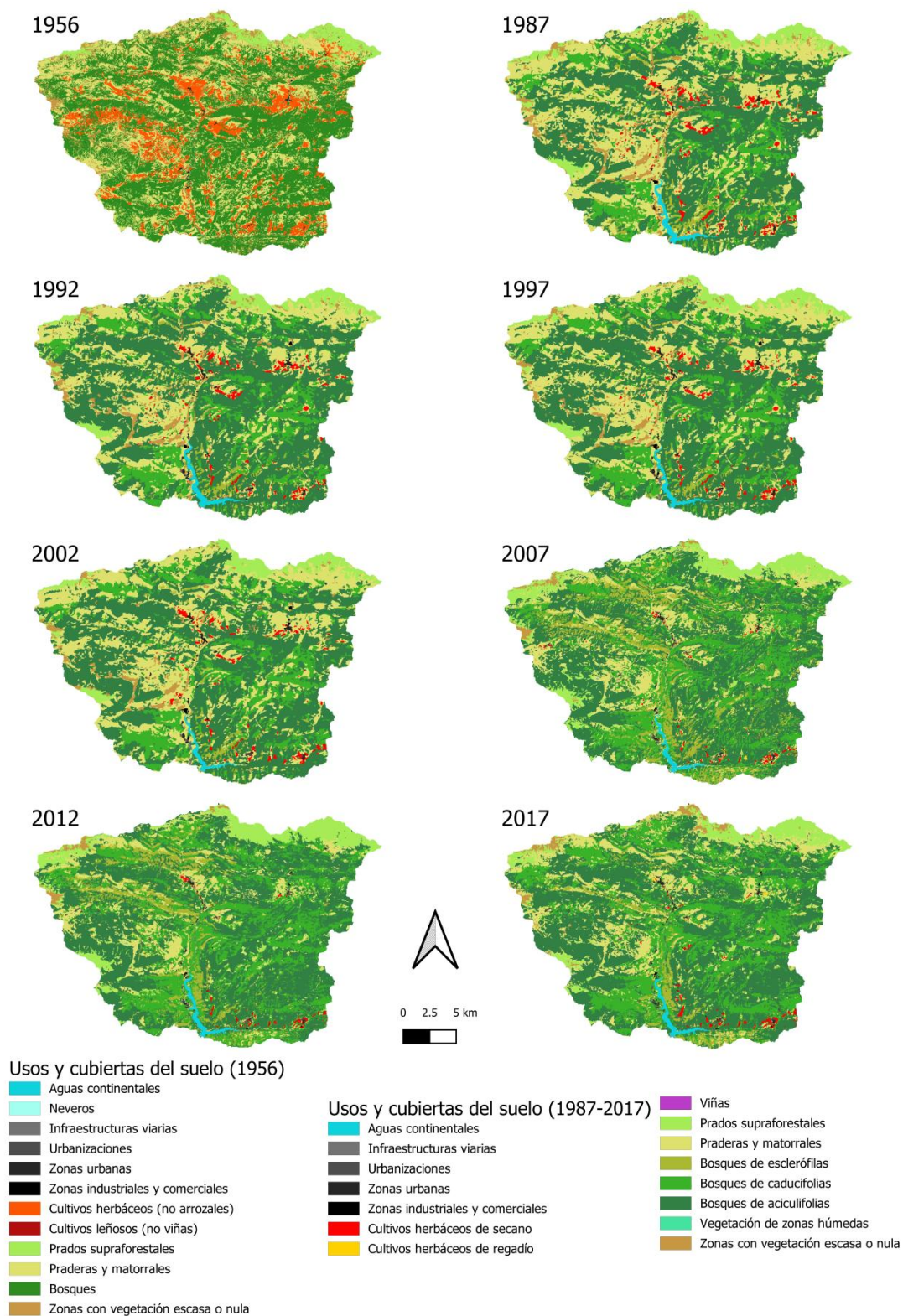


Figura 4-2 Evolución de las cubiertas y usos del suelo en la cuenca de estudio entre 1956 y 2017.

Fuente: Elaboración propia a partir de [57], [58] y [59].

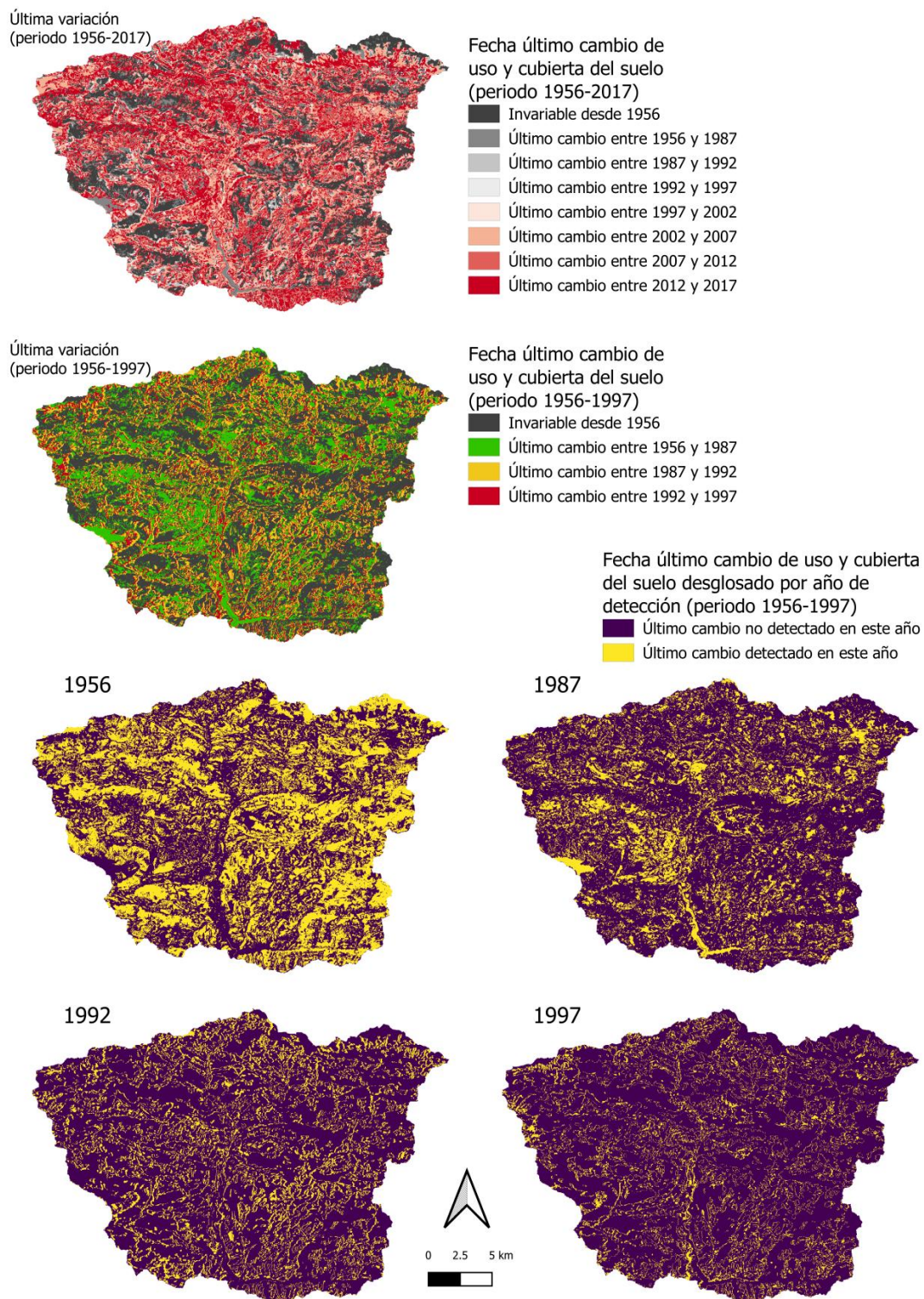


Figura 4-3 Fecha del último cambio de las cubiertas y usos del suelo en la cuenca de estudio entre 1956 y 2017, con énfasis en el periodo entre 1956 y 1997.

Fuente: Elaboración propia a partir de [57], [58] y [59].



Tabla 4-4 Cubiertas y usos del suelo invariables desde los años 1956, 1987 y 1992 hasta el 1997 (en km<sup>2</sup> de superficie en la cuenca de estudio).

Fuente: Elaboración propia a partir de [57], [58] y [59].

Clasificaciones de los usos y cubiertas del suelo								Superficie invariable (km <sup>2</sup> ) de cada tipología de usos y cubiertas del suelo en la cuenca tributaria del embalse de La Baells en el año 1997 desde el			
Simplificada	global_landuses			Año 1956	Años 1987-2002	Años 2007-2017	año 1956	año 1987	año 1992	año 1997	
Agua y humedales	Water Bodies	WATB	16	Aigües continentals	Aigües continentals	1	0.08	2.73	0.13	0.1	
				Aigües marines	Aigües marines	2	0	0	0	0	
	Snow or Ice	ICES	24	Congestes	Congestes	3	0	0	0	0	
Zonas urbanizadas e infraestructuras	Urban and Built-Up Land	URMD	1	Infraestructures viàries	Infraestructures viàries	4	0	0	0	0.26	
				Urbanitzacions	Urbanitzacions	5	0.00	0.03	0.26	0.09	
				Zones urbanes	Zones urbanes	6	0.17	0.28	0.61	0.24	
				Zones industrials i comercials	Zones industrials i comercials	7	0.00	0.13	0.31	0.21	
Cultivos	Dryland Cropland and Pasture	CRDY	2	Conreus herbacis (no arrossars)	Conreus herbacis de secà	8	3.37	0.38	1.00	1.09	
					Conreus herbacis de regadiu	9					
	Irrigated Cropland and Pasture	CRIR	3	Arrossars	Arrossars	24	0	0	0	0	
					Cropland / Woodland Mosaic	CRWO	6	Conreus llenyosos (no vinyes)	Fruiters de secà	10	0
	Fruiters de regadiu	11									
	Vinyes	Vinyes	12	0	0	0	0				
Prados y matorrales	Herbaceous Tundra	TUHB	20	Prats supraforestals	Prats supraforestals	13	9.67	5.42	3.17	2.06	
				Matollars	Matollars	14	26.34				
	Mixed Grassland / Shrubland	MIGS	9	Prats de terra mitjana	Bosquines i prats	14	11.13	48.64	22.38	24.99	
				Prats de terra baixa		16	0				
Bosques	Evergreen Broadleaf Forest	FOEB	13	Boscos	Boscos d'escleròfil·les	15	173.80	1.62	1.73	1.28	
	Deciduous Broadleaf Forest	FODB	11		Boscos de caducifolis	18		11.67	18.52	11.21	
	Evergreen Needleleaf Forest	FOEN	14		Boscos d'aciculifolis	19		43.76	41.65	21.73	
Agua y humedales	Herbaceous Wetland	WEHB	17	Vegetació de zones humides	Vegetació de zones humides	18	0	0	0	0	
Zonas con vegetación escasa o nula	Barren or Sparsely Vegetated	BSVG	19	Zones amb vegetació escassa o nul·la	Zones amb vegetació escassa o nul·la	19	3.33	4.59	2.75	1.87	
				Zones cremades	Zones cremades	20	0	0	0	0	
				Sorrals i platges	Sorrals i platges	21	0	0	0	0	
				Sorrals i platges	Sorrals i platges	23	0	0	0	0	
TOTAL							227.90	119.24	92.51	65.12	

<sup>1000</sup> Los colores quieren mostrar la magnitud de los valores más visualmente, yendo de verde oscuro a rojo, al ir de valores más grandes a valores más pequeños.

Sin embargo, al observar la Figura 4-4, en la que se muestra la acumulación de los residuos entre los caudales observados y los caudales simulados mediante el modelo SWAT sin calibrar introduciendo como input de usos del suelo la capa correspondiente solamente al año correspondiente, o las inmediatamente anteriores o posteriores en cada caso, no se aprecia gran diferencia de comportamiento. De hecho, para el año 1987 (periodo 1985-1989) se acumula menos residuo configurando como input la capa inmediatamente anterior de la que se dispone (1956, de unos 30 años antes) que configurando la capa del propio año. Otro hecho sorprendente de este caso, es que con la capa de cubiertas del suelo de 1956, al principio del periodo 1985-1989, estando más cerca, aunque mínimamente del año 1956, se acumulan más residuos que con las otras capas input, pero a partir del primer año, la tasa de reducción en la acumulación de residuos se incrementa, es decir, al alejarse de la fecha de la capa input su comportamiento

mejora, alcanzándose al final del periodo un error acumulado muy inferior que con las otras capas input. Todas estas casuísticas podrían contradecir lo expuesto en referencia a la importancia en el periodo 1985-1999 de la evolución de los usos del suelo en la evolución de los caudales de salida de la cuenca de estudio respecto a las precipitaciones. Aún así, la diferencia significativa de comportamiento al utilizar la capa de cubiertas de 1956, aunque es verdad que es la capa de cubiertas más diferente del resto, explicita que el modelo no es insensible a los cambios de usos y cubiertas del suelo aunque no muestre gran sensibilidad a los cambios que se produjeron entre 1987 y 1997.

Aunque no se haya podido extraer información concluyente al respecto, se decide implementar la variación de las cubiertas y usos del suelo en el modelo, ya que no supone un sobreesfuerzo extraordinario y, en cualquier caso, permitirá ajustar mejor los parámetros relacionados con los usos del suelo al utilizar información de usos y cubiertas del suelo más específica de cada periodo, lo que mejorará las simulaciones de escenarios en los que se den cambios de usos del suelo.

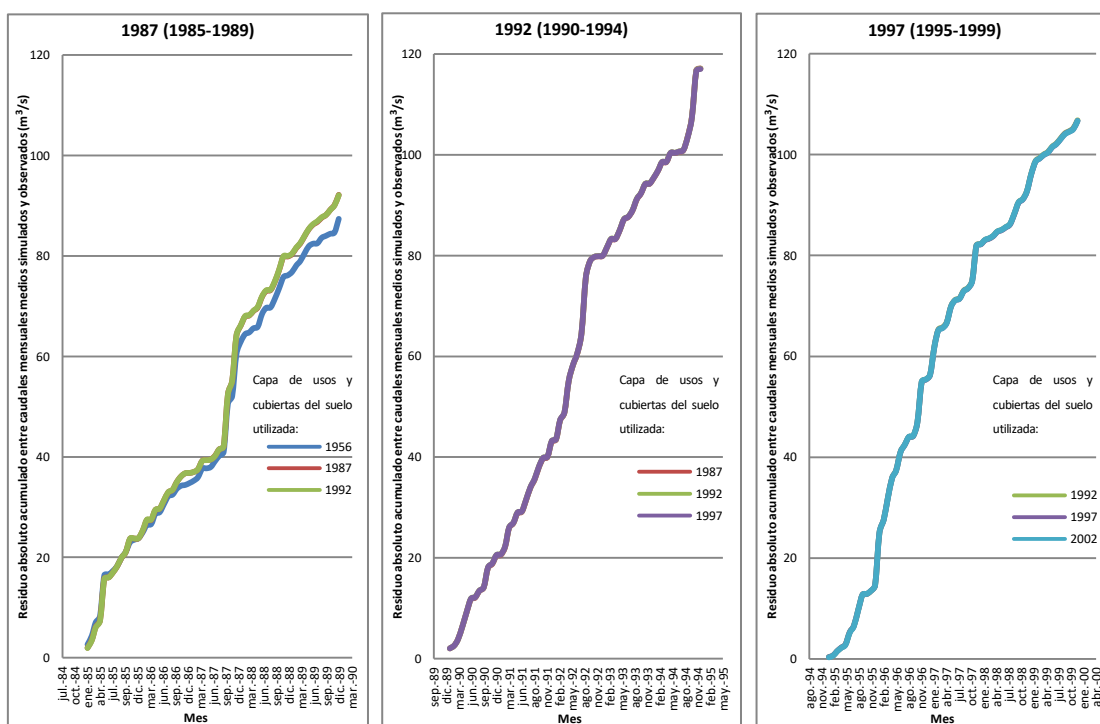


Figura 4-4 Residuos absolutos acumulados entre los caudales mensuales observados y los simulados utilizando diferentes capas de usos y cubiertas de suelo para los periodos 1987 (1985-1989), 1992 (1990-1994) y 1997 (1995-1999).

Fuente: Caudales restituidos a régimen natural de las cuencas internas (ACA), [91] y [99].

Como curiosidad, en la Tabla 4-1, se observa que entre el año 2002 y 2007, en algunas de las categorías de usos y cubiertas del suelo de las capas de los años 1987-2002 que continúan en las capas de los años 2007-2017, se producen cambios bruscos de superficie, incluso de tendencia contraria a la que se llevaba hasta 2002 y a la que sigue a partir de 2007, como por ejemplo, en los bosques de esclerófilas y los prados supraforestales. Esto podría indicar que el cambio entre 2002 y 2007 del ente que elaboraba las capas (ver [apartado 3.1.2.1.3](#)), hubiera podido tener cierto impacto, así como parecía ocurrir en la restitución de los caudales (ver [apartado 3.1.3.2.1](#)), produciéndose una posible pérdida de homogeneidad en los criterios de clasificación entre un periodo y otro. Este hecho refuerza la decisión de haber utilizado periodos de calibración y validación anteriores a 2007, e invita a prestar atención a posibles cambios de autores o fuentes de datos en series temporales de datos, especialmente si requieren cierta elaboración.

#### **4.1.2. Mejora del ajuste del modelo sin calibrar debida a la calidad de los inputs**

En la Tabla 4-5 se muestra cómo varía el comportamiento del modelo SWAT (sin calibrar) en la cuenca de estudio para el periodo de calibración en función de los inputs utilizados.

Se observa que al utilizar como input de datos de suelo el mapa de suelos creado a partir de los archivos Shapefile del MSC250M del ICGC en vez del mapa creado en base al wms del mapa de suelos de Catalunya a escala 1:250.000 publicado previamente, en el invierno de 2018-2019, “Mapa de suelos creado a partir del wms del mapa de sòls 2018 y otras fuentes diversas”, el comportamiento del modelo mejoró, habiendo mejorado en promedio un 6,82% los estadísticos descriptivos recopilados sobre éste.

Por otro lado, al utilizar como input de datos meteorológicos unos datos asociados al centroide de cada subcuenca (estaciones meteorológicas virtuales) e interpolados a partir de los datos de la rejilla Spain02\_v5 [91] [92] [93] [94] [95] [96], el comportamiento del modelo SWAT para la cuenca de estudio en el periodo de calibración mejoró con respecto a utilizar los puntos de la rejilla Spain02\_v5 como estaciones meteorológicas directamente, con una mejora media del 14,11% en los estadísticos descriptivos. Esta interpolación se realizó en función de la proporción de la subcuenca influenciada por cada uno de los puntos de la rejilla Spain02\_v5, de manera similar a la creación de polígonos de Thiessen, pero teniendo en cuenta el coste acumulado en relación a la topografía en su creación mediante la herramienta “r.cost” de GRASS/QGIS.

Sin embargo, se observa una mejora aún mayor al utilizar los datos interpolados para los centroides de las subcuencas de Meteoland App [99] [100] del Laboratori Forestal Català (CREAF-CTFC) [98], al haber mejorado los estadísticos descriptivos del comportamiento del modelo en un 23,86 o un 8,19% de media respecto a utilizar los puntos de la rejilla de Spain02\_v5 directamente o las estaciones meteorológicas virtuales creadas a partir de Spain02\_v5, respectivamente.

Este peor comportamiento del modelo en la cuenca de estudio para el periodo de calibración al introducir inputs de peor calidad, menor resolución espacial y/o menor información edafológica y climática, respalda el principio “garbage in, garbage out” (GIGO) [219]. Por ello, para realizar la configuración del modelo y la selección de la información de entrada, se ha decidido utilizar como datos de suelo el mapa de suelos creado a partir de los archivos Shapefile del MSC250M del ICGC y como datos climáticos los datos de Meteoland App (Laboratori Forestal Català) interpolados para los centroides de cada subcuenca, además de los usos del suelo y las características de la cuenca derivadas del modelo digital de elevaciones del terreno de alta resolución descritos en la sección de metodología.

Tabla 4-5 Comportamiento del modelo SWAT (sin calibrar) en la cuenca de estudio para el periodo de calibración según los diferentes inputs utilizados.

Datos de suelo utilizados		Datos climáticos utilizados		Estadísticos descriptivos sobre el comportamiento del modelo														Model "Performance Evaluation Criteria" (PEC)				Orden según comportamiento del modelo	
Mapa de suelos creado a partir del wms del mapa de sols 2018 y otras fuentes diversas	Mapa de suelos a partir de Shapefiles del MSC250M	Estaciones Spain02_v5	Estaciones virtuales a partir de las estaciones de Spain02_v5	Meteoland App	p-factor	r-factor	R2	NS	br2	MSE	SSQR	PBIAS (%)	KGE	RSR	MNS	VOL_FR	rel_Mean	rel_StdDev	Clasificación según R2	Clasificación según MSE	Clasificación según PBIAS		Clasificación según RSR
x		x			0.11	0	0.74	0.55	0.6989	11	3.7	-17.8	0.67	0.67	0.33	0.85	0.1789	0.2353	S	S	NS	S	6
	x	x			0.13	0	0.76	0.59	0.7072	10	3.1	-14.5	0.7	0.64	0.38	0.87	0.1452	0.2353	B	S	S	S	5
x			x		0.19	0	0.83	0.68	0.7706	7.8	3.3	-19.8	0.72	0.57	0.43	0.83	0.1979	0.1805	B	S	NS	B	4
	x			x	0.19	0	0.84	0.71	0.7714	7	2.8	-16.7	0.74	0.54	0.46	0.86	0.1672	0.1886	B	B	NS	B	3
x				x	0.19	0	0.84	0.72	0.7499	6.9	2.5	-13.5	0.72	0.53	0.51	0.88	0.1364	0.2252	B	B	S	B	2
	x			x	0.24	0	0.85	0.72	0.7421	6.7	2.4	-10.8	0.72	0.53	0.52	0.9	0.1085	0.2414	B	B	S	B	1

Los colores indicando los datos de suelo y climáticos utilizados (marcados con una "x") siguen un código semafórico, siendo verde, lo mejor, y rojo, lo peor, pasando por los amarillos y naranjas. Los títulos de los estadísticos en azul, indican que el valor ideal del estadístico es 0, mientras que si están en negrita indican que tienen asociado uno de los criterios de valoración del comportamiento del modelo (PEC) definidos por Morias *et al.* (ver Tabla 3-6) [108] [109]. Por otro lado, la fuente de color rojo en los valores de los estadísticos, indica que su valor es peor que el de la mejor simulación de la iteración inmediatamente posterior, mientras que si están coloreados de color verde, se indica que su valor es mejor o igual que el devuelto para el modelo sin calibrar con los inputs definitivos (Datos de suelo según el Mapa de Sòls de Catalunya 1:250.000 (MSC250M) y datos climáticos de Meteoland App). Si estos estuvieran en negrita significaría que es la simulación que mejor comportamiento muestra para este estadístico y si están en cursiva que es la segunda mejor. En los criterios de valoración del comportamiento del modelo ("PEC"), "NS" significa "No Satisfactorio", "S" "Satisfactorio", "B" "Bueno" y "MB" "Muy Bueno", estos se colorean de rojo a verde oscuro a modo de código semafórico, de peor a mejor valoración. R<sup>2</sup>, NS, br<sup>2</sup>, MSE, SSQR, PBIAS, KGE, RSR y MNS son estadísticos definidos en la Tabla 3-7. VOL\_FR, es un estadístico que indica la fracción del balance total de agua que se predice, mientras p-factor y r-factor, indican la fracción de datos observados que se encuentran dentro de la envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP (95PPU) y la anchura de esta envolvente, respectivamente. rel\_Mean y rel\_StdDev, indican la variación absoluta entre las medias de los caudales observados y de los caudales simulados y la variación absoluta entre la desviación típica de los caudales observados y de los caudales simulados, respectivamente. En la coloración de los valores de orden (en función del comportamiento del modelo), el verde corresponde a la 1ª posición y el rojo a la última.

### 4.1.3. Calibración

En la Tabla 4.6 se recogen los 90 parámetros utilizados en los diversos estudios contemplados según el meta-análisis realizado sobre la bibliografía existente acerca de la calibración del modelo SWAT para simular caudales de agua. Se consultaron 47 estudios, aunque en realidad se trataría de 110 estudios, al incluirse un artículo de revisión/meta-análisis que explora 64 artículos más [133]. Además, se indican los 59 parámetros que también se han utilizado para cuencas geográficamente cercanas, dado que podrían tener mayor similitud con la cuenca de estudio [220], como los utilizados en los estudios de Palazón (2016 y 2014) [145] [221], Salmoral (2014 y 2015) [222] [223], Carvalho (2016 y 2017) [224] [186], Grusson (2017) [191], Sun (2013) [89], Meaurio (2015) [169], Epelde (2015) [225] y Abbaspour (2015, 2018 y 2007) [131] [226] [53].

Se observa que CN2 (.mgt, “SCS runoff curve number for moisture condition II”) es con diferencia el parámetro más ajustado para mejorar la bondad de ajuste del modelo. A continuación irían ALPHA\_BF (.gw, “Baseflow alpha factor (1/days)”), SOL\_AWC (.sol, “Average available water capacity of the soil layer (including rock fragments) (mm H<sub>2</sub>O/mm soil)”), ESCO (.bsn o . hru, “Soil evaporation compensation factor”), GW\_REVAP (.gw, “Groundwater “revap” coefficient”), GW\_DELAY (.gw, “Groundwater delay time (days)”) y GWQMN (.gw, “Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)”). Estos parámetros se han utilizado en más de la mitad de los estudios contemplados, y también en más de la mitad de los estudios próximos geográficamente. De estos 7 parámetros, solo GW\_DELAY (.gw) no se encuentra reflejado entre los parámetros más importantes a modificar para solucionar las diferentes tipologías de errores de ajuste del modelo SWAT según su documentación técnica [218] (ver Figura 3-11). Estos parámetros sugeridos para la solución de problemas de ajuste por la documentación técnica de SWAT se encuentran marcados en negrita en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6 Parámetros modificados para calibrar el modelo SWAT en los estudios consultados.

Fuente: [52] [53] [56] [89] [130] [131] [133] [140] [125] [141] [144] [145] [147] [150] [151] [152] [153] [154] [164] [165] [167] [168] [169] [171] [172] [173] [174] [175] [177] [178] [179] [180] [182] [184] [186] [190] [191] [193] [198] [199] [201] [203] [204] [214] [215] [221] [222] [223] [224] [225] [226] [227] [228] [229] [230] [231] [232] [233] [234] [235] [236] [237] [238] [239] [240] [241] [242] [243] [244] [245] [246] [247]

Parámetro	Archivo	Significado	Aparición en artículos revisados	De los cuales, en estudios geográficamente cercanos
CN2	.mgt	SCS runoff curve number for moisture condition II	96	13
ALPHA_BF	.gw	Baseflow alpha factor (1/days)	79	15
SOL_AWC	.sol	Average available water capacity of the soil layer (including rock fragments) (mm H2O/mm soil).	78	9
ESCO	.bsn, .hru	Soil evaporation compensation factor.	75	11
GW_REVAP	.gw	Groundwater "revap" coefficient.	66	13
GW_DELAY	.gw	Groundwater delay time (days).	63	14
GWQMN	.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm).	61	12
REVAPMN	.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" or percolation to the deep aquifer to occur (mm).	51	9
SURLAG	.bsn, .hru	Surface runoff lag time (days).	51	7
EPCO	.bsn, .hru	Plant uptake compensation factor.	42	7
SOL_K	.sol	Saturated hydraulic conductivity - ksat (mm/h)	41	8
RCHRG_DP	.gw	Deep aquifer percolation fraction.	39	10
SMFMX	.bsn	Maximum melt rate for snow during year (occurs on summer solstice - June 21st) (mm H2O/°C-day).	37	8
CH_K2	.rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium (mm/h).	37	6
SFTMP	.bsn	Snowfall temperature (°C).	33	8
CH_N2	.rte	Manning's "n" value for the main channel.	33	7
SMTMP	.bsn	Snow melt base temperature (°C).	31	8
SMFMN	.bsn	Minimum melt rate for snow during year (occurs on winter solstice - December 21st) (mm H2O/°C-day).	31	7
SPCON	.bsn	Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be reentrained during channel sediment routing.	27	4
OV_N	.hru	Manning's "n" value for overland flow.	26	9
TIMP	.bsn	Snow pack temperature lag factor.	25	7
USLE_P	.mgt	USLE equation support practice factor	24	3
SPEXP	.bsn, .rte	Exponent parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment routing.	24	3
HRU_SLP	.hru	Average slope steepness (m/m).	24	2
EVIAI	.bsn	Leaf area index at which no evaporation occurs from water surface (m2/m2).	20	4
SOL_Z	.sol	Depth from soil surface to bottom of layer (mm).	20	2
CANMX	.hru	Maximum canopy storage (mm).	18	5
PRF_BSN	.bsn	Peak rate adjustment factor for sediment routing in the main channel.	18	2
CH_COV2	.rte	Channel cover factor.	18	1
SOL_BD	.sol	Moist bulk density (g/cm3).	17	4
SLSUBBSN	.hru	Average slope length (m).	17	4
USLE_K	.sol	USLE equation soil erodibility (K) factor.	17	3
C_FACTOR	.bsn	Scaling parameter for Cover and management factor in ANSWERS erosion model for overland flow erosion	17	2
CH_COV1	.rte	Channel erodibility factor.	15	1
SNOCOVMX	.bsn	Minimum snow water content that corresponds to 100% snow cover (mm).	13	5
BIOMIX	.mgt	Biological mixing efficiency	13	0
TLAPS	.sub	Temperature lapse rate (°C/km).	12	5
SNOSCOV	.bsn	Fraction of snow volume represented by SNOCOVMX that corresponds to 50% snow cover.	12	4
PLAPS	.sub	Precipitation lapse rate (mm/km).	10	6
SHALLST	.gw	Initial depth of water in the shallow aquifer (mm).	9	6
LAI_INIT	.mgt	Initial Leaf Area Index.	9	3
ADJ_PKR	.bsn	Peak rate adjustment factor for sediment routing in the subbasin (tributary channels)	9	0
SOL_ALB	.sol	Moist soil albedo.	9	0
ALPHA_BNK	.rte	Baseflow alpha factor for bank storage (days).	8	0
LAT_TIME	.hru	Lateral flow travel time (days).	7	4
PHU_PLT	.mgt	Total number of heat units or growing degree days needed to bring plant to maturity (IGRO = 1)	6	4
DEEPT	.gw	Initial depth of water in the deep aquifer (mm).	6	4
CH_K1	.sub	Effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium (mm/h).	6	1
TRNSRCH	.bsn	Fraction of transmission losses from main channel that enter deep aquifer.	6	0
CH_N1	.sub	Manning's "n" value for the tributary channels.	5	2
DEP_IMP	.hru	Depth to impervious layer in soil profile (mm).	4	2
DEPIMP_BSN	.bsn	Depth to impervious layer for modeling perched water tables (mm)	4	2
MSK_CO2	.bsn	Calibration coefficient used to control impact of the storage time constant for low flow (where low flow is when river is at 0.1 bankfull depth).	4	0
CH_S2	.rte	Average slope of main channel along the channel length (m/m)	4	0
SOL_ZMX	.sol	Maximum rooting depth of soil profile (mm).	3	3
FFCB	.bsn	Initial soil water storage expressed as a fraction of field capacity water content.	3	2
GWHT	.gw	Initial groundwater height (m).	3	2
GW_SPYLD	.gw	Specific yield of the shallow aquifer (m3/m3).	3	1
SOL_CBN	.sol	Organic carbon content (% soil weight).	3	1
EVRCR	.bsn	Reach evaporation adjustment factor.	3	1
MSK_CO1	.bsn	Calibration coefficient used to control impact of the storage time constant for normal flow (where normal flow is when river is at bankfull depth).	3	0
GDRAIN_BSN	.bsn	Drain tile lag time (hours).	3	0
CH_S1	.sub	Average slope of tributary channels (m/m).	3	0

<sup>1000</sup> Los colores en la cantidad de estudios en los que se modifica cada parámetro quieren mostrar la magnitud de los valores más visualmente, yendo de verde oscuro a rojo, al ir de valores más grandes a valores más pequeños. Los parámetros sugeridos para la solución de problemas de ajuste por la documentación técnica de SWAT [218] (ver Figura 3-11) se encuentran marcados en negrita. En color azul se identifican los parámetros que están relacionados con una de las fuentes más fiables de información introducida, la información topográfica, al oscurecer el tono del azul se muestra que se considera más fiable el valor del parámetro definido por la información introducida que en otros parámetros. Al marcar los parámetros con fuente de color rojo, se indica que son parámetros que no se han descartado antes de realizar el proceso de calibración. Al marcar con amarillo anaranjado, se indica que el parámetro se descartó erróneamente al no aparecer en el archivo Absolute\_SWAT\_Values.txt de SWAT-CUP, pensando que no se disponía de información sobre el rango de valores posibles para poder proceder a su calibración, mientras, en amarillo claro, se indica que el rango de valores iniciales del parámetro en el modelo sin calibrar respecto al rango de valores posibles no permitía realizar ninguna variación del valor del parámetro. Los archivos .bsn incluyen información a nivel cuenca ("Basin"), los archivos .gw incluyen información de la hidrología subterránea ("Groundwater"), los archivos .hru incluyen información a nivel de "Hydrologic Response Units" (HRUs), los archivos .mgt incluyen información de manejo a nivel de HRUs ("Management"), los archivos .rte incluyen información del cauce principal, los archivos .sol incluyen información sobre el suelo ("Soil"), y los archivos .sub incluyen información a nivel de subcuenca ("Subbasin").

Tabla 4-6 Parámetros modificados para calibrar el modelo SWAT en los estudios consultados.

(continuación)

Parámetro	Archivo	Significado	Aparición en artículos revisados	De los cuales, en estudios geográficamente cercanos
<b>SNO_SUB</b>	.sub	Initial snow water content (mm).	2	2
<b>BIO_MIN</b>	.mgt	Minimum plant biomass for grazing (kg/ha)	2	1
<b>RSDIN</b>	.hru	Initial residue cover (kg/ha).	2	1
<b>LAT_SED</b>	.hru	Sediment concentration in lateral flow and groundwater flow (mg/l).	2	0
<b>ANION_EXCL_BSN</b>	.bsn	Fraction of porosity from which anions are excluded	2	0
<b>SLSOIL</b>	.hru	Slope length for lateral subsurface flow (m).	2	0
<b>TDRAIN_BSN</b>	.bsn	Time to drain soil to field capacity (hours).	2	0
<b>ANION_EXCL</b>	.sol	Fraction of porosity (void space) from which anions are excluded.	2	0
<b>CH_D</b>	.rte	Average depth of main channel.	2	0
<b>SNOEB</b>	.sub	Initial snow water content in elevation band (mm).	1	1
<b>ELEVB</b>	.sub	Elevation at the center of the elevation band (m).	1	1
<b>ELEVB_FR</b>	.sub	Fraction of subbasin area within the elevation band.	1	1
<b>CNCOEF</b>	.bsn	Plant ET curve number coefficient.	1	0
<b>CN_FROZ</b>	.bsn	Frozen curve number active	1	0
<b>CH_W2</b>	.rte	Average width of main channel at top of bank (m).	1	0
<b>MSK_X</b>	.bsn	Weighting factor controlling relative importance of inflow rate and outflow rate in determining water storage in reach segment.	1	0
<b>DDRAIN_BSN</b>	.bsn	Depth to subsurface drain (mm).	1	0
<b>BIO_INIT</b>	.mgt	Initial dry weight biomass (kg/ha)	1	0
<b>FILTERW</b>	.mgt	Width of edge-of-field filter strip (m)	1	0
<b>SOL_ROCK</b>	.sol	Rock fragment content (% soil weight).	1	0
<b>ALPHA_BF_D</b>	.gw	Alpha factor for groundwater recession curve of the deep aquifer (1/days)	1	0
<b>IABSTR</b>	.bsn	Initial abstraction on impervious cover (mm).	1	0
<b>CH_W1</b>	.sub	Average width of tributary channels (m).	1	0
<b>CH_WDR</b>	.rte	Channel width-depth ratio (m/m).	1	0
<b>SED_CON</b>	.hru	Sediment concentration in runoff, after urban BMP is applied (ppm)	1	0
<b>SOL_CRK</b>	.sol	Potential or maximum crack volume of the soil profile expressed as a fraction of the total soil volume.	1	0
<b>CH_L2</b>	.rte	Length of main channel (km).	1	0

<sup>1022</sup>Los colores en la cantidad de estudios en los que se modifica cada parámetro quieren mostrar la magnitud de los valores más visualmente, yendo de verde oscuro a rojo, al ir de valores más grandes a valores más pequeños.

Los parámetros sugeridos para la solución de problemas de ajuste por la documentación técnica de SWAT [218] (ver Figura 3-11) se encuentran marcados en negrita. En color azul se identifican los parámetros que están relacionados con una de las fuentes más fiables de información introducida, la información topográfica, al oscurecer el tono del azul se muestra que se considera más fiable el valor del parámetro definido por la información introducida que en otros parámetros. Al marcar los parámetros con fuente de color rojo, se indica que son parámetros que no se han descartado antes de realizar el proceso de calibración. Al marcar con amarillo anaranjado, se indica que el parámetro se descartó erróneamente al no aparecer en el archivo Absolute\_SWAT\_Values.txt de SWAT-CUP, pensando que no se disponía de información sobre el rango de valores posibles para poder proceder a su calibración, mientras, en amarillo claro, se indica que el rango de valores iniciales del parámetro en el modelo sin calibrar respecto al rango de valores posibles no permitía realizar ninguna variación del valor del parámetro. Los archivos .bsn incluyen información a nivel cuenca ("Basin"), los archivos .gw incluyen información de la hidrología subterránea ("Groundwater"), los archivos .hru incluyen información a nivel de "Hydrologic Response Units" (HRUs), los archivos .mgt incluyen información de manejo a nivel de HRUs ("Management"), los archivos .rte incluyen información del cauce principal, los archivos .sol incluyen información sobre el suelo ("Soil"), y los archivos .sub incluyen información a nivel de subcuenca ("Subbasin").

Tras haber eliminado de los 537 parámetros recopilados inicialmente, los parámetros que no están presentes en el "Parameter Browser" utilizado para añadir parámetros en el archivo "Par\_inf.txt" del apartado "Calibration Inputs" de SWAT-CUP, los parámetros que no están presentes en la base de datos del modelo ni en los archivos de la carpeta TxtInOut del modelo, los parámetros que vienen dados inequívocamente por la información input más fiable (elevaciones, pendientes, longitud de las pendientes, etc.), los parámetros que están prácticamente únicamente relacionados con la contaminación del agua y los parámetros de los que no se dispone información sobre el rango de valores absolutos que pueden alcanzar (no presentes en el archivo Absolute\_SWAT\_Values.txt), han quedado 143 parámetros del total susceptibles de ser calibrados. De estos 143 parámetros, uno de ellos, SOL\_ALB (.sol, "Moist soil albedo"), ha sido eliminado porque el rango de variación posible era nulo, dados los valores configurados para los diferentes suelos en el modelo SWAT sin calibrar y el rango de valores aceptables.

Tras haber realizado las iteraciones de 20 simulaciones modificando únicamente un parámetro por cada iteración, se han recopilado en la Tabla 4-7 los datos del comportamiento del modelo para la mejor simulación de cada iteración respecto a los valores observados. En ésta se puede ver la mejora o no del comportamiento respecto al modelo original (valores en verde de los estadísticos descriptivos en los que se da una mejora) que ha supuesto la mejor simulación para cada uno de los parámetros modificados individualmente. Los parámetros se encuentran ordenados en función del comportamiento del modelo que se ha alcanzado al modificarlos, estando los primeros los que con cuya modificación se ha alcanzado un mejor comportamiento.

Se observa que los parámetros que mayor mejora del modelo han supuesto por orden de importancia son: SOL\_AWC (.sol; "Average available water capacity of the soil layer (including rock fragments) (mm H<sub>2</sub>O/mm soil)"), SOL\_Z (.sol; "Depth from soil surface to bottom of layer"), CO<sub>2</sub> (.sub; "Carbon dioxide concentration"), SOL\_CBN (.sol; "Organic carbon content"), LAI\_INIT (.mgt, Planting; "Initial leaf area index"), ESCO (.hru; "Soil evaporation compensation factor"), ANION\_EXCL (.sol; "Fraction of porosity (void space) from which anions are excluded"), GWQMN (.gw; "Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)"), GW\_REVAP (.gw; "Groundwater "revap" coefficient"), USLE\_P (.mgt; "USLE equation support practice (P) factor") y USLE\_K (.mgt; "USLE equation soil erodibility (K) factor"). Otros parámetros que también han dado buenos resultados serían CNOP (.mgt, Planting; "SCS runoff curve number for moisture condition"), CANMX (.hru; "Maximum canopy storage"), CNOP (.mgt, Harvest and Kill; "SCS runoff curve number for moisture condition"), LAT\_TTIME (.hru; "Lateral flow travel time") y CN2 (.mgt; "SCS runoff curve number for moisture condition II"). De todos los parámetros nombrados, solo CO<sub>2</sub> (.sub), CNOP (.mgt, Planting) y CNOP (.mgt, Harvest and Kill) no han sido utilizados en ninguno de los 110 estudios del meta-análisis realizado (ver Tabla 4-2). Aún así, solo 5 de estos 16 parámetros nombrados (CN2.mgt, GW\_REVAP.gw, ESCO.hru, SOL\_AWC.sol y GWQMN.gw), se encuentran en el top 16 de los parámetros contemplados en el meta-análisis y habiéndose utilizado en más de la mitad de los estudios. CN2 (.mgt) es el parámetro que más ha empeorado su posición respecto al orden estipulado con el meta-análisis. En el lado opuesto, se encuentran, además de los no utilizados en otros estudios previamente citados, los parámetros ANION\_EXCL (.sol), SOL\_CBN (.sol), LAI\_INIT (.mgt) y SOL\_Z (.sol), que han mejorado mucho su posición respecto al orden estipulado con el meta-análisis, tanto para los estudios del total de cuencas como para los de las cuencas más cercanas.



Muchos de estos parámetros están relacionados con propiedades del suelo y de la cubierta que regulan la retención de agua y con ello la generación de escorrentía, así como con la recarga de acuíferos. En este sentido, varios parámetros relacionados con la capacidad del suelo para proporcionar agua y nutrientes a las plantas han sido los que más impacto han tenido en la mejora del ajuste del modelo durante la calibración. La importancia de introducir información edafológica de calidad ya se había vislumbrado en el estudio sobre el impacto de utilizar unos u otros inputs en el [apartado 4.1.2](#), así como en algunos estudios consultados [248] [249] [250]. De hecho, en Yang *et al.* (2014) [251], Ankenbauer *et al.* (2017) [252] y Schütte *et al.* (2021) [253], se habla concretamente de la importancia del contenido de materia orgánica y la capacidad de retención de agua de los suelos en el comportamiento hidrológico de las cuencas. Más sorprendente podría parecer la importancia de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, pero se podría deber a su impacto en el grado de apertura de los estomas y sus implicaciones en la conductancia estomática y, por tanto, en la transpiración, así como en el crecimiento de la vegetación y el índice de área foliar [254] [255].

Estos hechos cobran más sentido si se tiene en cuenta que en el modelo no se ha introducido información sobre la hidrogeología, el manejo de la cubierta del suelo, ni las concentraciones de CO<sub>2</sub>, que a priori no se suelen considerar un parámetro a calibrar sino un input a introducir. Y que, por otro lado, está el hecho de que la información de suelo introducida en el modelo, probablemente sea el input con más incertidumbre introducido, dada la escala de la información disponible, la variabilidad espacial intrínseca de éste, y el proceso de codificado realizado. Es decir, el margen de mejora de estos parámetros por la falta de información o la baja adecuación de la información introducida posiblemente sea el motivo principal por lo que estos parámetros cobran tanta importancia en este estudio, ya que su calibración ha ayudado a mejorar sus valores de partida. A su vez, este hecho mostraría la relevancia de introducir estos inputs en el modelo y con una calidad adecuada.

Esto podría estar ocurriendo también con los parámetros relacionados con la densidad de la vegetación y su grado de frondosidad (índice de área foliar, por ejemplo). Ya que en este estudio, al no disponerse de información más allá de la tipología de la vegetación dominante para los diferentes periodos en los que se disponía información de las categorías de cubiertas y usos de suelo presentes, se ha utilizado la información que venía predefinida para cada tipología de cubierta desde la base de datos de SWAT, lo que a su vez, también genera mucha incertidumbre

en cuanto a una correcta caracterización de la estructura de los tipos de vegetación presentes en la cuenca de estudio pese a que la información de cubiertas introducida sea fiable. Por ello, su calibración supliría en parte esa falta de especificidad de los valores para la cuenca de estudio.

Esta casuística, en la que se observa la importancia de la densidad de la vegetación y su grado de frondosidad en el ajuste del modelo, además, podría reforzar la hipótesis del fuerte impacto que podría tener la gestión forestal en el ciclo hidrológico de la cuenca, una de las potenciales hipótesis a comprobar mediante la simulación de diferentes escenarios una vez validado el modelo, dada la importancia que tiene la variación y correcta calibración de estos parámetros relacionados con estas tipologías de gestión.

Por su parte, la importancia del contenido de CO<sub>2</sub>, juntamente con la importancia de las características de las cubiertas del suelo, la materia orgánica del suelo y la erosión, reforzaría la idea de simular escenarios no solo de cambio climático y de gestión forestal, sino de cambio global en un sentido más amplio, como se hace, por ejemplo, en Gunn *et al.* (2021) [256], donde se implementan cambios en la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> en la simulación de escenarios de cambio climático. Esta implementación de sus cambios cobra especial importancia si se tiene en cuenta que la concentración media de CO<sub>2</sub> en la atmósfera crece año tras año, habiendo aumentado un 47% respecto a los valores pre-industriales (se toma como referencia el año 1750) a fecha de 2019, y que, estos valores eran los valores más elevados en los últimos 2 millones de años hasta entonces, con una alta confianza en esta predicción según el IPCC (2021) [257]. Sin embargo, a este respecto, según Wu *et al.* (2012) [258], el modelo SWAT podría sobrestimar el impacto del aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la modificación de la escorrentía, ya que no acaba de representar bien el incremento del índice de área foliar que podría suponer y, con ello, la interceptación de la luz y del agua, y otros procesos relacionados.

Tabla 4-7 Estudio del comportamiento del modelo SWAT para la cuenca de estudio y el periodo de calibración alcanzado con la mejor simulación de las modificaciones individuales de los parámetros seleccionados para ser modificados y comparación con el del modelo sin calibrar.

Table with columns: Identificación (Parámetro, Archivo, Tipo de modificación), Rango de modificación (Umbral inferior, Umbral superior), Estadísticos descriptivos sobre el comportamiento del modelo (p-factor, r-factor, R2, NS, BR2, MSE, SSQR, PBIAS (%), KGE, RSR, MNS, VOL\_FR, t-stat, p-value, rel\_Mean, rel\_StDev), and Orden según comportamiento alcanzado mediante su modificación. Rows include parameters like SOL\_AWC, SOL\_Z, CO2, SOL\_CBN, LAI\_INIT, ESCO, ANION\_EXCL, GW\_QMNM, GW\_REVAP, USLE\_P, USLE\_K, CNOP, CANMX, CNOP, LAT\_TTIME, CN2, ADJ\_PKR, BIOMIX, DECR\_MIN, SLSOIL, CH\_D, TIMP, CH\_K2, RSDIN, FFCB, DDRAIN\_BSN, DDRAIN, CH\_N2, BIO\_INIT, OV\_N, SURLAG, LAI\_INIT, CH\_N1, CH\_K1, ESCO, RCHRG\_DP, EPCO, SMFMN, SFTMP, ALPHA\_BF, SPCON, GW\_DELAY, SPEXP, CH\_W2, PRF, CH\_SIDE, CH\_COV2, SNOSOCON.

Los títulos de los estadísticos en azul, indican que el valor ideal del estadístico es 0, mientras que si están en negra indican que tienen asociado uno de los criterios de valoración del comportamiento del modelo (PEC) definidos por Moriasi et al. (ver Tabla 3-6) [108] [109]. Por otro lado, la fuente de color rojo en los valores de los estadísticos, indica que su valor es peor que el de la mejor simulación de la iteración inmediatamente anterior, mientras que si están coloreados de color verde, se indica que su valor es mejor o igual que el devuelto para el modelo sin calibrar (valores configurados originalmente). Si estos estuvieran en negra significaría que es la simulación que mejor comportamiento muestra para este estadístico y si están en cursiva que es la segunda mejor. Los umbrales marcados en amarillo indican modificaciones del rango posible de valores del parámetro respecto a lo que estipulaba el archivo Absolute\_SWAT\_Values.txt de SWAT-CUP. Los parámetros sugeridos para la solución de problemas de ajuste por la documentación técnica de SWAT [218] (ver Figura 4-6) tienen su nombre marcado en negrita. Mientras que si su nombre tiene la fuente de color rojo, se indica que es uno de los parámetros utilizados en alguno de los estudios consultados en el meta-análisis realizado (ver Tabla 4-6). El tipo de modificación "V", significa "Replace", es decir, cambiar todos los valores originales del parámetro por uno nuevo dentro del rango de variación estipulado, y "r" (marcado en naranja), "Relative change", es decir, multiplicar todos los valores originales por uno más un valor dentro del rango de variación estipulado. R², NS, BR², MSE, SSQR, PBIAS, KGE, RSR y MNS son estadísticos definidos en la Tabla 3-7. VOL\_FR, indica la fracción del balance total de agua que se predice, mientras p-factor y r-factor, indican la fracción de datos observados que se encuentran dentro de la envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP (95PPU) y la anchura de esta envolvente, respectivamente. t-stat y p-value muestran la sensibilidad de los parámetros. rel\_Mean y rel\_StDev, indican la variación absoluta entre las medias de los caudales observados y de los caudales simulados y la variación absoluta entre la desviación típica de los caudales observados y de los caudales simulados, respectivamente. En la coloración de los valores de orden (en función del comportamiento del modelo), el verde corresponde a la 1ª posición y el rojo a la última. En gris se han marcado las casillas para las que no se tienen datos o no aplica la columna. El valor de 0.05 de p-value para el modelo sin calibrar (con fuente de color azul), ha sido un valor ficticio de referencia para valorar la sensibilidad del modelo a la modificación de cada uno de los parámetros. En archivo (ver Tabla 4-6), "Plant.": Planting; "H. & K.": Harvest and Kill; "Till.": Tillage.







Por otro lado, en la Figura 4-5, se identifican las principales tipologías de errores de ajuste, según la documentación técnica de SWAT [218] y la guía de la aplicación “SWAT Calibration Helper - Monthly v1.0” [217] (ver Figura 3-11), detectadas en el ajuste entre los valores de caudal mensual observados y los valores simulados con el modelo sin calibrar para el periodo de calibración en la cuenca de estudio. Éstas serían la “Issue2 – Overprediction of flow” (sobreestimación de caudales) y la “Issue 4 – Peakier at peaks, flatter at baseflow” (amplificación de máximos y mínimos), las cuales se van sucediendo a lo largo del periodo de calibración. En la Tabla 4-8, se hace un resumen de las problemáticas detectadas en la Figura 4-5 y las modificaciones sugeridas para estas problemáticas según la documentación técnica de SWAT [218] (ver Figura 3-11). Comparando la Tabla 4-8 con la Tabla 4-7, se observa que en las 20 primeras posiciones de la Tabla 4-7, se incluyen el 42,86% de los parámetros que se sugiere modificar para corregir la problemática “2.1 High surface flow than reality”, el 66,67% de los parámetros que se sugiere modificar para corregir la problemática “2.2 High baseflow than reality”, el 100% de los parámetros que se sugiere modificar para corregir la problemática “2.3 Less evapotranspiration losses than reality” (las tres problemáticas teóricamente pueden causar la “Issue 2”), así como el 42,31% de los parámetros que se sugiere modificar para corregir la “Issue 4”. De hecho, los parámetros SOL\_AWC.sol y ESCO.hru, en la 1ª y 6ª posición respectivamente, son los parámetros sugeridos para corregir la magnitud de las pérdidas por evapotranspiración (“2.3 Less evapotranspiration losses than reality”), los parámetros GWQMN.gw y GW\_REVAP.gw, en la 8ª y 9ª posición respectivamente, son 2 de los 3 parámetros sugeridos para corregir el caudal base como posible causa de la “Issue 2” (“2.2 High baseflow than reality”), mientras los parámetros, CNOP.mgt (Planting), CN2.mgt y CNOP.mgt (Harvest and Kill), en la 12ª, 14ª y 16ª posición respectivamente, son 3 de los 7 parámetros sugeridos para corregir la escorrentía como posible causa de la “Issue 2” (“2.1 High surface flow than reality”), cubriendo estos el 58,33% de los parámetros que se sugiere modificar para corregir la “Issue 2”. Y por otra parte, los parámetros SOL\_Z.sol, CANMX.hru, LAT\_TTIME.hru y SLSOIL.hru, en la 2ª, 13ª, 15ª y 20ª posición respectivamente, además de los parámetros citados anteriormente en referencia a la “Issue 2”, son parámetros que se sugiere modificar para corregir la “Issue 4”.

Tabla 4-8 Recopilación de la tipología de errores de ajuste (según la documentación técnica de SWAT) identificados en el ajuste entre los caudales mensuales observados y simulados para el periodo de calibración en la cuenca de estudio (Figura 4-5), las modificaciones de parámetros sugeridas por la documentación técnica de SWAT para solucionarlas (Figura 3-11), y la posición de cada uno de estos parámetros en la Tabla 4-7.

Fuente: Elaboración propia a partir de [217] y [218].

		Parámetros a ajustar	
		Parámetro relacionado con	Orden según la mejora del comportamiento del modelo conseguido, respecto al modelo sin calibrar, al realizar 20 simulaciones modificando únicamente este parámetro (ver Tabla 4-7)
Parámetro			
Archivo en el que se encuentra			
		SOL_AWC	Infiltration
		SOL_Z	Infiltration
		ESCO	Infiltration
		GWOMN	Infiltration
		GW_REVP	Infiltration
		GNOP	Infiltration
		CANMX	Infiltration
		GNOP	Infiltration
		LAT_TIME	Lateral flow
		CN2	Infiltration
		SLSOIL	Lateral flow
		FCB	Infiltration
		DDRAIN_BSN	Infiltration
		ALPHA_BF	Baseflow
		ALPHA_BNK	Baseflow
		SHALST	Infiltration
		GW_SPLYD	Infiltration
		GDRAIN_BSN	Infiltration
		CNCOEF	Infiltration
		SOL_CRK	Infiltration
		GNOP	Infiltration
		REVAPMN	Infiltration
		TDRAIN_BSN	Infiltration
		SOL_K	Infiltration
		URBANC2	Daba error al simular
		CN_FROZ	Descartado erróneamente

Problemáticas a solucionar	Modificaciones sugeridas (Orden de mejora del comportamiento)																			
	[Amarillo: sugeridas] [Verde: mejor comportamiento] [Rojo: mayor mejora]																			
Issue 2 -Overprediction of flow	2.1 High surface flow than reality	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	2.2 Higher baseflow than reality	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	2.3 Less evapotranspiration losses than reality	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Issue 4: Peakier at peaks, flatter at baseflow	4.1 Higher surface flow than reality	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔
	4.2 Lower baseflow than reality	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔

En amarillo las modificaciones sugeridas. Los colores en el orden según la mejora del comportamiento quieren mostrar más visualmente, yendo de verde oscuro a rojo, los parámetros que mayor mejora produjeron.

Tras realizar las iteraciones con las diferentes combinaciones de parámetros a modificar se han recopilado en la Tabla 4-9 los estadísticos descriptivos sobre el ajuste de los valores simulados respecto a los valores observados así como la valoración del modelo por parte de los que tienen asociado un criterio de valoración (ver Tabla 3-6). También se han recopilado las gráficas con las series temporales de caudales simulados y observados de SWAT-CUP, exponiéndose en las Figuras 4-5 a 4-12, las que pertenecen a las iteraciones cuya mejor simulación ha mostrado un mejor ajuste o destacan en algún estadístico con criterio de valoración asociado. En ellas, junto a los caudales observados y simulados, se muestra una franja verde correspondiente al intervalo de confianza "95PPU" (95% Prediction Uncertainty) en el que se localizan los valores abarcados por el 95% de la distribución de probabilidad de los caudales de salida para el conjunto de simulaciones de la iteración. Se busca que en esa envolvente se localice la máxima cantidad de valores de caudal observados, sin que su anchura sea excesiva. Además, en la Figura 4-13 se muestran los gráficos de dispersión entre caudales observados y simulados elaborados con los datos de salida de SWAT-CUP de las mismas iteraciones para las que se han recopilado las gráficas anteriores.



Se ha observado que las combinaciones que han mostrado un mejor comportamiento son las que han combinado 11 parámetros (SOL\_AWC.sol, SOL\_Z.sol, CO2.sub, SOL\_CBN.sol, LAI\_INIT.mgt (Planting), ESCO.hru, ANION\_EXCL.sol, GWQMN.gw, GW\_REVAP.gw, USLE\_P.mgt y USLE\_K.sol) (ver Figuras 4-6, 4-8, 4-11 y 4-14) y 5 parámetros (SOL\_AWC.sol, SOL\_Z.sol, CO2.sub, SOL\_CBN.sol y LAI\_INIT.mgt). Se ha detectado cierta mejora al calibrar el modelo con estas combinaciones de parámetros, especialmente en la similitud de los picos, tanto en magnitud como en temporalidad; sin embargo, visualmente, se ha observado que no se comportan mejor que el modelo sin calibrar durante todo el periodo de calibración, como se observa por ejemplo en los últimos 3 meses (del 141 al 144). Ver Figuras 4-5 a 4-10, y Figura 4-13.

También se ha observado que a partir de haber incorporado USLE\_K, al incorporar más parámetros, el ajuste ha empeorado. En este sentido, hay que destacar que los parámetros CNOP.mgt (Planting) y CNOP.mgt (Harvest and Kill), al incorporarlos en la combinación hacían que ésta diera error, por lo que se piensa que debe producirse alguna incompatibilidad numérica en la variación de éstos conjuntamente con los anteriores 11 parámetros y 12 parámetros respectivamente.

Esta casuística de incompatibilidades numéricas en la variación conjunta de parámetros se considera que se acrecienta con el número de parámetros modificados en una misma iteración, así como la posibilidad de obtener buenos resultados con combinaciones erróneas de procesos, por ello, se considera aplicable el principio de parsimonia, siendo más deseables, a igual comportamiento alcanzado, las iteraciones con un número menor de parámetros modificados.

Una vez determinado que las combinaciones de 11 y 5 parámetros eran las que mostraban mejor comportamiento en una primera ronda de iteraciones con las diferentes combinaciones de parámetros, se realizó una iteración de 500 simulaciones con la combinación de 11 parámetros y otra iteración de las mismas características con la combinación de 5 parámetros. Con los nuevos rangos recomendados de valores para los diferentes parámetros obtenidos de cada una de estas iteraciones así como de todas las que se habían realizado previamente, se definieron unos nuevos intervalos de variación para la calibración de los parámetros. Estos rangos se definieron a partir de los valores umbral más estrictos de los diferentes rangos obtenidos. En este proceso se tiene que



tener cuidado de que no se dejen fuera del nuevo rango de variación los valores de modificación de las mejores simulaciones de las iteraciones en las que se han logrado los mejores comportamientos del modelo, las iteraciones iniciales con 11 y 5 parámetros. A continuación se realizó una nueva iteración de 500 simulaciones, tanto con la combinación de 11 parámetros como con la de 5 parámetros, pero implementando los nuevos rangos de variación.

Las iteraciones que combinan 11 parámetros han logrado en general una pendiente muy similar a 1, el ajuste ideal, en los gráficos de dispersión entre caudales observados y simulados (ver Figura 4-13) y con un  $R^2$  elevado (mayor o, en el peor caso, muy similar, a 0.85). De ellas, la que se ha realizado con 220 simulaciones, ha destacado por encima de todas las otras iteraciones (con los mismos o diferentes parámetros modificados), según muchos de los estadísticos sobre el comportamiento del modelo recopilados, así como es la única que logra que su mejor simulación obtenga la máxima calificación del comportamiento del modelo para todos los estadísticos que tienen un criterio definido (ver Tablas 3-6 y 4-9). En este sentido de valoración, la iteración realizada modificando 5 parámetros y 100 simulaciones, ha sido la siguiente mejor. De esta iteración también destaca su valor de p-factor, uno de los estadísticos definidos por Abbaspour en SWAT-CUP [130] para valorar la cantidad de valores observados que se encuentran dentro de la envolvente 95PPU, uno de los objetivos de la calibración mediante el algoritmo SUFI-2, con el segundo mejor valor de todas las combinaciones de parámetros, sin embargo no alcanza el umbral recomendado por Abbaspour [130] de 0.7 para la simulación de caudales.

Cabe mencionar que se ha observado que la anchura del intervalo de confianza definido por la envolvente 95PPU, en general, se ampliaba al aumentar el número de parámetros a modificar, y se reducía al reducir el rango de variación, lo cual era de esperar, al aumentar y disminuir, respectivamente, las posibilidades de variación.

También se ha observado que a medida que crece la magnitud de los caudales observados, el ajuste entre caudales observados y simulados se reduce, y que aunque se ha reducido en cierta medida este desajuste con el proceso de calibración, este hecho sigue siendo relevante como se observa en la Figura 4-13. Esto podría sugerir que el modelo se podría comportar mejor para escenarios de déficit hídrico que para escenarios de sobreabundancia hídrica.

Como curiosidad, las iteraciones que combinan 11 parámetros incluyen el 100% de los parámetros que se sugiere modificar en la documentación técnica de SWAT [218] para corregir la problemática “2.3 Less evapotranspiration losses than reality” y el 66,67% de los parámetros que se sugiere modificar para corregir la problemática “2.2 High baseflow than reality”, incluyendo así el 33,33% de los parámetros que se sugiere modificar para solucionar la tipología de errores de ajuste “Issue 2”, así como el 19,23% de los parámetros que se sugiere modificar para solucionar la tipología de errores “Issue 4”, la otra tipología de errores de ajuste identificada. Por su parte, las iteraciones que combinan 5 parámetros incluyen el 50% de los parámetros que se sugiere modificar para corregir la problemática “2.3 Less evapotranspiration losses than reality”, incluyendo así el 8,33% de los parámetros que se sugiere modificar para solucionar la tipología de errores de ajuste “Issue 2”, así como el 7,69% de los parámetros que se sugiere modificar para solucionar la tipología de errores “Issue 4” (ver Figuras 3-11 y 4-5, y Tabla 4-8). Este hecho podría indicar que uno de los principales aspectos en los que fallaba el modelo sin calibrar era en la estimación de las pérdidas por evapotranspiración, como parecía vislumbrarse también en el análisis de los parámetros cuya modificación había resultado en una mayor mejora del comportamiento del modelo respecto al comportamiento del modelo sin calibrar.

Por otro lado, solo las mejores simulaciones con las iteraciones en las que se modificaban 6 parámetros en 120 simulaciones, 12 parámetros en 240 simulaciones y 14 parámetros en 280 simulaciones no han alcanzado el objetivo mínimo de “Bueno” en la calificación del comportamiento del modelo para el periodo de calibración en todos los estadísticos descriptivos con criterios de evaluación (ver Tablas 3-6 y 4-9).

Finalmente, se considera, que en función del ajuste general alcanzado mediante sus mejores simulaciones y el comportamiento del modelo, y habiendo cumplido los objetivos mínimos de comportamiento para el periodo de calibración, el orden para llevar a cabo el proceso de validación (proceso iterativo que se detiene cuando la iteración cumple con el objetivo mínimo de “Satisfactorio” en la calificación del comportamiento del modelo para el periodo de validación, ver Tabla 3-6), realizando iteraciones con los valores de los parámetros iguales a los valores con los que se consiguió su mejor simulación en el periodo de calibración, sería:

- 1) iteración con 11 parámetros y 220 simulaciones,
- 2) iteración con 5 parámetros y 100 simulaciones,

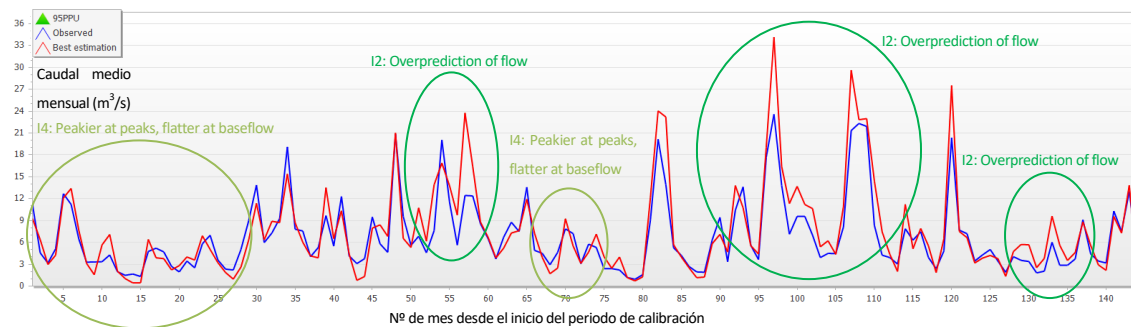
- 3) iteración con 11 parámetros y 500 simulaciones con el rango nuevo de variación,
- 4) iteración con 5 parámetros y 500 simulaciones con el rango nuevo de variación, e
- 5) iteración con 5 parámetros y 500 simulaciones con el rango original de variación.

A continuación, se considera que sería interesante que fueran la iteración con 8 parámetros y 160 simulaciones y la iteración con 4 parámetros y 80 simulaciones, al haber destacado en los valores de R<sup>2</sup> y MNS; y de PBIAS y de relación entre caudal promedio observado y simulado; respectivamente.

Tabla 4-9 Estudio del comportamiento del modelo SWAT para la cuenca de estudio y el periodo de calibración que se ha alcanzado con la mejor simulación de cada combinación de parámetros modificados y comparación con el comportamiento del modelo sin calibrar.

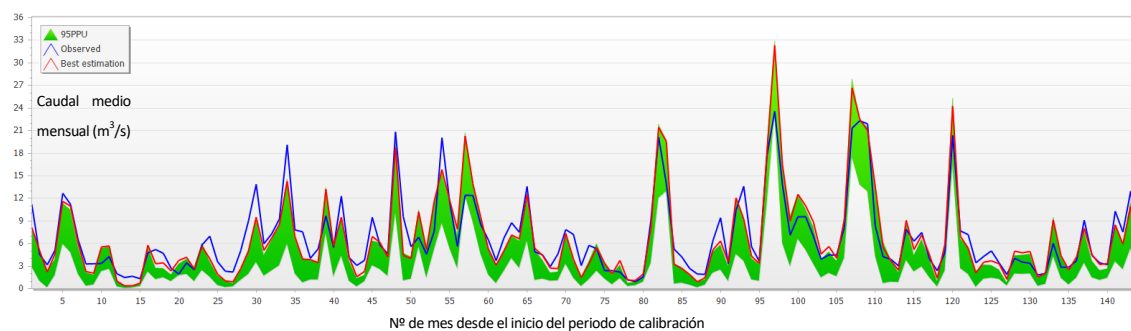
Último parámetro modificado (nº de parámetros modificados)	Archivo en el que se encuentra	Número de simulaciones	Estadísticos descriptivos sobre el comportamiento del modelo														Model "Performance Evaluation Criteria" (PEC)				Orden según el comportamiento del modelo alcanzado		
			p-factor	r-factor	RZ	NS	brZ	MSE	SSQR	PBIAS (%)	KGE	RSR	MNS	VOL_FR	rel_Mean	rel_StdDev	Clasificación según RZ	Clasificación según NSE	Clasificación según PBIAS	Clasificación según RSR	Orden 1	Orden 2 – con 1as 500 simulaciones	Orden 3 – con 2as 500 simulaciones.
Original (modelo sin calibrar)		1	0.24	0	0.85	0.72	0.7421	6.7	2.4	-10.8	0.72	0.53	0.52	0.90	0.1085	0.2414	B	B	S	B	14	16	18
<b>SOL_AWC</b> (1)	.sol	20	0.44	0.23	0.86	0.78	0.7694	5.4	1.8	3.4	0.78	0.47	0.55	1.04	0.0337	0.2049	MB	B	MB	MB	9	11	13
<b>SOL_Z</b> (2)	.sol	40	0.42	0.29	0.86	0.79	0.7934	5.0	1.5	4.3	0.81	0.45	0.56	1.04	0.0425	0.1663	MB	B	MB	MB	5	6	8
<b>CO2</b> (3)	.sub	60	0.63	0.55	0.86	0.80	0.7968	4.8	1.4	4.4	0.81	0.44	0.57	1.05	0.044	0.1663	MB	B	MB	MB	4	5	7
<b>SOL_CBN</b> (4)	.sol	80	0.37	0.56	0.86	0.77	0.7636	5.5	1.5	-0.3	0.78	0.48	0.55	1.00	0.0029	0.211	MB	B	MB	MB	8	10	12
<b>LAI_INIT</b> (5)	.mgt (Plant.)	100	0.53	0.57	0.86	0.81	0.8277	4.6	1.1	6.7	0.85	0.44	0.57	1.07	0.0674	0.1176	MB	MB	B	MB	2	2	2
		500	0.41	0.60	0.85	0.80	0.7981	4.9	1.2	0.6	0.82	0.45	0.58	1.01	0.0059	0.1582	B	B	MB	MB		3	5
		500*	0.35	0.28	0.85	0.81	0.8240	4.7	1.1	5.3	0.85	0.44	0.58	1.06	0.0538	0.1217	B	MB	B	MB			4
<b>ESCO</b> (6)	.hru	120	0.32	0.56	0.86	0.76	0.7769	5.8	2.2	11.7	0.76	0.49	0.49	1.13	0.1173	0.1927	MB	B	S	MB	11	13	15
<b>ANION_EXCL</b> (7)	.sol	140	0.30	0.54	0.86	0.78	0.7882	5.4	1.6	9.5	0.79	0.47	0.51	1.11	0.0953	0.1744	MB	B	B	MB	10	12	14
<b>GWQMN</b> (8)	.gw	160	0.40	0.66	0.87	0.79	0.7673	5.2	1.7	-1.9	0.77	0.46	0.58	0.98	0.0191	0.215	MB	B	MB	MB	7	9	11
<b>GW_REVP</b> (9)	.gw	180	0.51	0.78	0.85	0.80	0.8260	4.8	1.3	8.1	0.84	0.44	0.56	1.09	0.0806	0.1197	B	B	B	MB	3	4	6
<b>USLE_P</b> (10)	.mgt	200	0.40	0.70	0.85	0.78	0.7912	5.3	1.3	4.5	0.81	0.47	0.56	1.05	0.044	0.1623	B	B	MB	MB	6	8	10
<b>USLE_K</b> (11)	.sol	220	0.42	0.70	0.86	0.81	0.8147	4.6	1.0	3.0	0.84	0.43	0.58	1.03	0.0293	0.1379	MB	MB	MB	MB	1	1	1
		500	0.44	0.73	0.85	0.79	0.7952	5.1	1.5	4.5	0.82	0.46	0.57	1.05	0.0455	0.1602	B	B	MB	MB		7	9
		500*	0.41	0.46	0.85	0.80	0.8122	4.8	1.1	2.9	0.84	0.44	0.58	1.03	0.0279	0.1379	B	B	MB	MB			3
<b>CANMX</b> (12)	.hru	240	0.45	0.74	0.32	0.26	0.1349	18.0	2.7	12.9	0.48	0.86	0.17	1.15	0.129	0.2535	NS	NS	S	NS	15	17	19
<b>LAT_TTIME</b> (13)	.hru	260	0.45	0.95	0.80	0.70	0.7527	7.4	1.8	9.7	0.76	0.55	0.43	1.11	0.0968	0.1886	B	B	B	B	12	14	16
<b>CN2</b> (14)	.mgt	280	0.42	0.98	0.80	0.66	0.7900	8.4	3.8	21.4	0.73	0.59	0.39	1.27	0.2141	0.1339	B	S	NS	B	13	15	17

<sup>NS</sup> Los títulos de los estadísticos en azul, indican que el valor ideal del estadístico es 0, mientras que si están en negra indican que tienen asociado uno de los criterios de valoración del comportamiento del modelo (PEC) definidos por Moriasi *et al.* (ver Tabla 3-6) [108] [109]. Por otro lado, la fuente de color rojo en los valores de los estadísticos, indica que su valor es peor que el de la mejor simulación de la iteración inmediatamente anterior, mientras que si están coloreados de color verde, se indica que su valor es mejor o igual que el devuelto para el modelo sin calibrar (valores configurados originalmente). Si estos estuvieran en negra significaría que es la simulación que mejor comportamiento muestra para este estadístico y si están en cursiva que es la segunda mejor. Los parámetros sugeridos para la solución de problemas de ajuste por la documentación técnica de SWAT [218] (ver Figura 3-11) tienen su nombre marcado en negra. Mientras que si su nombre tiene la fuente de color rojo, se indica que es uno de los parámetros utilizados en alguno de los estudios consultados en el meta-análisis realizado (ver Tabla 4-6). R<sup>2</sup>, NS, br<sup>2</sup>, MSE, SSQR, PBIAS, KGE, RSR y MNS son estadísticos definidos en la Tabla 3-7. VOL\_FR, indica la fracción del balance total de agua que se predice, mientras p-factor y r-factor, indican la fracción de datos observados que se encuentran dentro de la envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP (95PPU) y la anchura de esta envolvente, respectivamente. rel\_Mean y rel\_StdDev, indican la variación absoluta entre las medias de los caudales observados y de los caudales simulados y la variación absoluta entre la desviación típica de los caudales observados y de los caudales simulados, respectivamente. En la coloración de los valores de orden (en función del comportamiento del modelo), el verde corresponde a la 1ª posición y el rojo a la última. En gris se han marcado las casillas para las que no aplica la columna. En archivo (ver Tabla 4-6), "Plant.": Planting, "\*" en el número de simulaciones indica que se hicieron con los nuevos rangos de variación de los parámetros (a partir de los resultados de las iteraciones previas). En los criterios de valoración del comportamiento del modelo ("PEC"), "NS" significa "No Satisfactorio", "S" "Satisfactorio", "B" "Bueno" y "MB" "Muy Bueno", estos se colorean de rojo a verde oscuro a modo de código semafórico, de peor a mejor valoración, y están en negra si mejoran la calificación del modelo sin calibrar. Los números del orden en cursiva indican que la iteración no cumple los criterios de aceptación del comportamiento del modelo para el periodo de calibración (ver apartado 3.1.3), y al estar en negra, que se trata de configuraciones prioritarias en el proceso de validación.



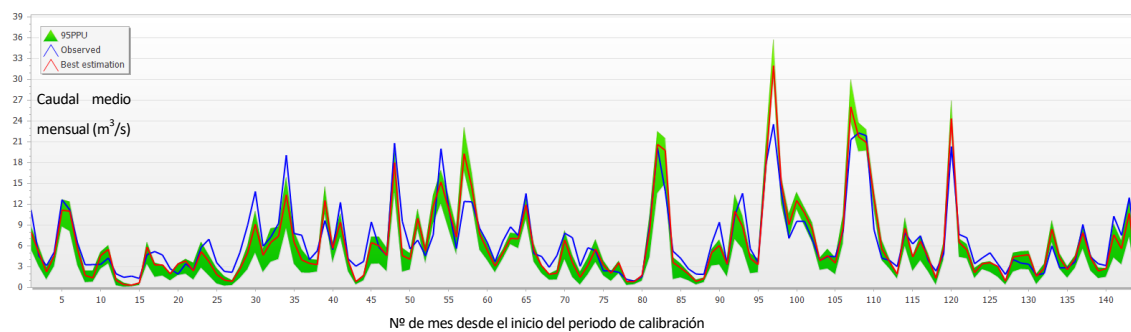
<sup>NOTA</sup> "95PPU": "95% Prediction Uncertainty" (envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP). En este gráfico, al corresponder a una única simulación, no se representa.

Figura 4-5 Comparación entre los caudales observados y los simulados con el modelo sin calibrar (periodo de calibración). Incluye la identificación de errores de ajustes según la documentación técnica de SWAT y la guía de la aplicación "SWAT Calibration Helper - Monthly v1.0".



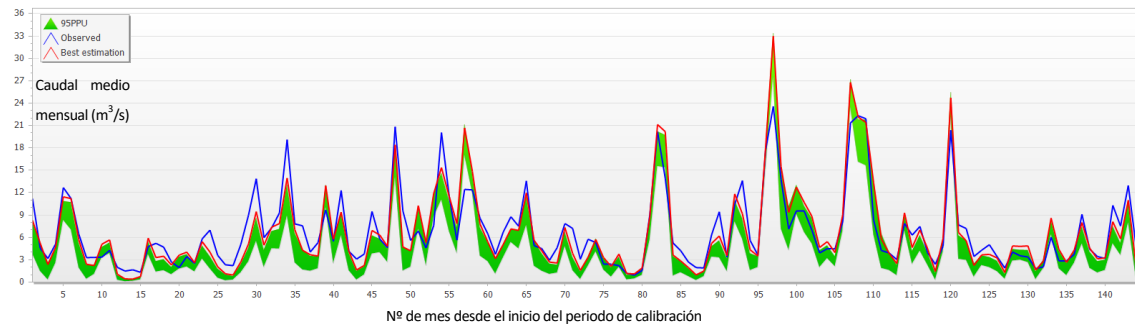
<sup>NOTA</sup> "95PPU": "95% Prediction Uncertainty" (envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP).

Figura 4-6 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 11 parámetros en 220 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales (periodo de calibración).



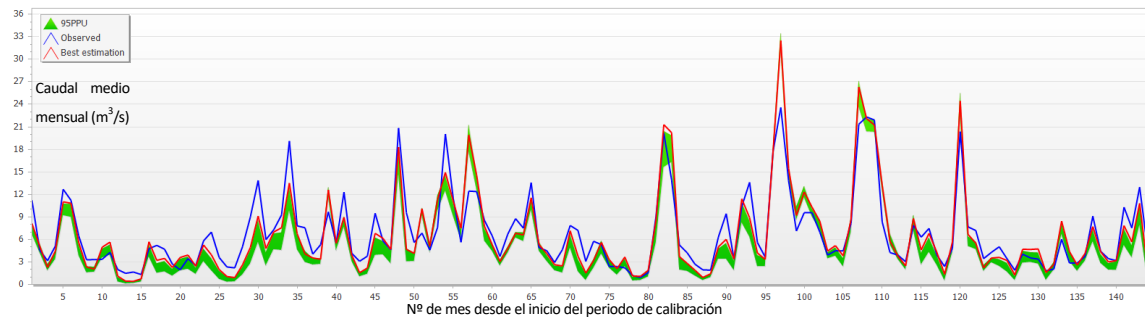
<sup>NOTA</sup> "95PPU": "95% Prediction Uncertainty" (envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP).

Figura 4-7 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 5 parámetros en 100 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales (periodo de calibración).



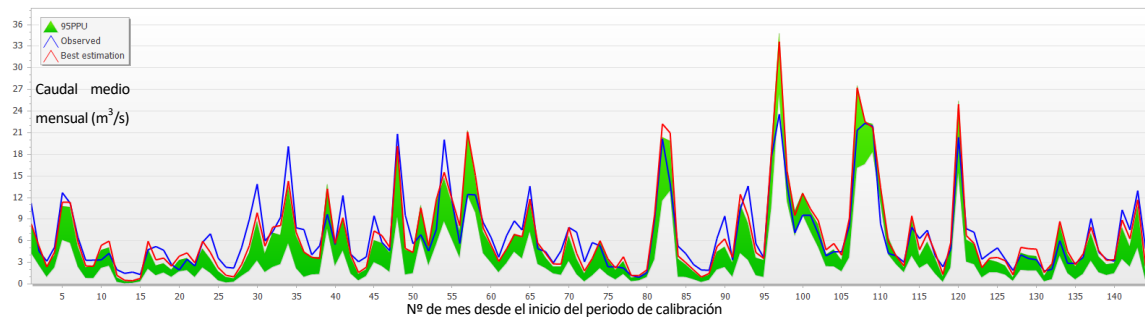
Nota: "95PPU": "95% Prediction Uncertainty" (envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP).

Figura 4-8 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 11 parámetros en 500 simulaciones dentro de los rangos de variación modificados según las iteraciones previas (periodo de calibración).



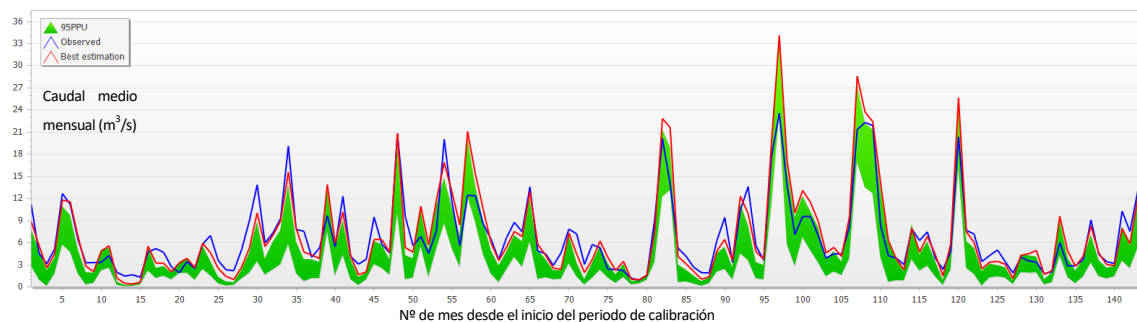
Nota: "95PPU": "95% Prediction Uncertainty" (envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP).

Figura 4-9 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 5 parámetros en 500 simulaciones dentro de los rangos de variación modificados según las iteraciones previas (periodo de calibración).



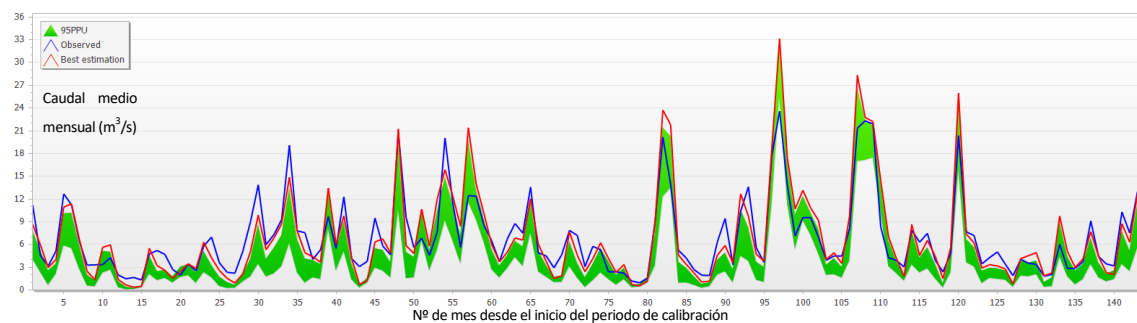
Nota: "95PPU": "95% Prediction Uncertainty" (envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP).

Figura 4-10 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 5 parámetros en 500 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales (periodo de calibración).



<sup>NOTA</sup> "95PPU": "95% Prediction Uncertainty" (envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP).

Figura 4-11 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 8 parámetros en 160 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales (periodo de calibración).



<sup>NOTA</sup> "95PPU": "95% Prediction Uncertainty" (envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP).

Figura 4-12 Comparación entre los caudales observados y los simulados con la mejor simulación modificando 4 parámetros en 80 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales (periodo de calibración).

A modo informativo, el valor del estadístico "d" (ver Tabla 3-7) respecto al comportamiento del modelo en el periodo de calibración, tanto para la mejor simulación modificando 11 parámetros en 220 simulaciones como modificando 5 parámetros en 100 simulaciones es de 0.96, respecto al valor de 0.94 del modelo sin calibrar. En los 3 casos, el comportamiento del modelo según el estadístico "d" se valoraría como "Muy bueno" según Moriasi *et al.* [108] (ver Tabla 3-6).

Por último, comentar que para el periodo de calibración, la mejor simulación de la iteración modificando 11 parámetros en 220 simulaciones, ha supuesto una mejora media de los estadísticos descriptivos sobre el comportamiento del modelo del 33,67%, mientras que la mejor simulación de la iteración modificando 5 parámetros en 100 simulaciones, ha supuesto una mejora media de los estadísticos descriptivos sobre el comportamiento del modelo del 32,48%.

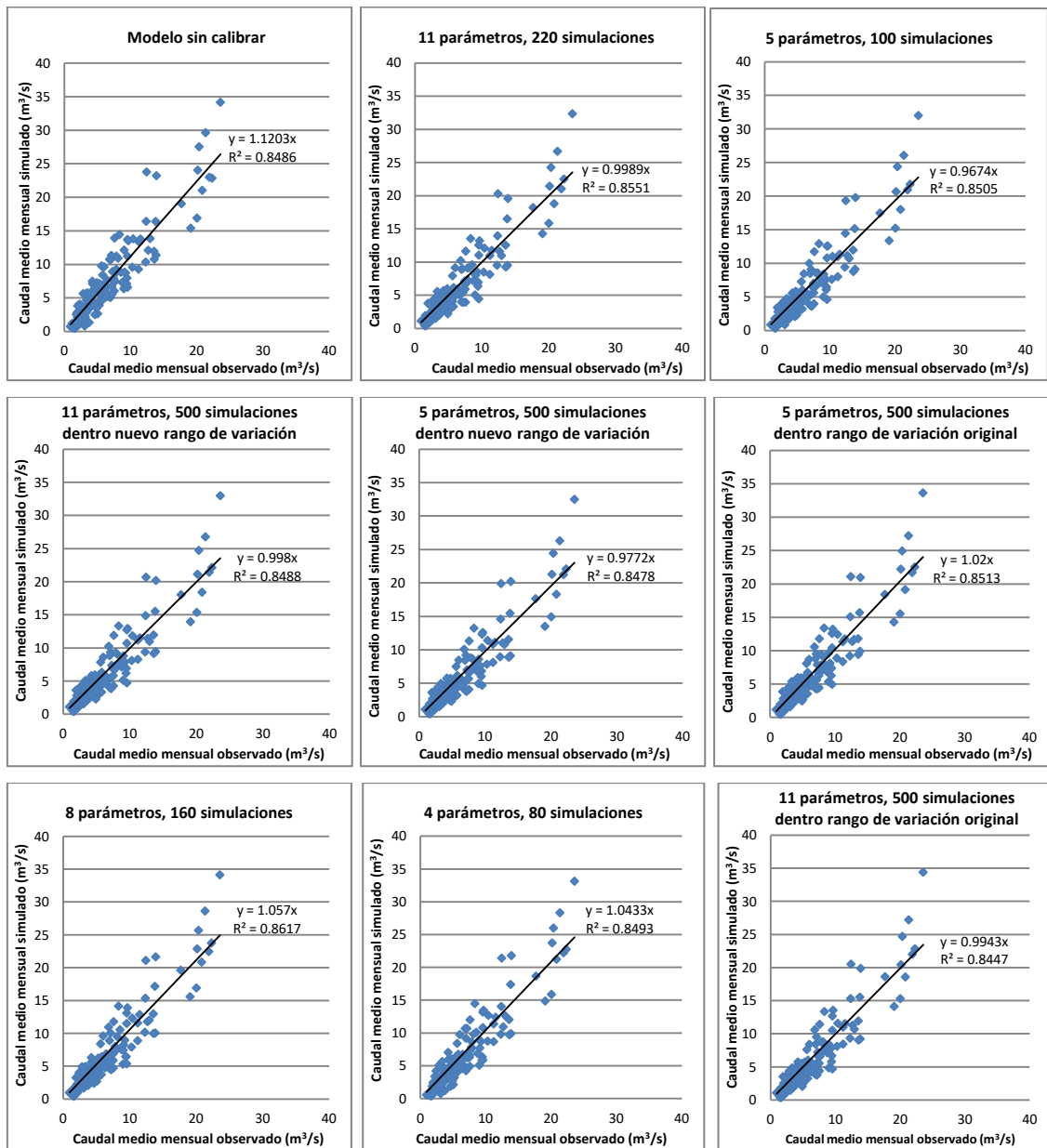


Figura 4-13 Gráficos de dispersión entre caudales observados y simulados para la cuenca de estudio en el periodo de calibración según diferentes configuraciones del modelo SWAT.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos con SWAT-CUP.

#### 4.1.4. Validación

Tras haber corrido el modelo SWAT para el periodo de validación con su correspondiente periodo de calentamiento, haber creado su correspondiente proyecto de SWAT-CUP/SUFI-2, haber configurado los parámetros con los valores de las simulaciones a validar y haber realizado una simulación con cada una de estas configuraciones, se han recopilado en la Tabla 4-10 los estadísticos descriptivos sobre el comportamiento del modelo respecto a los valores observados, así como la valoración del modelo por parte de los que tienen asociado un criterio de valoración (ver Tabla 3-6). También se han recopilado las gráficas con las series temporales de caudales simulados y observados de SWAT-CUP, exponiéndose en las Figuras 4-14 a 4-16 la iteración con el modelo sin calibrar y las iteraciones que mejor se han comportado para el periodo de validación. Además, en la Figura 4-17 se muestran los gráficos de dispersión entre caudales observados y simulados elaborados con los datos de salida de SWAT-CUP de las iteraciones para las que se han recopilado las gráficas anteriores.

En la Tabla 4-10, se observa que la única simulación que cumpliría el objetivo mínimo de “Satisfactorio” en la calificación del comportamiento del modelo para el periodo de validación en todos los estadísticos descriptivos con criterio de clasificación (ver Tabla 3-6), sería la resultante de la iteración con los valores de modificación de los parámetros correspondientes a la mejor simulación para el periodo de calibración de la iteración en la que se modificaban 5 parámetros en 100 simulaciones. De hecho, una vez validada esta simulación, se hubiera detenido el proceso iterativo de validación (previamente, se había realizado un primer paso fallido de validación con la iteración con los valores de modificación de los parámetros correspondientes a la mejor simulación para el periodo de calibración de la iteración en la que se modificaban 11 parámetros en 220 simulaciones). Sin embargo, desconfiando en cierta medida del orden preestablecido en función del comportamiento de las diferentes iteraciones en el periodo de calibración, se intentó validar el resto de iteraciones, pero no se encontraron mejores resultados.

El hecho de que la iteración con menores parámetros modificados sea la que marque la calibración del modelo es una buena noticia, ya que al introducir variaciones más puntuales, se reducen las posibilidades de que se estén produciendo combinaciones erróneas de procesos en el modelo que fueran las responsable de los buenos valores de salida y que crearían un ajuste



“inestable” y específico para los periodos validados y calibrados. De hecho, para evitar estas casuísticas de soluciones con buenos resultados numéricos a partir de combinaciones erróneas de procesos, Abbaspour [130] recomienda utilizar el máximo número de funciones objetivo, al representar cada una de ellas diferentes procesos. Al no haber sido posible contar con información fiable de otras variables para realizar este estudio utilizando más de una función objetivo, esto reduce en cierta medida esa incertidumbre asociada.

En la Figura 4-17 se observa que con los parámetros modificados según la mejor simulación de la iteración realizada modificando 5 parámetros en 100 simulaciones para el periodo de calibración, en el periodo de validación se ha conseguido una pendiente entre los caudales observados y los simulados, que aunque lejos aún, es más similar a 1, el valor ideal, que con el modelo sin calibrar y que con la configuración de la iteración de 11 parámetros modificados durante 220 simulaciones.

En este sentido, comparando las Figuras 4-14 y 4-15, se observa una mejora del ajuste general en los picos de caudal respecto al modelo sin calibrar. Sin embargo, hay que reseñar que el modelo sigue sobreestimando en gran medida el pico máximo de caudal (ver Figura 4-15), así como se observa que, a medida que crece la magnitud de los caudales observados, el ajuste entre caudales observados y simulados se reduce, casuística que pese a haberse reducido en parte con la calibración, sigue siendo significativa (ver Figura 4-17).

Este hecho se tendrá que tener en cuenta al utilizar el modelo calibrado para simular escenarios en un futuro, especialmente si incluyeran picos elevados, si hace falta, validándolo nuevamente en algún periodo con datos de caudal fiables donde se hayan producido/se produzcan picos de similar magnitud, ya que en el periodo de calibración y validación utilizados, los caudales más frecuentes han tenido una magnitud muy inferior.

Cabe resaltar, que el modelo ha tenido un peor comportamiento en el periodo de validación que en el periodo de calibración, ya que no solo los ajustes entre caudales observados y simulados por las simulaciones de las diferentes calibraciones del modelo, sino que el propio modelo sin calibrar, también ha tenido un peor comportamiento.

De hecho, se ha producido un cambio en las tendencias de las simulaciones con diversas configuraciones del modelo, ya que en el periodo de calibración algunas de ellas tenían una pendiente de ajuste entre caudales observados y simulados ligeramente inferior a 1, es decir, se

subestimaban los caudales en cierta medida, mientras que para el periodo de validación, tienen una pendiente superior a 1, es decir, se sobreestiman los caudales.

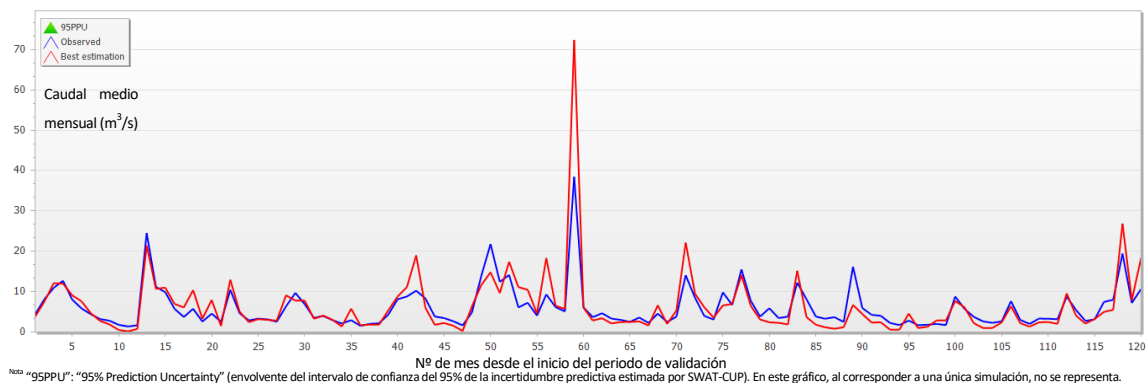
Esta casuística de empeoramiento del ajuste y de teórica sobreestimación de caudales podría venir dada por la distorsión que produce el caudal extraordinario de noviembre de 1982. Para tener una idea de su impacto, se han creado nuevos gráficos de dispersión de caudales observados y simulados en el periodo de validación obviando los datos de ese mes (ver Figura 4-18). Se observa, que la pendiente de ajuste entre caudales observados y simulados, se encuentra mucho más cerca de 1 para todas las simulaciones, y especialmente para el modelo sin calibrar, comportándose mejor en este sentido para esta situación teórica (ya que la realidad es que se produjo el caudal elevado y dada la inercia del sistema no sería realista obviar esos datos), lo que podría confirmar que se produce esta distorsión.

Sin embargo, esto no implica *per se* que el modelo sin calibrar sea el que mejor se comporte para este periodo, ya que además de ser una situación ficticia, pese a la mejor pendiente de ajuste, el  $R^2$  de la línea de ajuste para el modelo sin calibrar sería el más inferior de las 3 calibraciones mostradas. De hecho, la  $R^2$  de la línea de ajuste empeora para todos los casos al eliminar ese caudal, indicando una menor correlación entre caudales simulados y observados. Por otra parte, sí que podría poner en valor la importancia de tener series completas de datos, ya que se muestra el fuerte impacto que puede tener la eliminación de un único dato (los datos de un mes) en la valoración del modelo.

Tabla 4-10 Estudio del comportamiento del modelo SWAT para la cuenca de estudio y el periodo de validación que se ha alcanzado al modificar los parámetros del modelo según las diferentes modificaciones de parámetros de las simulaciones seleccionadas en la fase de calibración del modelo y comparación con el comportamiento del modelo sin calibrar.

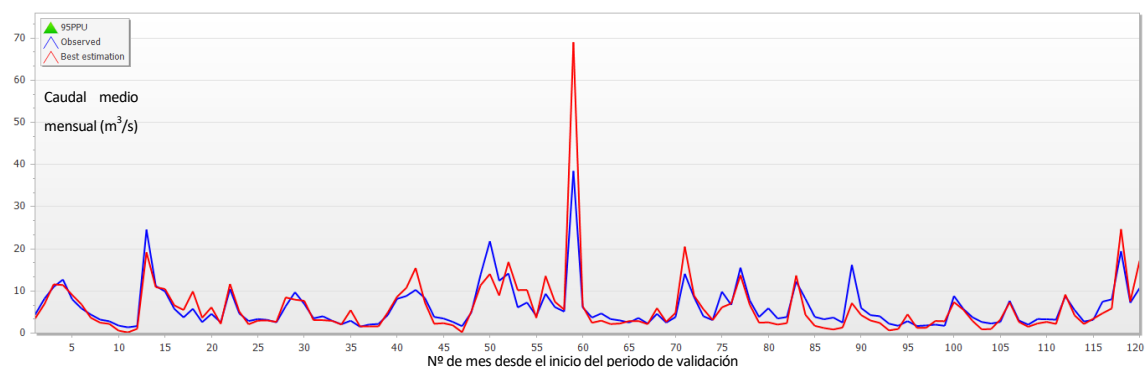
Último parámetro modificado (nº de parámetros modificados)	Archivo en el que se encuentra	Número de simulaciones	Estadísticos descriptivos sobre el comportamiento del modelo														Model "Performance Evaluation Criteria" (PEC)				Orden según el comportamiento del modelo alcanzado	
			p-factor	r-factor	R <sup>2</sup>	NS	br <sup>2</sup>	MSE	SSQR	PBIAS (%)	KGE	RSR	MNS	VOL_FR	rel_Mean	rel_StdDev	Clasificación según R <sup>2</sup>	Clasificación según MSE	Clasificación según PBIAS	Clasificación según RSR	Orden 1 (validación)	Orden 2 (calibración + validación)
Original (modelo sin calibrar)		1	0.17	0	0.80	0.40	0.5864	16.0	10.0	-4.4	0.46	0.78	0.43	0.96	0.0443	0.5241	B	NS	MB	NS	5	8
USLE_K (11)	.sol	220	0.23	0	0.80	0.50	0.6210	13.0	8.4	-3.5	0.55	0.71	0.49	0.97	0.0345	0.4374	B	NS	MB	NS	2	2
LAI_INIT (5)	.mgt (Plant.)	100	0.19	0	0.81	0.53	0.6325	13.0	8.1	0.1	0.57	0.68	0.51	1.00	0.0016	0.4200	B	S	MB	S	1	1
USLE_K (11)	.sol	500*	0.22	0	0.80	0.50	0.6206	13.0	8.6	-4.1	0.54	0.71	0.50	0.96	0.0411	0.4432	B	NS	MB	NS	3	3
LAI_INIT (5)	.mgt (Plant.)	500*	0.20	0	0.81	0.50	0.6200	13.0	8.8	-4.9	0.54	0.71	0.50	0.95	0.0493	0.4470	B	NS	MB	NS	4	4
LAI_INIT (5)	.mgt (Plant.)	500	0.22	0	0.80	0.36	0.5851	17.0	12	-16.3	0.43	0.8	0.43	0.86	0.1642	0.5299	B	NS	NS	NS	7	5
GWQMN (8)	.gw	160	0.18	0	0.80	0.37	0.5806	17.0	12	-10.4	0.44	0.79	0.44	0.91	0.1034	0.5434	B	NS	S	NS	6	6
SOL_CBN (4)	.sol	80	0.23	0	0.80	0.23	0.5579	21.0	14	-22.5	0.35	0.88	0.36	0.82	0.225	0.6012	B	NS	NS	NS	8	7

\* Los títulos de los estadísticos en azul, indican que el valor ideal del estadístico es 0, mientras que si están en negrita indican que tienen asociado uno de los criterios de valoración del comportamiento del modelo (PEC) definidos por Moriasi *et al.* (ver Tabla 3-6) [108] [109]. Por otro lado, la fuente de color rojo en los valores de los estadísticos, indica que su valor es peor que el de la mejor simulación de la iteración inmediatamente anterior, mientras que si están coloreados de color verde, se indica que su valor es mejor o igual que el devuelto para el modelo sin calibrar (valores configurados originalmente). Si estos estuvieran en negrita significaría que es la simulación que mejor comportamiento muestra para este estadístico y si están en cursiva que es la segunda mejor. R<sup>2</sup>, NS, br<sup>2</sup>, MSE, SSQR, PBIAS, KGE, RSR y MNS son estadísticos definidos en la Tabla 3-7. VOL\_FR, indica la fracción del balance total de agua que se predice, mientras p-factor y r-factor, indican la fracción de datos observados que se encuentran dentro de la envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP (95PPU) y la anchura de esta envolvente, respectivamente. rel\_Mean y rel\_StdDev, indican la variación absoluta entre las medias de los caudales observados y de los caudales simulados y la variación absoluta entre la desviación típica de los caudales observados y de los caudales simulados, respectivamente. En la coloración de los valores de orden (en función del comportamiento del modelo), el verde corresponde a la 1ª posición y el rojo a la última. En gris se han marcado las casillas para las que no aplica la columna. En archivo (ver Tabla 4-6), "Plant.": Planting. "\*" en el número de simulaciones indica que se hicieron con los nuevos rangos de variación de los parámetros (a partir de los resultados de las iteraciones previas). En los criterios de valoración del comportamiento del modelo ("PEC"), "NS" significa "No Satisfactorio", "S" "Satisfactorio", "B" "Bueno" y "MB" "Muy Bueno", estos se colorean de rojo a verde oscuro a modo de código semafórico, de peor a mejor valoración, y están en negrita si mejoran la calificación del modelo sin calibrar. Los números del orden en cursiva indican que la iteración no cumple los criterios de aceptación del comportamiento del modelo para el periodo de calibración (ver apartado 3.1.3), al tener la fuente de color azul, se indica que estas iteraciones no habría hecho falta simularlas, y al estar en negrita, que se trata de la configuración de calibración elegida finalmente.



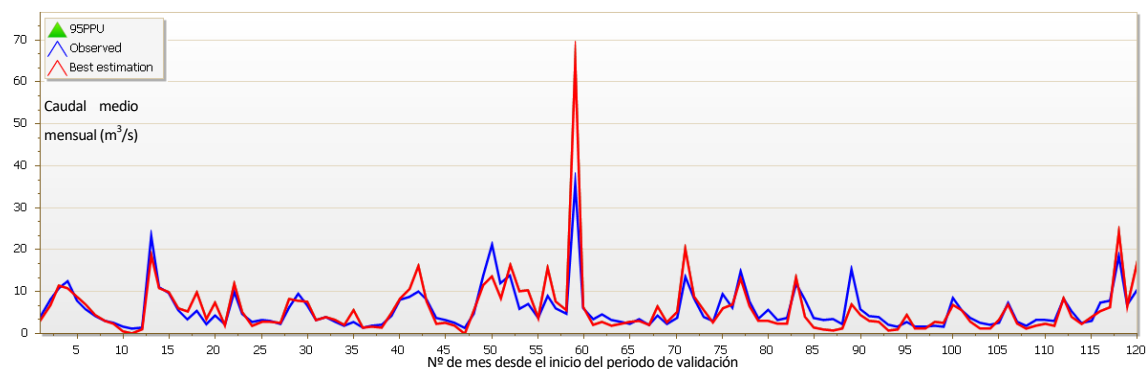
Nota: "95PPU": "95% Prediction Uncertainty" (envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP). En este gráfico, al corresponder a una única simulación, no se representa.

Figura 4-14 Comparación entre los caudales observados y los simulados para el periodo de validación con el modelo sin calibrar.



Nota: "95PPU": "95% Prediction Uncertainty" (envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP). En este gráfico, al corresponder a una única simulación, no se representa.

Figura 4-15 Comparación entre los caudales observados y los simulados para el periodo de validación con la configuración de la mejor simulación para el periodo de calibración modificando 5 parámetros en 100 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales.



Nota: "95PPU": "95% Prediction Uncertainty" (envolvente del intervalo de confianza del 95% de la incertidumbre predictiva estimada por SWAT-CUP). En este gráfico, al corresponder a una única simulación, no se representa.

Figura 4-16 Comparación entre los caudales observados y los simulados para el periodo de validación con la configuración de la mejor simulación para el periodo de calibración modificando 11 parámetros en 220 simulaciones dentro de los rangos de variación iniciales.

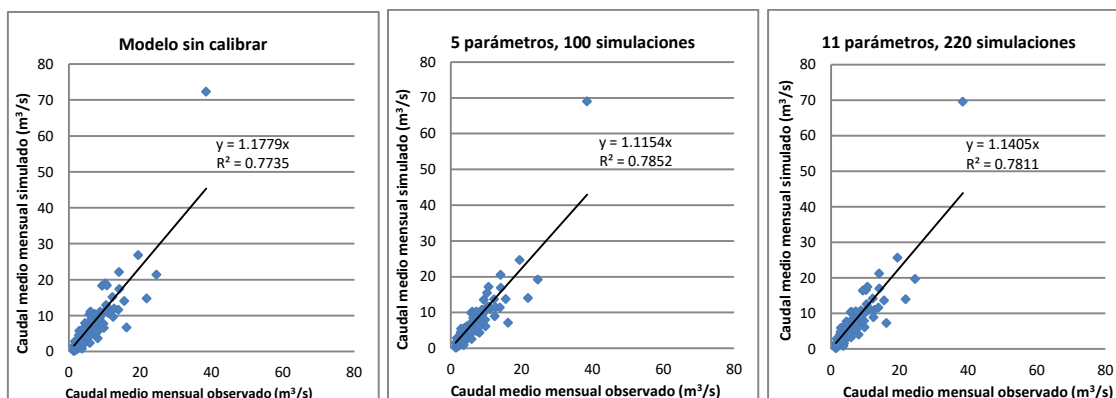


Figura 4-17 Gráficos de dispersión entre caudales observados y simulados para la cuenca de estudio en el periodo de validación según diferentes configuraciones del modelo SWAT.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos con SWAT-CUP.

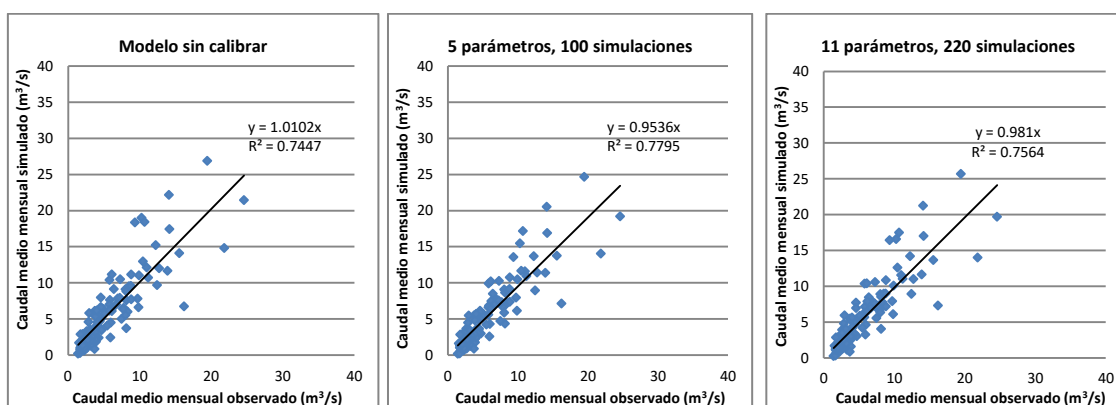


Figura 4-18 Gráficos de dispersión entre caudales observados y simulados para la cuenca de estudio en el periodo de validación según diferentes configuraciones del modelo SWAT (ejercicio ficticio: ajuste sin tener en cuenta los caudales observados y simulados de noviembre de 1982).

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos con SWAT-CUP.

A modo informativo, el valor del estadístico “d” (ver Tabla 3-7) respecto al comportamiento del modelo en el periodo de validación, para la simulación con las modificaciones de parámetros correspondientes a la mejor simulación modificando 5 parámetros en 100 simulaciones, es 0.92, mientras que con las simulaciones con las modificaciones de parámetros correspondientes a la mejor simulación modificando 11 parámetros en 220 simulaciones o con el modelo sin calibrar, es 0.91 y 0.90 respectivamente. En los 3 casos, el comportamiento del modelo según el estadístico “d” se valoraría como “Muy bueno” según Moriasi *et al.* [108] (ver Tabla 3-6).

Una vez validada la calibración, los parámetros a modificar mediante la funcionalidad “Edit Inputs and Run SWAT / SWAT Simulation / Manual Calibration Helper”) de QSWAT serán:

- **SOL\_AWC (.sol): 0.444773 (relative change)**  
Pasando de un rango de valores de [0, 0.176] mm H<sub>2</sub>O disponible /mm suelo  
a uno nuevo de [0, 0.254280048] mm H<sub>2</sub>O disponible /mm suelo
  
- **SOL\_Z (.sol): 0.7875 (relative change)**  
Pasando de un rango de valores de [0, 1000] mm de suelo  
a uno nuevo de [0, 1787.5] mm de suelo
  
- **CO2 (.sub): 316 (replace)**  
Pasando de un valor de 330 ppm de CO<sub>2</sub>  
a uno nuevo de 316 ppm de CO<sub>2</sub>
  
- **SOL\_CBN (.sol): 4.41853 (relative change)**  
Pasando de un rango de valores de [0, 1.7] % de carbono orgánico en suelo (masa)  
a uno nuevo de [0, 9.211501] % de carbono orgánico en suelo (masa)
  
- **LAI\_INIT (.mgt, {},1} (Planting)): 52.5 (replace)**  
Pasando de un valor de 0 m<sup>2</sup> hojas/m<sup>2</sup> suelo  
a uno nuevo de 5.25 m<sup>2</sup> hojas/m<sup>2</sup> suelo

Se verifica que se han obtenido valores y rangos de valores de los parámetros que podrían ser razonables para el entorno de la cuenca de estudio.

Por último, indicar que para el periodo de validación, la simulación con el modelo configurado con las modificaciones de valores, expuestas previamente, y correspondientes a la mejor simulación para el periodo de calibración de la iteración realizada modificando 5 parámetros en 100 simulaciones, ha supuesto una mejora media de los estadísticos descriptivos sobre el comportamiento del modelo del 28,05% respecto a la simulación con el modelo sin calibrar. Utilizando las modificaciones de valores de la mejor simulación para el periodo de calibración de la iteración realizada modificando 11 parámetros en 220 simulaciones, se habría alcanzado una mejora media de los estadísticos descriptivos sobre el comportamiento del modelo del 15,66% respecto a la simulación con el modelo sin calibrar.

## Conclusiones

Tras haber realizado el presente estudio, se concluye que el modelo SWAT es aplicable para la cuenca de montaña estudiada en términos de caudal, al haberse podido alcanzar un ajuste aceptable entre los valores simulados y observados con el modelo calibrado. Y además, se ha visto que no es insensible a los cambios de cubiertas y usos del suelo, por lo que podría utilizarse para escenarios de cambios de usos y cubiertas del suelo.

Sin embargo, se tendrá que tener cuidado al utilizar el modelo calibrado para simular escenarios que incluyan fuertes episodios mensuales de lluvia, ya que podría sobrevalorar los caudales. En tal caso sería deseable volver a validar el modelo si se dispusiera de datos de caudal fiables durante periodos que incluyan picos de caudales mensuales elevados.

También se ha comprobado que es fundamental la calidad de los inputs introducidos para configurar el modelo, en la línea del concepto "garbage in, garbage out", ya que con unos inputs mejores, se han conseguido mejoras del comportamiento del modelo muy importantes, incluso cercanas a las de la propia calibración en algunos casos. Aún así, el modelo ha demostrado ser bastante robusto, ya que incluso configurando el modelo con la mínima información meteorológica posible (precipitaciones y temperaturas mínimas y máximas), y sin haber sido calibrado, los valores simulados tenían un ajuste satisfactorio, al menos, en los periodos simulados con estas configuraciones (periodo de calibración).

Este hecho tiene una gran importancia, ya que una de las mayores dificultades encontradas para configurar y calibrar el modelo, ha sido encontrar la información mínima necesaria, especialmente de suelos y caudales, y más, si se exige cierta fiabilidad. Aún así, se ha observado que, a medida que avanza el tiempo, se dispone de más información y de mayor calidad. Sin embargo, también se han identificado posibles problemas de pérdida de homogeneidad de series temporales de datos al cambiar las condiciones en las que se han elaborado u obtenido a lo largo del tiempo que pueden hacer no recomendable la utilización de toda la longitud disponible de estas series.

Como posibles mejoras o pasos no realizados, se cree que, al menos:

- Se hubiera podido implementar la capa de cubiertas de suelo obtenida para toda la cuenca de estudio a partir de las ortofotos del vuelo americano de 1956-1957 a posteriori y estudiar si mejoraba el ajuste en el periodo de validación, especialmente en los primeros años. Ya que se ha visto que el ajuste era peor que en el periodo de calibración, en el que se localizaban más capas de usos del suelo. Se podría estudiar el intervalo mínimo de actualización de usos.
- Se hubieran podido probar combinaciones de parámetros a modificar sin respetar el orden de estos en función de la mejora que conllevaba su modificación individualmente, combinando libremente todos los parámetros cuya modificación individual haya supuesto una mayor mejora o tengan una mayor sensibilidad.
- Se hubiera podido intentar utilizar datos del área experimental de Vallcebre del IDAEA-CSIC, relacionados con la escorrentía, la interceptación, la evapotranspiración, la erosión, la humedad del suelo, etc., para validar, aunque fuese a nivel de la subcuenca correspondiente, un mayor número de funciones objetivo, y reducir así el riesgo de que se estén produciendo combinaciones erróneas de procesos al haber modificado parámetros al calibrar.
- Se hubiera podido estudiar el impacto en las simulaciones de SWAT de tener una tabla WGEN implementada a partir de todos los datos meteorológicos del periodo 1976-2021 (46 años de datos continuos) a implementarla siguiendo el estándar de normales climáticas, utilizando solo los datos de un periodo de 30 años, de 1976 a 2005 por ejemplo. O habiendo determinado variable por variable, y estación virtual por estación virtual, cuál era la longitud de datos meteorológicos a utilizar para que estas resultaran realmente representativas del clima del periodo correspondiente para su entorno.
- Se hubiera podido estudiar el impacto de no utilizar bandas de elevación en la configuración del modelo SWAT. Así como el impacto de no implementar clases de pendientes.
- Se podría intentar a partir de la batimetría y de datos históricos de nivel y de caudales de salida del embalse de la Baells, configurarlo como embalse en el modelo SWAT, y estudiar las diferencias de comportamiento respecto a no haberlo configurado, así como estudiar el coste-beneficio de implementarlo.
- Si se dispusiera de datos fiables de la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico en el entorno de la cuenca de estudio, se podría estudiar el impacto de implementarlos en el modelo SWAT o no, así como estudiar el coste-beneficio de implementarlos.



## Bibliografía

### Referencias bibliográficas

- [1] ACA, «Pla de gestió del districte de conca fluvial de Catalunya 2016-2021,» Generalitat de Catalunya, 2015.
- [2] OFC, «INDICADORS - Catalunya, un país de boscos.,» Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya, 2018. [En línea]. Available: <http://www.observatoriforestal.cat/resum-del-sector/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [3] J. Ibàñez y J. A. Burriel, «Ocupació del sòl a Catalunya : 3a edició del Mapa de Cobertes (MCSC-3),» CREA, 2009.
- [4] R. Poyatos, J. Latron y P. Llorens, «Land Use and Land Cover Change After Agricultural Abandonment,» *Mountain Research and Development*, vol. 23, pp. 362-368, 2003.
- [5] J. M. García-Ruiz, T. Lasanta, P. Ruiz-Flano, L. Ortigosa, S. White, C. González y C. Martí, «Land-use changes and sustainable development in mountain areas: a case study in the Spanish Pyrenees,» *Landscape Ecology*, vol. 11, pp. 267-277, 01 10 1996.
- [6] P. Serra, X. Pons y D. Saurí, «Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors,» *Applied Geography - APPL GEOGR*, vol. 28, pp. 189-209, 7 2008.
- [7] F. Gallart, J. Delgado, S. Beatson, H. Posner, P. Llorens y R. Marcé, «Analysing the effect of global change on the historical trends of water resources in the headwaters of the Llobregat and Ter river basins (Catalonia, Spain),» *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 36, pp. 655-661, 12 2011.
- [8] V. Acácio, F. S. Dias, F. X. Catry, M. Rocha y F. Moreira, «Landscape dynamics in Mediterranean oak forests under global change: understanding the role of anthropogenic and environmental drivers across forest types,» *Global Change Biology*, vol. 23, pp. 1199-

1217, 2017.

- [9] J. M. Bosch y J. D. Hewlett, «A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration,» *Journal of Hydrology*, vol. 55, pp. 3-23, 1982.
- [10] F. Gallart y P. Llorens, «Catchment Management under Environmental Change: Impact of Land Cover Change on Water Resources,» *Water International - WATER INT*, vol. 28, pp. 334-340, 9 2003.
- [11] C. Buendía, R. J. Batalla, S. Sabater, A. Palau y R. Marcé, «Runoff Trends Driven by Climate and Afforestation in a Pyrenean Basin,» *Land Degradation and Development*, vol. 27, pp. 823-838, 2016.
- [12] P. Pérez-Cutillas, M. F. Cataldo, D. A. Zema, J. De Vente y C. Boix-Fayos, «Efectos de la revegetación a escala de cuenca sobre el caudal y la evapotranspiración en ambiente mediterráneo. Cuenca del Taibilla (SE de España) Greening-up effects on streamflow and evapotranspiration in Mediterranean catchments. An example of Taibilla catchment (SE Spain),» *Bosque*, vol. 39, pp. 119-129, 2018.
- [13] J. M. García-Ruiz, J. I. López-Moreno, S. Vicente-Serrano, T. Lasanta y S. Beguería, «Mediterranean Water Resources in a Global Change Scenario,» *Earth-Science Reviews*, vol. 105, pp. 121-139, 04 2011.
- [14] V. Andréassian, «Waters and forests: from historical controversy to scientific debate,» *Journal of Hydrology*, vol. 291, pp. 1-27, 2004.
- [15] S. Beguería, J. I. López-Moreno, A. Lorente, M. Seeger y J. M. García-Ruiz, «Assessing the Effect of Climate Oscillations and Land-use Changes on Streamflow in the Central Spanish Pyrenees,» *Ambio*, vol. 32, pp. 283-6, 07 2003.
- [16] L. Zhang, W. R. Dawes y G. R. Walker, «Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale,» *Water Resources Research*, vol. 37, pp. 701-708,

2001.

- [17] T. Hatton y R. George, «The role of afforestation in managing dryland salinity,» de *Plantations, farm forestry and water: Workshop Proceedings, Publication No. 01/20*, Melbourne, 2001.
- [18] S. Castellari y B. Kurnik, «Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report.,» EEA Reports, 2017.
- [19] R. S. Kovats, R. Valentini, L. M. Bouwer, E. Georgopoulou, D. Jacob, E. Martin, M. Rounsevell y J. Soussana, «23. Europe,» *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 1267-1326, 2014.
- [20] J. P. Nunes, J. Seixas y N. R. Pacheco, «Vulnerability of water resources, vegetation productivity and soil erosion to climate change in Mediterranean watersheds,» *Hydrological Processes*, vol. 22, pp. 3115-3134, 2008.
- [21] X. Duran, M. J. Picó y L. Reales, «El Cambio Climático en cataluña. Resumen ejecutivo del Tercer informe sobre el cambio climático en Cataluña,» 2017.
- [22] J. A. López-Bustins, «Lluvias fuertes, pero mal repartidas. El caso del clima Mediterráneo,» *Biblio3W*, vol. 23, pp. 4-9, 2018.
- [23] OPCC-CTP, «El cambio climático en los Pirineos : impactos, vulnerabilidades y adaptación,» 2018.
- [24] J. I. López-Moreno, S. Vicente-Serrano, J. Zabalza, J. Revuelto, M. Gilaberte-Búrdalo, C. Azorin-Molina, E. Morán-Tejeda, J. M. García-Ruiz y C. Tague, «Respuesta hidrológica del Pirineo central al cambio ambiental proyectado para el siglo XXI,» *Pirineos*, vol. 169, p. e004, 12 2014.
- [25] IDESCAT, «Projeccions de la població a Catalunya 2013-2051,» 2015.

- [26] D. Hawtree, J. P. Nunes, J. J. Keizer, R. Jacinto, J. Santos, M. E. Rial-Rivas, A.-K. Boulet, F. Tavares-Wahren y K.-H. Feger, «Time series analysis of the long-term hydrologic impacts of afforestation in the Águeda watershed of north-central Portugal,» *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, pp. 3033-3045, 2015.
- [27] A. Iglesias, L. Garrote, F. Flores y M. Moneo, «Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean,» *Water Resources Management*, vol. 21, pp. 775-788, 01 2007.
- [28] R. Defries y K. Eshleman, «Land-Use Change and Hydrologic Processes: A Major Focus for the Future,» *Hydrological Processes*, vol. 18, pp. 2183-2186, 08 2004.
- [29] ACA, «RESOLUCIÓ TES/1549/2018, de 4 de juliol,» *Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya*, vol. 7659, nº 9.7.2018, pp. 1-16, 2018.
- [30] I. R. Calder, «Forests and water—Ensuring forest benefits outweigh water costs,» *Forest Ecology and Management*, vol. 251, pp. 110-120, 2007.
- [31] UN, «Plan estratégico de las Naciones Unidas para los bosques 2017-2030 y programa de trabajo cuatrienal del Foro de las Naciones Unidas sobre los Bosques para el período 2017-2020,» 2017.
- [32] UN, «Global Forest Goals and Targets of the UN Strategic Plan for Forests 2030,» 2019.
- [33] UN, «United Nations strategic plan for forests, 2017-2030,» 2016.
- [34] A. Del Campo, M. González-Sanchis, A. Lidón, A. García-Prats, C. Lull, I. Bautista, G. Ruíz-Pérez y F. Francés, «Ecohydrological-Based Forest Management in Semi-arid Climate,» 2017.
- [35] A. Del Campo, T. J. G. Fernandes y A. Molina, «Hydrology-oriented (adaptive) silviculture in a semiarid pine plantation: How much can be modified the water cycle through forest management?,» *European Journal of Forest Research*, vol. 133, 03 2014.

- [36] A. Molina y A. Del Campo, «The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations,» *Forest Ecology and Management*, vol. 269, p. 206–213, 04 2012.
- [37] M. Lindner, M. Maroschek, S. Netherer, A. Kremer, A. Barbati, J. Garcia-Gonzalo, R. Seidl, S. Delzon, P. Corona, M. Kolström, M. Lexer y M. Marchetti, «Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems,» *Forest Ecology and Management*, vol. 259, pp. 698-709, 02 2010.
- [38] R. Seidl, T. A. Spies, D. L. Peterson, S. L. Stephens and J. A. Hicke, "Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services.," *The Journal of applied ecology*, vol. 53, no. 1, pp. 120-129, 2 2016.
- [39] R. J. Keenan, «Climate change impacts and adaptation in forest management: a review,» *Annals of Forest Science*, vol. 72, pp. 145-167, 01 3 2015.
- [40] C. Allen, D. Breshears y N. McDowell, «On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene,» *Ecosphere*, vol. 6, pp. art129; 1-55, 8 2015.
- [41] C. Millar, N. Stephenson y S. Stephens, «Millar CI, Stephenson NL, Stephens SL.. Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecol Appl* 17: 2145-2151,» *Ecological applications : a publication of the Ecological Society of America*, vol. 17, pp. 2145-51, 1 2008.
- [42] C. Macleod, D. Scholefield y P. Haygarth, «Integration for sustainable catchment management,» *The Science of the total environment*, vol. 373, pp. 591-602, 03 2007.
- [43] TEXAS A&M UNIVERSITY - AGRILIFE RESEARCH, USDA - Agricultural Research Service, «SWAT - Soil and Water Assessment Tool,» 2019. [En línea]. Available: <https://swat.tamu.edu/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [44] FAO, «FAO - Land & Water - Land Resources Planning Toolbox - Soil and Water Assessment

- Tool,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1111246/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [45] K. A. Brauman, G. C. Daily, T. K. Duarte y H. A. Mooney, «The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services,» *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 32, pp. 67-98, 2007.
- [46] IPCC, «IPCC Data,» [En línea]. Available: <https://www.ipcc.ch/data/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [47] TEXAS A&M UNIVERSITY - AGRILIFE RESEARCH, USDA - Agricultural Research Service, «QSWAT,» 2019. [En línea]. Available: <https://swat.tamu.edu/software/qswat/>. [Último acceso: 10 02 2022].
- [48] QGIS, «QGIS-2.6.1-1,» 2019. [En línea]. Available: <http://qgis.org/downloads/QGIS-OSGeo4W-2.6.1-1-Setup-x86.exe>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [49] TEXAS A&M UNIVERSITY - AGRILIFE RESEARCH, USDA - Agricultural Research Service, «SWAT Editor,» 2019. [En línea]. Available: <https://swat.tamu.edu/software/swat-editor/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [50] TEXAS A&M UNIVERSITY - AGRILIFE RESEARCH, USDA - Agricultural Research Service, «SWAT Check,» 2019. [En línea]. Available: <https://swat.tamu.edu/software/swat-check/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [51] S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry y J. R. Williams, Soil & Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2009., 2009.
- [52] Y. Her, J. Frankenberger, I. Chaubey y R. Srinivasan, «Threshold effects in HRU definition of the Soil and Water Assessment Tool,» *Transactions of the ASABE*, vol. 58, pp. 367-378, 2015.

- [53] K. C. Abbaspour, J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist y R. Srinivasan, «Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT,» *Journal of Hydrology*, vol. 333, pp. 413-430, 2007.
- [54] ICGC, «Model d'elevacions del terreny de 2x2 m,» Generalitat de Catalunya, 19 05 2016. [En línea]. Available: <http://www.icgc.cat/ca/Administracio-i-empresa/Descarregues/Elevacions/Model-d-elevacions-del-terreny-de-2x2-m>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [55] C. George, «Predefined watershed and stream network,» [En línea]. Available: <https://swat.tamu.edu/media/114678/existing-watershedv1.pdf>. [Último acceso: 24 09 2022].
- [56] M. Mwiza, «Application of remote sensing using a GIS based soil water assessment tool (SWAT) to estimate river discharge in the Kabompo river basin-Zambia,» 2012.
- [57] ICGC; Grumets (CREAF-UAB), «Mapa d'usos i cobertes del sòl,» Generalitat de Catalunya, 2019. [En línea]. Available: [http://territori.gencat.cat/ca/01\\_departament/12\\_cartografia\\_i\\_toponimia/bases\\_cartografiques/medi\\_ambient\\_i\\_sostenibilitat/bases\\_miramon/territori/mapa-dusos-i-cobertes-del-sol/](http://territori.gencat.cat/ca/01_departament/12_cartografia_i_toponimia/bases_cartografiques/medi_ambient_i_sostenibilitat/bases_miramon/territori/mapa-dusos-i-cobertes-del-sol/). [Último acceso: 24 09 2019].
- [58] Diputació de Barcelona - Oficina Tècnica de Planificació i Anàlisi Territorial , «Descàrrega "CS08000\_A56 - Mapa de Cobertes del Sòl de 1956" (Visor SITMUN - Consulta Provincial),» 10 03 2014. [En línea]. Available: <https://sitmun.diba.cat/sitmun2/visor.jsp?app=2&ter=1>. [Último acceso: 11 07 2022].
- [59] Instituto Geográfico Nacional (IGN), «Descarga "Ortofotos AMS (B) 1956-1957" - PNOA-IGN,» 1957. [En línea]. Available: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/busquedaSerie.do?codSerie=VAMSB>. [Último acceso: 11 07 2022].

- [60] D. N. Moriasi, P. Naresh, J. L. Steiner, P. H. Gowda, M. Winchell, H. Rathjens, P. J. Starks y J. A. Verser, «SWAT-LUT: A Desktop Graphical User Interface for Updating Land Use in SWAT,» *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 55, nº 5, pp. 1102-1115, 03 09 2019.
- [61] D. Moriasi y V. Alan, «SWAT-LUT - Download : USDA ARS,» USDA ARS, 02 05 2016. [En línea]. Available: <https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=SWAT-LUT&modecode=30-70-05-00>. [Último acceso: 22 06 2022].
- [62] L. Gies y V. Merwade, «Creating SWAT Soil Database using FAO Soil and Terrain Database of East Africa (SOTER) Data,» [En línea]. Available: [https://web.ics.purdue.edu/~vmerwade/education/fao\\_soil\\_tutorial.pdf](https://web.ics.purdue.edu/~vmerwade/education/fao_soil_tutorial.pdf). [Último acceso: 24 09 2022].
- [63] GitHub, Inc, «DSMW - WORLD764.xls,» 2019. [En línea]. Available: <https://github.com/DublinR/GISwithRDemo/blob/master/JW/DSMW/WORLD764.xls>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [64] IIASA, «Harmonized World Soil Database (HWSD v 1.21),» International Institute for Applied Systems Analysis, 20 12 2017. [En línea]. Available: <https://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/water/HWSD.html>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [65] FAO, «Base de Datos Armonizada de los Suelos del Mundo v1.2,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/base-de-datos-armonizada-de-los-suelos-del-mundo-v12/es/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [66] FAO, «GeoNetwork - Find and analyze geo-spatial data,» [En línea]. Available: <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>. [Último acceso: 24 09 2019].



- [67] ISRIC, «ISRIC World Soil Information,» [En línea]. Available: <https://www.isric.org/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [68] ISRIC, «SoilGrids — global gridded soil information,» [En línea]. Available: <https://www.isric.org/explore/soilgrids>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [69] FAO, «Mapa Mundial de Suelos de la FAO/UNESCO,» FAO, 2019. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/mapa-mundial-de-suelos-de-faounesco/es/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [70] FAO-UNESCO, Soil map of the world. Volume V - Europe, vol. 5, 1981, p. 1168.
- [71] FAO, «FAO Digital Soil Map of the World (DSMW),» 2019. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026564/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [72] Harvard, «WorldMap - Digital Soil Map of the World,» 2015. [En línea]. Available: [https://worldmap.harvard.edu/data/geonode:DSMW\\_RdY](https://worldmap.harvard.edu/data/geonode:DSMW_RdY). [Último acceso: 24 09 2019].
- [73] ICGC y A. Baltiérrez Moras, «Cartografía d'unitats edafològiques de Catalunya a escala 1:250.000: Berguedà i Garrotxa,» 2014.
- [74] IGN, «Atlas Nacional de España - Categoría:Medio natural,» Gobierno de España, 11 03 2019. [En línea]. Available: [http://atlasnacional.ign.es/wane/Categor%C3%ADa:Medio\\_natural](http://atlasnacional.ign.es/wane/Categor%C3%ADa:Medio_natural). [Último acceso: 24 09 2019].
- [75] ICGC, «Mapes d'interès històric,» Generalitat de Catalunya, [En línea]. Available: <http://www.icgc.cat/ca/Administracio-i-empresa/Serveis/Sols/Antecedents-historics/Mapes-d-interes-historic>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [76] JRC, «Soils of the European Union,» European Commission, 24 09 2019. [En línea]. Available: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC46573>. [Último

acceso: 24 09 2019].

- [77] JRC, «Soil Datasets > Data > European Soil Database > Raster Library 10kmx10km,» European Comission, 25 10 2013. [En línea]. Available: [https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB\\_Archive/raster\\_archive/ESDBv2\\_ETRS\\_LAEA\\_raster\\_archive.html](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/raster_archive/ESDBv2_ETRS_LAEA_raster_archive.html). [Último acceso: 24 09 2019].
- [78] JRC, «The European Soil Database,» European Comission, [En línea]. Available: [https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB\\_Archive/ESDB\\_Data\\_Distribution/ESDB\\_Data\\_full\\_distribution/ESDBv2\\_data/fr\\_easy.htm](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/ESDB_Data_Distribution/ESDB_Data_full_distribution/ESDBv2_data/fr_easy.htm). [Último acceso: 24 09 2019].
- [79] United Nations University, «Europe/Asia Soil Maps - Global data SWAT,» UN, [En línea]. Available: [https://swat.tamu.edu/media/116408/ea\\_soil.zip](https://swat.tamu.edu/media/116408/ea_soil.zip). [Último acceso: 10 04 2022].
- [80] ICGC, «Geoíndex - Sòls,» Generalitat de Catalunya, 2019. [En línea]. Available: <http://www.icgc.cat/Administracio-i-empresa/Eines/Visualitzadors-Geoindex/Geoindex-Sols>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [81] USDA Soil Science Division Staff, Soil Survey Manual, vol. 18, 2017.
- [82] ICGC, «Mapa de sòls de Catalunya 1:250.000 - Soil Taxonomy,» 2021. [En línea]. Available: [https://app1.icgc.cat/bd/msc250mstv10sh0fsp1r010\\_2019.zip](https://app1.icgc.cat/bd/msc250mstv10sh0fsp1r010_2019.zip). [Último acceso: 05 06 2022].
- [83] FAO - IUSS Working Group WRB, World reference base for soil resources 2014, vol. 106, 2015.
- [84] ICGC, «Mapa de sòls de Catalunya 1:250.000 - World Reference Base for Soil Resources (WRB),» 2021. [En línea]. Available: [https://app1.icgc.cat/bd/msc250mwrbv10sh0fsp1r010\\_2019.zip](https://app1.icgc.cat/bd/msc250mwrbv10sh0fsp1r010_2019.zip). [Último acceso: 05 05 2022].
- [85] FAO, Guidelines for Soil Description, 4th ed., Rome, 2006.

- [86] G. Fischer, F. O. Nachtergaele, S. Prieler, E. Teixeira, G. Toth, H. Velthuisen, L. Verelst y D. Wiberg, «Global Agro-ecological Zones (GAEZ v3.0): Model Documentation,» 2012.
- [87] EEA, «Land resources,» CORINE Land resources, 1994.
- [88] J. Almorox, La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación, 2010.
- [89] X. Sun, Y. Hong, L. Bernard-Jannin, R. Chea, S. Sauvage y J. M. Sánchez Pérez, «Effects of elevation bands and snow parameters on the hydrological modeling of the upper part of the Garonne watershed (France),» de (2013 *International SWAT Conference, Toulouse, France*), 2013.
- [90] J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney y S. L. Neitsch, Soil & Water Assessment Tool. Input/Output Documentation. Version 2012, 2012.
- [91] S. Herrera García, J. Fernández Fernández, J. M. Gutiérrez, R. Ancell, M. R. Pons, M. D. Frías, S. Kotlarski, P. Szabó, O. Rätty, K. Keuler, P. M. Soares, R. M. Cardoso, T. Bosshard, C. Pagé, F. Boberg, F. A. Isotta, A. Jacewski, F. Kreienkamp, M. A. Liniger y C. Lussana, «Spain02: A set of gridded precipitation and temperature datasets,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.meteo.unican.es/es/datasets/spain02>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [92] S. Herrera García y J. Fernández Fernández, «Desarrollo, validación y aplicaciones de Spain02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitaciones y temperatura en España,» *Santander Meteorology Group*, p. 124, 2011.
- [93] S. Herrera García, J. M. Gutiérrez, R. Ancell, M. R. Pons, M. D. Frías y J. Fernández Fernández, «Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02),» *International Journal of Climatology*, vol. 32, pp. 74-85, 2012.
- [94] S. Herrera García, J. M. Gutiérrez, M. D. Frías y J. Fernández Fernández, «Nuevas versiones de Spain02: Datos diarios de precipitación y temperatura para estudios de regionalización y análisis de tendencias,» *International Journal of Climatology*, vol. 32, pp. 74-85, 2012.

- [95] S. Herrera García, J. Fernández Fernández y J. M. Gutiérrez, «Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: Assessing the effect of the interpolation methodology,» *International Journal of Climatology*, vol. 36, pp. 900-908, 2016.
- [96] S. Kotlarski, P. Szabó, S. Herrera García, O. Räty, K. Keuler, P. M. Soares, R. M. Cardoso, T. Bosshard, C. Pagé, F. Boberg, J. M. Gutiérrez, F. A. Isotta, A. Jaczewski, F. Kreienkamp, M. A. Liniger, C. Lussana y K. Pianko-Kluczyńska, «Observational uncertainty and regional climate model evaluation: A pan-European perspective,» *International Journal of Climatology*, 2017.
- [97] AgriMetSoft, «Netcdf-Extractor,» Agricultural and Meteorological Software, 2019. [En línea]. Available: <https://agrimetsoft.com/netcdf-extractor-download.aspx>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [98] CREAM-CTFC, «Laboratori Forestal Català,» CREAM-CTFC, 2019. [En línea]. Available: <https://laboratoriforestal.creaf.cat/>. [Último acceso: 22 06 2022].
- [99] M. De Cáceres, N. Martin-StPaul, M. Turco, A. Cabon y V. Granda, «Meteoland app (Laboratori Forestal Català),» CREAM-CTFC, 15 10 2020. [En línea]. Available: [https://laboratoriforestal.creaf.cat/meteoland\\_app/](https://laboratoriforestal.creaf.cat/meteoland_app/). [Último acceso: 03 05 2022].
- [100] M. De Cáceres, N. Martin-StPaul, M. Turco, A. Cabon y V. Granda, «Estimating daily meteorological data and downscaling climate models over landscapes,» *Environmental Modelling and Software*, vol. 108, nº 1364-8152, pp. 186-196, 2018.
- [101] M. L. Salas Regalado, «Nueva formulación para calcular la intensidad de precipitación para cualquier duración a partir de la precipitación diaria en la España peninsular,» 2016. [En línea]. Available: [https://hidrologia.usal.es/Complementos/calculo\\_IDF\\_Salas.pdf](https://hidrologia.usal.es/Complementos/calculo_IDF_Salas.pdf). [Último acceso: 25 04 2022].
- [102] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith, Crop evapotranspiration - Guidelines for

computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56, Roma: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

- [103] Organización Meteorológica Mundial, «Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas,» Organización Meteorológica Mundial (OMM), Genève, 2017.
- [104] B. C. Trewin, O. Baddour y H. Kontongomde, «Función de las normales climatológicas en un clima cambiante,» World Meteorological Organization, Ginebra, 2007.
- [105] F. Fernández García, Manual de climatología aplicada. Clima, medio ambiente y planificación., Primera reimpresión ed., R. Puyol Antolín y J. Vinuesa Angulo, Edits., Madrid: Editorial Síntesis, 1996, p. 285.
- [106] J. Martín Vide, El tiempo y el clima, Primera edición ed., Barcelona: Rubes, 2003, p. 127.
- [107] L. S. Nanía y M. Gómez Valentín, Ingeniería hidrológica, Segunda edición ed., Granada: Grupo Editorial Universitario, 2007, p. 278.
- [108] D. Moriasi, M. Gitau, N. Pai y P. Daggupati, «Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria,» *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, vol. 58, pp. 1763-1785, 12 2015.
- [109] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel y T. L. Veith, «Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations,» *Transactions of the ASABE*, vol. 50, pp. 885-900, 2007.
- [110] R. W. Zeckoski, M. Smolen, D. Moriasi, J. Frankenberger y G. W. Feyereisen, «Hydrologic and water quality terminology as applied to modeling,» *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, vol. 58, pp. 1619-1635, 1 2015.
- [111] S. Sorooshian, «Surface water hydrology: On-line estimation,» *Reviews of Geophysics*, vol. 21, pp. 706-721, 1983.

- [112] C. Zheng, M. Hill, G. Cao y R. Ma, «MT3DMS: Model use, calibration, and validation,» *Transactions of the ASABE*, vol. 55, pp. 1549-1559, 7 2012.
- [113] J. C. Refsgaard, «Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models,» *Journal of Hydrology*, vol. 198, pp. 69-97, 1997.
- [114] EPA, «Guidance for Quality Assurance Project Plans,» *Environmental Protection Agency*, pp. 1-58, 2002.
- [115] G. V. Glass, «Primary, Secondary, and Meta-Analysis of Research,» *Educational Researcher*, vol. 5, pp. 3-8, 1976.
- [116] J. E. Hunter, F. L. Schmidt y G. B. Jackson, «Meta-Analysis: Cumulating Research Findings Across Studies Sage Publications: Beverly Hills, 1982, 176 pp.,» *Educational Researcher*, vol. 15, pp. 20-21, 1986.
- [117] M. Hunt, *How Science Takes Stock: The Story of Meta-Analysis*, Russell Sage Foundation, 1997.
- [118] L. C. Lyons, «Meta-analysis: Methods of accumulating results across research domains,» *Retrieved February*, vol. 6, p. 2002, 1998.
- [119] P. Krause, D. P. Boyle y F. Bäse, «Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment,» *Advances in Geosciences*, vol. 5, pp. 89-97, 2005.
- [120] D. Legates y G. McCabe, «Evaluating the Use Of “Goodness-of-Fit” Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation,» *Water Resources Research*, vol. 35, pp. 233-241, 1 1999.
- [121] E. Servat y A. Dezetter, «Selection of Calibration Objective Functions in the Context of Rainfall-Runoff Modeling in a Sudanese Savannah Area,» *Hydrological Sciences Journal*, vol. 36, pp. 307-330, 08 1991.

- [122] J. E. Nash y J. V. Sutcliffe, «River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles,» *Journal of Hydrology*, vol. 10, pp. 282-290, 1970.
- [123] R. Harmel, P. Smith y K. Migliaccio, «Modifying Goodness-of-Fit Indicators to Incorporate Both Measurement and Model Uncertainty in Model Calibration and Validation,» *Transactions of the ASABE*, vol. 53, 1 2010.
- [124] R. D. Harmel y P. K. Smith, «Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit in hydrologic and water quality modeling,» *Journal of Hydrology*, vol. 337, pp. 326-336, 2007.
- [125] M. K. Muleta, «Model Performance Sensitivity to Objective Function during Automated Calibrations,» *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 17, pp. 756-767, 2012.
- [126] D. Biondi, G. Freni, V. Iacobellis, G. Mascaro y A. Montanari, «Validation of hydrological models: Conceptual basis, methodological approaches and a proposal for a code of practice,» *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 42, nº 44, pp. 70-76, 2012.
- [127] N. D. Bennett, B. Croke, G. Guariso, J. Guillaume, S. Hamilton, A. J. Jakeman y V. Andreassian, «Characterising performance of environmental models,» *Environ. Model. Softw.* 40(February 2013), pp. 1-20, 11 2012.
- [128] P. Daggupati, H. Yen, M. White, R. Srinivasan, J. Arnold, S. Keitzer y S. Sowa, «Impact of model development, calibration and validation decisions on hydrological simulations in West Lake Erie Basin: Impact of Model Development Decisions on Streamflow Simulations,» *Hydrological Processes*, vol. 29, pp. 5307-5320, 5 2015.
- [129] R. D. Harmel, P. Smith, K. Migliaccio, I. Chaubey, K. Douglas-Mankin, B. Benham, S. Shukla, R. Muñoz-Carpena y B. Robson, «Evaluating, Interpreting, and Communicating Performance of Hydrologic/Water Quality Models Considering Intended use: A Review and Recommendations,» *Environmental Modelling & Software*, vol. 57, 07 2014.
- [130] K. C. Abbaspour, SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual,

2015.

- [131] K. C. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. A. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang y B. Kløve, «A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model,» *Journal of Hydrology*, vol. 524, pp. 733-752, 2015.
- [132] M. Zambrano-Bigiarini, Package 'hydroGOF'. Goodness-of-Fit Functions for Comparison of Simulated and Observed Hydrological Time Series, 2013.
- [133] J. G. Arnold, D. N. Moriasi, P. W. Gassman, K. C. Abbaspour, M. J. White, R. Srinivasan, C. Santhi, R. D. Harmel, A. V. Griensven, M. W. Van Liew, N. Kannan, M. K. Jha, A. Griensven, M. W. Van Liew, N. Kannan y M. K. Jha, «SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION,» *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, vol. 55, pp. 1491-1508, 2012.
- [134] P. K. Kitanidis y R. L. Bras, «Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model: 2. Applications and results,» *Water Resources Research*, vol. 16, pp. 1034-1044, 1980.
- [135] C. Corradini y F. Melone, «An adaptive model for on-line flood predictions using a piecewise uniformity framework,» *Journal of Hydrology*, vol. 88, pp. 365-382, 1986.
- [136] H. Gupta, S. Sorooshian y P. Yapo, «Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison With Multilevel Expert Calibration,» *Journal of Hydrologic Engineering - J HYDROL ENG*, vol. 4, 4 1999.
- [137] D. E. D. C. Arriego, K. L. Ligan, C. B. L. Lumba, L. S. Tomenio, M. B. Solomon, J. M. Vergel, F. F. Ramos, A. Cunanan Yabut y O. López, «STUDY OF ANTECEDENT MOISTURE CONDITION IN RAINFALL AND RUNOFF RELATIONSHIP FOR RIO GRANDE DE MINDANAO RIVER,» 2017.
- [138] T. M. Hill, «Predicting elections: Who's the most accurate ?,» *significancemagazine.com*, 2015.



- [139] S. Dent, R. B. Hanna y L. T. Wright, «Automated Calibration using Optimization Techniques with SWMM RUNOFF,» *Journal of Water Management Modeling*, vol. 6062, 2004.
- [140] F. M. Meins, M. S. Krol, M. J. Booij y P. R. Oel, «Evaluation of spatial scale alternatives for hydrological modelling of the Lake Naivasha basin, Kenya,» 2013.
- [141] C. Dagbegnon y D. Sohoulade, «Assessment of sediment inflow to a reservoir using the SWAT model under undammed conditions: A case study for the Somerville reservoir, Texas, USA,» *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 6, pp. 222-229, 2018.
- [142] C. J. Willmott, «ON THE VALIDATION OF MODELS,» *Physical Geography*, vol. 2, pp. 184-194, 1981.
- [143] C. J. Willmott, «On the Evaluation of Model Performance in Physical Geography,» de *Spatial Statistics and Models*, G. L. Gaile y C. J. Willmott, Edits., Dordrecht, Springer Netherlands, 1984, pp. 443-460.
- [144] R. S. Ahl, S. W. Woods y H. R. Zuuring, «Hydrologic calibration and validation of SWAT in a snow-dominated Rocky Mountain watershed, Montana, U.S.A.,» *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 44, pp. 1411-1430, 2008.
- [145] L. Palazón y A. Navas, «Case study: Effect of climatic characterization on river discharge in an alpine-prealpine catchment of the spanish pyrenees using the SWAT model,» *Water (Switzerland)*, vol. 8, 2016.
- [146] ASCE, «Criteria for Evaluation of Watershed Models,» *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 119, pp. 429-442, 05 1993.
- [147] Y. Castañeda Morales, R. Franco y F. M. Castro Barrios, «MODELACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RIO COELLO, BAJO ESCENARIO DE CAMBIO CLIMATICO, A TRÁVES DE LA APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLOGICO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL),» 2016.

- [148] H. Gupta, H. Kling, K. Yilmaz y G. Martinez, «Decomposition of the Mean Squared Error and NSE Performance Criteria: Implications for Improving Hydrological Modelling,» *Journal of Hydrology*, vol. 377, pp. 80-91, 10 2009.
- [149] Z. Kalantari, C. S. Santos Ferreira, R. P. D. Walsh, A. J. D. Ferreira y G. Destouni, «Urbanization Development under Climate Change: Hydrological Responses in a Peri-Urban Mediterranean Catchment,» *Land Degradation and Development*, vol. 28, pp. 2207-2221, 2017.
- [150] X. Wang y A. M. Melesse, «Evaluation of the SWAT model's snowmelt hydrology in a northwestern Minnesota watershed,» *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 48, pp. 1359-1376, 2005.
- [151] W. Vervoort, Course Notes Advanced SWAT: Calibrating using SWAT-CUP, 2017, pp. 1-27.
- [152] T. Alemayehu, A. Van Griensven, B. T. Woldegiorgis y W. Bauwens, «An improved SWAT vegetation growth module and its evaluation for four tropical ecosystems,» *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, pp. 4449-4467, 2017.
- [153] A. C. Lazzari Franco y N. Bernardi Bonumá, «Multi-variable SWAT model calibration with remotely sensed evapotranspiration and observed flow,» *RBRH*, vol. 22, 2017.
- [154] N. Hoghooghi, D. Radcliffe, R. Mukundan y A. Gotvald, «Multi-Site Sensitivity Analysis and Calibration of a SWAT Model on a Selected Urban Watershed in Metropolitan Atlanta, GA».
- [155] H. Kling, M. Fuchs y M. Paulin, «Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios,» *Journal of Hydrology*, vol. 424, nº 425, pp. 264-277, 2012.
- [156] J. Singh, H. V. Knapp, J. G. Arnold y M. Demissie, «HYDROLOGICAL MODELING OF THE IROQUOIS RIVER WATERSHED USING HSPF AND SWAT1,» *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 41, pp. 343-360, 2005.

- [157] M. J. Delgado Tinoco, P. Llorens García, F. Gallart Gallego y J. Martínez Vilalta, «Efecto de la variabilidad climática y de los cambios en las cubiertas del suelo sobre el balance hidrológico en la cabecera del río Llobregat,» 2011.
- [158] D. Okcu, E. Sezgin y H. Okcu, «DEVELOPING A NEW TOTAL SEDIMENT TRANSPORT FORMULA VIA POLYNOMIAL BEST SUBSET REGRESSION,» *International Journal of Management and Applied Science*, pp. 50-56, 2018.
- [159] G. Aneiros-Pérez, R. Cao y J. M. Vilar-Fernández, «Functional methods for time series prediction: A nonparametric approach,» *Journal of Forecasting*, vol. 30, pp. 377-392, 2011.
- [160] D. Biondi, «Proposta per la definizione di un protocollo per la validazione di modelli idrologici,» de *Università della Calabria*, 2012.
- [161] G. P. Fernandez, G. M. Chescheir, R. W. Skaggs y D. M. Amatya, «Development and Testing of Watershed Scale Models for Poorly Drained Soils,» *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 48, 3 2005.
- [162] Y. Kim, K. Sartelet, J. C. Raut y P. Chazette, «Evaluation of the Weather Research and Forecast/Urban Model Over Greater Paris,» *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 149, pp. 105-132, 2013.
- [163] F. García Fernández, L. García Esteban, P. De Palacios, M. Navarro y M. Conde, «Prediction of standard particleboard mechanical properties utilizing an artificial neural network and subsequent comparison with a multivariate regression model,» *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 17, p. 178, 2008.
- [164] M. Jajarmizadeh, L. M. Sidek, S. Harun y M. Salarpour, «Optimal Calibration and Uncertainty Analysis of SWAT for an Arid Climate,» *Air, Soil and Water Research*, vol. 10, 2017.
- [165] M. P. López, C. Yacoub López y A. Pérez-Foguet, «CALIBRACIÓN DEL MODELO PARA EL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN LOS SEDIMENTOS EN LA CUENCA DE

JEQUETEPEQUE, CAJAMARCA, PERÚ,» 2012.

- [166] Z. Yu, SWAT Output Viewer User Manual (v 0.1), 2016.
- [167] J. Schwank, R. Escobar, G. H. Girón y E. Morán-Tejeda, «Modeling of the Mendoza river watershed as a tool to study climate change impacts on water availability,» *Environmental Science and Policy*, vol. 43, pp. 91-97, 2014.
- [168] Y. Tuo, Z. Duan, M. Disse y G. Chiogna, «Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige river basin (Italy),» *Science of the Total Environment*, vol. 573, pp. 66-82, 2016.
- [169] M. Meaurio, A. Zabaleta, J. A. Uriarte, R. Srinivasan y I. Antigüedad Auzmendi, «Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed,» *Journal of Hydrology*, vol. 525, pp. 326-334, 2015.
- [170] Varios, «Best of 1-1250 Messages».
- [171] G. Singh y D. Saraswat, «Development and evaluation of targeted marginal land mapping approach in SWAT model for simulating water quality impacts of selected second generation biofeedstock,» *Environmental Modelling and Software*, vol. 81, pp. 26-39, 2016.
- [172] R. Ang y C. Oeurng, «Simulating streamflow in an ungauged catchment of Tonlesap Lake Basin in Cambodia using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model,» *Water Science*, vol. 32, pp. 89-101, 2018.
- [173] S. M. Ghoraba, «Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model,» *Alexandria Engineering Journal*, vol. 54, pp. 583-594, 2015.
- [174] G. Tamayo García y C. S. Paez-Bimos, «Evaluación de los caudales líquidos y de producción de sedimentos estimados con el modelo soil water assesment tool (swat) y su relación con los caudales líquidos y sólidos observados,» 2016.
- [175] D. De Almeida Bressiani, P. W. Gassman, J. Gurgel Fernandes, L. H. Pospissil Garbossa, R.

- Srinivasan, N. Bernardi Bonumá y E. M. Mendiondo, «A review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects,» *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 8, pp. 1-27, 2015.
- [176] F. J. Segura Méndez, J. Senent Aparicio, J. Pérez Sánchez y D. Pulido Velázquez, «Análisis comparativo de modelos agregados de balance hídrico en la España peninsular y su sensibilidad a la incertidumbre climática,» 2017.
- [177] F. F. Tang, H. S. Xu y Z. X. Xu, «Model calibration and uncertainty analysis for runoff in the Chao River Basin using sequential uncertainty fitting,» *Procedia Environmental Sciences*, vol. 13, pp. 1760-1770, 2012.
- [178] B. K. Pandey, A. K. Gosain, G. Paul y D. Khare, «Climate change impact assessment on hydrology of a small watershed using semi-distributed model,» *Applied Water Science*, vol. 7, pp. 2029-2041, 2017.
- [179] L. P. Ogwenó, J. M. Gathenya y P. G. Home, «Hydrologic analysis of Malewa watershed as a basis for Implementing Payment for Environmental Services (PES),» pp. 657-687, 2009.
- [180] C. Baffaut y V. W. Benson, «Modeling Flow and Pollutant Transport in a Karst Watershed with SWAT,» *Transactions of the ASABE*, vol. 52, pp. 469-479, 2009.
- [181] M. Méndez Morales, «Sistema de vigilancia y monitoreo para la prevención de desastres por inundación en el sistema de cuencas del río Toyogres y la quebrada Zopilote en Dulce Nombre de Cartago,» 2012.
- [182] U. Duru, E. Wohl, S. Rathburn, M. Arabi y W. Sanford, «MODELING SEDIMENT YIELD AND DEPOSITION USING THE SWAT MODEL : A CASE STUDY OF CUBUK I AND CUBUK II RESERVOIRS, TURKEY,» 2015.
- [183] A. Zhang, T. Li, Y. Si, R. Liu, H. Shi, X. Li, J. Li y X. Wu, «Double-layer parallelization for hydrological model calibration on HPC systems,» *Journal of Hydrology*, vol. 535, pp. 737-747, 2016.

- [184] B. Vilaysane, K. Takara, P. Luo, I. Akkharath y W. Duan, «Hydrological Stream Flow Modelling for Calibration and Uncertainty Analysis Using SWAT Model in the Xedone River Basin, Lao PDR,» *Procedia Environmental Sciences*, vol. 28, pp. 380-390, 2015.
- [185] R. Fernández De Villarán San Juan, «UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA “SWAT” PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EMISIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS,» 2017.
- [186] C. Carvalho-Santos, A. T. Monteiro, J. C. Azevedo, J. P. Honrado y J. P. Nunes, «Climate Change Impacts on Water Resources and Reservoir Management: Uncertainty and Adaptation for a Mountain Catchment in Northeast Portugal,» *Water Resources Management*, vol. 31, pp. 3355-3370, 2017.
- [187] J. Zabalza-Martínez, S. M. Vicente-Serrano, J. I. López-Moreno, G. B. Calvo, R. Savé, D. Pascual, E. Pla, E. Morán-Tejeda, F. Domínguez-Castro y C. L. Tague, «The influence of climate and land-cover scenarios on dam management strategies in a highwater pressure catchment in Northeast Spain,» *Water (Switzerland)*, vol. 10, 2018.
- [188] P.-y. Chen, M. Di Luzio y J. G. Arnold, «Impact of Two Land-Cover Data Sets on Stream Flow and Total Nitrogen Simulations Using a Spatially Distributed,» *Global Priorities in Land Remote Sensing*, 2005.
- [189] K. O. Asante, G. A. Artan, S. Pervez, C. Bandaragoda y J. P. Verdin, «Technical Manual for the Geospatial Stream Flow Model (GeoSFM): US Geological Survey Open-File Report 2007-1441,» *US Geological Survey, Reston*, 2008.
- [190] J. G. Arnold, C. Santhi, M. Di Luzio, E. B. Haney, N. Kannan y M. J. White, «The HUMUS/SWAT National Water Quality Modeling System,» 2010.
- [191] Y. Grusson, F. Anctil, S. Sauvage y J. M. Sánchez Pérez, «Testing the SWAT model with gridded weather data of different spatial resolutions,» *Water (Switzerland)*, vol. 9, pp. 1-16, 2017.

- [192] P. L. INRM Consultants, «Glacier and Snowmelt Modelling Using Swat : Ganga Basin Case Study».
- [193] M. Fan y H. Shibata, «Spatial and temporal analysis of hydrological provision ecosystem services for watershed conservation planning of water resources,» *Water Resources Management*, vol. 28, pp. 3619-3636, 2014.
- [194] C. D. ESTUDIOS DEL JILOCA, «Aplicación Del “Swat” Como Modelo Para La Gestión Del Agua Y El Suelo En La Cuenca Hidrográfica Del Jiloca,» 2010.
- [195] J. I. López-Moreno, J. Zabalza-Martínez, S. M. Vicente-Serrano, J. Revuelto, M. Gilaberte, C. Azorin-Molina, E. Morán-Tejeda, J. M. García-Ruiz y C. L. Tague, «Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees,» *Science of the Total Environment*, vol. 493, pp. 1222-1231, 2014.
- [196] M. Fan y H. Shibata, «Simulation of watershed hydrology and stream water quality under land use and climate change scenarios in Teshio River watershed, northern Japan,» *Ecological Indicators*, vol. 50, pp. 79-89, 2015.
- [197] J. Aubia Ferré, P. Llorens García y F. Gallart Gallego, «MODELITZACIÓ EMPÍRICA DE L'EFFECTE DEL CANVI CLIMÀTIC I DEL CANVI DE LES COBERTES EN L'ESCOLAMENT,» 2010.
- [198] C. Santhi, R. Srinivasan, J. G. Arnold y J. R. Williams, «A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas,» *Environmental Modelling and Software*, vol. 21, pp. 1141-1157, 2006.
- [199] S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan y J. R. Williams, SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL USER'S MANUAL. VERSION 2000, 2002.
- [200] J. Oestreicher, «Prospectivas y Aplicaciones del Modelo Hidrológico SWAT: Adaptación del modelo para su uso en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá».

- [201] C. Santhi, J. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan y L. M. Hauck, «Validation of the SWAT Model on a Large River Basin with Point and Nonpoint Sources,» *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 37, pp. 1169-1188, 10 2001.
- [202] M. Ahmadi, I. I. Ascough, K. C. DeJonge y M. Arabi, «Multisite-multivariable sensitivity analysis of distributed watershed models: enhancing the perceptions from computationally frugal methods,» *Ecological Modelling*, vol. 279, pp. 54-67, 2014.
- [203] B. Birhanu, P. Ndomba y F. Mtalo, «Application of SWAT Model for Mountainous Catchment,» *Catchment and Lake Research*, pp. 2003-2008, 2007.
- [204] C. Amonett y S. T. Bednarz, *Part I - Watershed Modeling Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*.
- [205] S. Jadhav, H. He y K. Jenkins, «Prediction of earnings per share for industry,» de *IC3K 2015 - Proceedings of the 7th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*, 2015.
- [206] M. Olaleye, K. Dahal y Z. Pervez, «A Fuzzy-based Throughput Prediction for Wireless Communication Systems,» de *2018 IEEE (SMC) International Conference on Innovations in Intelligent Systems and Applications, INISTA 2018*, 2018.
- [207] J. M. Ubalde, X. Sort y R. M. Poch, «Application of a very ubdetailed soil survey ubmethod in viticultural ubzoning in Catalonia, Spain,» *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, vol. 43, pp. 55-66, 2009.
- [208] V. KLEMEŠ, «Operational testing of hydrological simulation models,» *Hydrological Sciences Journal*, vol. 31, pp. 13-24, 1986.
- [209] R. Serra i Rotés, «L'embassament de la Baells (Berguedà): la transformació d'un paisatge natural i cultural,» de *NATURA I CULTURA AL PIRINEU 12es Trobades Culturals Pirinenques*, 2016.



- [210] J. Romero Sabí, L. Perona Ribés, M. Santandreu Viaplana, DIBA, G. Gascón Picallo, J. Solsona Bernades, B. Iglesias Álvarez, E. Soler García de Oteyza, M. Fuguet Martí, K. Quiroz Sierra, I. Jansana, X. Irigoyen, M. Anglarill Pérez y A. Torrella Reñé, «Pla Especial de l'Embassament de la Baells,» 2018.
- [211] ACA, «Perfil de zona de bany continental - Embassament de la Baells,» pp. 1-10, 2010.
- [212] ACA, «ACA - Consulta de Dades,» [En línea]. Available: <http://aca.gencat.cat/ca/laigua/consulta-de-dades/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [213] 2W2E GmbH - Water Weather Energy Ecosystem, «SWAT-CUP,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.2w2e.com/home/SwatCup>. [Último acceso: 05 04 2022].
- [214] D. Nguyen Khoi y V. Thi Thom, «Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in a river catchment of Vietnam,» *Global Ecology and Conservation*, nº 4, pp. 538-548, 13 10 2015.
- [215] F. Zhao, Y. Wu, L. Qiu, Y. Sun, L. Sun, Q. Li, J. Niu y G. Wang, «Parameter Uncertainty Analysis of the SWAT Model in a Mountain-Loess Transitional Watershed on the Chinese Loess Plateau,» *Water*, vol. 10, nº 6, p. 690, 25 05 2018.
- [216] R. De Queiroga Miranda, J. Domiciano Galvêncio, M. S. Beserra de Moura y R. Srinivasan, «Paralelização do algoritmo SUFI2: Uma abordagem Windows,» *Revista Brasileira de Geografia Física*, vol. 10, nº 05, pp. 1535-1544, 2017.
- [217] P. K. Shrestha, «SWAT Calibration Helper - Monthly v1.0,» 05 2017. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/317345023\\_SWAT\\_Calibration\\_Helper\\_-\\_Monthly\\_v10](https://www.researchgate.net/publication/317345023_SWAT_Calibration_Helper_-_Monthly_v10). [Último acceso: 05 05 2022].
- [218] TEXAS A&M UNIVERSITY - AGRILIFE RESEARCH, USDA - Agricultural Research Service, [En línea]. Available: [https://swat.tamu.edu/media/90112/swat-calibration-techniques\\_slides.pdf](https://swat.tamu.edu/media/90112/swat-calibration-techniques_slides.pdf). [Último acceso: 05 05 2022].

- [219] R. Ozminkowski, «Garbage In, Garbage Out. Saving the world is just one good reason to address this common problem.,» 13 11 2021. [En línea]. Available: <https://towardsdatascience.com/garbage-in-garbage-out-721b5b299bc1>. [Último acceso: 11 10 2022].
- [220] H. Sellami, I. La Jeuness, S. Benabdallah, N. Baghdadi y M. Vanclooster, «Uncertainty analysis in model parameters regionalization: a case study involving the SWAT model in Mediterranean catchments (Southern France),» *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 18, nº 6, p. 2393–2413, 2014.
- [221] L. Palazón y A. Navas, «Modeling sediment sources and yields in a Pyrenean catchment draining to a large reservoir (Ésera River, Ebro Basin),» *Journal of Soils and Sediments*, vol. 14, pp. 1612-1625, 2014.
- [222] G. Salmoral Portillo, Implications of agricultural production, policy and land use changes on water resource assessment (Tesis doctoral), Madrid: ETSIAM-UPM, 2014.
- [223] G. Salmoral, B. A. Willaarts, P. A. Troch y A. Garrido, «Drivers influencing streamflow changes in the Upper Turia basin, Spain,» *Science of the Total Environment*, vol. 258, nº 68, pp. 503-504, 2015.
- [224] C. Carvalho-Santos, J. P. Nunes, A. T. Monteiro, L. Hein y J. P. Honrado, «Assessing the effects of land cover and future climate conditions on the provision of hydrological services in a medium-sized watershed of Portugal,» *Hydrological Processes*, vol. 30, pp. 720-738, 2016.
- [225] A. M. Epelde Beraza, Modelización de procesos hidrológicos y de contaminación por nitratos mediante dos códigos numéricos (SWAT y MOHID). Cuenca agrícola del río Alegría (País Vasco) (Tesis Doctoral), Leioa: Universidad del País Vasco, 2015.
- [226] K. C. Abbaspour, S. A. Vaghefi y R. Srinivasan, «A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016

- International SWAT Conference,» *Water*, vol. 1, nº 10, p. 6, 2018.
- [227] H. Sellami, I. La Jeunesse, S. Benabdallah y M. Vancloster, «Parameter and rating curve uncertainty propagation analysis of the SWAT model for two small Mediterranean catchments,» *Hydrological Sciences Journal*, vol. 58, nº 8, pp. 1635-1657, 2013.
- [228] A. Malagò, O. Vigiak, F. Bouraoui y M. Franchini, «The impact of Hillslope Length parameter on SWAT streamflow prediction in the Upper Danube. In Conference Proceedings: Danube Conference 2014, Bridging the sciences - crossing the borders.,» *XXVI Conference of the Danubian Countries -Conference 2014*, pp. 113-116, 2014.
- [229] J. Senent-Aparicio, J. Pérez-Sánchez, J. Carrillo-García y J. Soto, «Using SWAT and Fuzzy TOPSIS to Assess the Impact of Climate Change in the Headwaters of the Segura River Basin (SE Spain),» *Water*, vol. 2, nº 9, p. 149, 2017.
- [230] A. Irvem y A. El-Sadek, «Evaluation of Streamflow Simulation By SWAT Model for The Seyhan River,» *Çukurova J. Agric. Food Sci.*, vol. 2, nº 33, pp. 99-110, 2018.
- [231] S. G. Setegn, R. Srinivasan y B. Dargahi, «Hydrological Modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia Using SWAT Model.,» *The Open Hydrology Journal*, nº 2, pp. 49-62, 2008.
- [232] L. L. Moreira, D. Schwaback y D. Rigo, «Sensitivity analysis of the Soil and Water Assessment Tools (SWAT) model in streamflow modeling in a rural river basin,» *Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas*, vol. 13, nº 6, 2018.
- [233] K. Khalid, M. F. Ali, N. F. Abd Rahman, M. R. Mispan, S. H. Haron, Z. Othman y M. F. Bachok, «Sensitivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm,» *Procedia Engineering*, nº 162, pp. 441-447, 2016.
- [234] B. Narsimlu, A. Gosain y B. Chahar, «Assessment of Future Climate Change Impacts on Water Resources of Upper Sind River Basin, India Using SWAT Model,» *Water Resources Management: An International Journal, Published for the European Water Resources Association (EWRA)*, vol. 27, nº 10, pp. 3647-3662, 2013.

- [235] W. Francesconi, R. Srinivasan, E. Pérez-Miñana, S. P. Willcock y M. Quintero, «Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review,» *Journal of Hydrology*, vol. 535, pp. 625-636, 04 2016.
- [236] Y. Yuan, W. Nie y E. Sanders, «PROBLEMS AND PROSPECTS OF SWAT MODEL APPLICATION ON AN ARID/SEMIARID WATERSHED IN ARIZONA,» de *SEDHYD 2014 Joint Conference, March 23 - 27, 2014.*, Reno, NV, 2015.
- [237] T. A. Fontaine, T. S. Cruickshank, J. G. Arnold y R. H. Hotchkiss, «Development of a snowfall–snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT),» *Journal of Hydrology*, vol. 262, pp. 209-223, 2002.
- [238] M. Sahu, S. Lahari, A. K. Gosain y A. Ohri, «Hydrological Modeling of Mahi Basin Using SWAT,» *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*, vol. 5, nº 3, pp. 68-79, 09 2016.
- [239] N. Shivhare, P. K. Singh Dikshit y S. B. Dwivedi, «A Comparison of SWAT Model Calibration Techniques for Hydrological Modeling in the Ganga River Watershed,» *Engineering*, nº 4, pp. 643-652, 2018.
- [240] N. Shivhare, P. K. Singh Dikshit y S. B. Dwivedi, «Corrigendum to “A Comparison of SWAT Model Calibration Techniques for Hydrological Modeling in Ganga River Watershed” [Engineering 4 (2018) 643–652],» *Engineering*, nº 5, p. 181, 2015.
- [241] S. K. Himanshu, A. Pandey y P. Shrestha, «Application of SWAT in an Indian River Basin for Modeling Runoff, Sediment and Water Balance.,» *Environ Earth Sci*, nº 3, p. 76, 2016.
- [242] L. T. Ha, W. G. Bastiaanssen, A. van Griensven, A. I. J. M. van Dijk y G. B. Senay, «SWAT-CUP for Calibration of Spatially Distributed Hydrological Processes and Ecosystem Services in a Vietnamese River Basin Using Remote Sensing,» *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2017.
- [243] G. G. Tamayo García, Evaluación de los caudales líquidos y de producción de sedimentos

estimados con el modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT) y su relación con los caudales líquidos y sólidos observados, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2017.

- [244] D. Waidler, «Conservation Practice Modeling,» Texas AgriLife Research, 2009.
- [245] R. Arias, M.-L. Rodríguez-Blanco, M. M. Taboada-Castro, J. P. Nunes, J. J. Keizer y M. T. Taboada-Castro, «Water Resources Response to Changes in Temperature, Rainfall and CO<sub>2</sub> Concentration: A First Approach in NW Spain,» *Water*, nº 6, pp. 3049-3067, 2014.
- [246] E. P. Querner y M. Zanen, Modelling water quantity and quality using SWAT : a case study in the Limpopo River basin, South Africa, vol. 2405, Alterra: Wageningen, 2013.
- [247] G. T. Ayele, E. Z. Teshale, B. Yu, I. D. Rutherford y J. Jeong, «Streamflow and Sediment Yield Prediction for Watershed Priorization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia,» *Water*, vol. 9, nº 782, 10 2017.
- [248] Y. Bouslihim, A. Rochdi, N. El Amrani Paaza y L. Liuzzo, «Understanding the effects of soil data quality on SWAT model performance and hydrological processes in Tamedroust watershed (Morocco),» *Journal of African Earth Sciences*, vol. 160, 2019.
- [249] H. Oruc, M. Çelen, F. Gülgen, M. Salim Öncel, S. Vural y B. Kılıç, «Sensitivity of the SWAT Model to Soil Data Parameterization; Case Study in Saz - Çayırova Stream, Turkey,» de *5th EurAsia Waste Management Symposium*, Istanbul, 2020.
- [250] X. Ye, Q. Zhang y V. R. N., «The effect of soil data resolution on hydrological processes modelling in a large humid watershed,» *Hydrological Processes*, vol. 25, nº 1, pp. 130-140, 2011.
- [251] F. Yang, G.-L. Zhang, J.-L. Yang, D.-C. Li, Y.-G. Zhao, F. Liu, R.-M. Yang y F. Yang, «Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes,» *Journal of Hydrology*, vol. 519, pp. 3086-3093, 2014.
- [252] K. J. Ankenbauer y S. P. Loheide, «The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA,» *Hydrological Processes*, vol.

- 31, nº 4, pp. 891-901, 2017.
- [253] S. Schütte, R. E. Schulze y M. Scholes, «Impacts of soil carbon on hydrological responses - a sensitivity study of scenarios across diverse climatic zones in South Africa,» *South African Journal of Science*, vol. 117, nº 5-6, 2021.
- [254] D. W. Wolfe, R. M. Gifford, D. Hilbert y Y. Luo, «Integration of photosynthetic acclimation to CO<sub>2</sub> at the whole-plant level,» *Global Change Biology*, vol. 4, nº 8, pp. 879-893, 04 01 1998.
- [255] C. Purcell, S. P. Batke, R. Caballero, W. K. Soh, M. Murray y J. C. McElwain, «Increasing stomatal conductance in response to rising atmospheric CO<sub>2</sub>,» *Annals of Botany*, vol. 121, nº 7, p. 1427, 08 06 2018.
- [256] K. M. Gunn, A. R. Buda, H. E. Preisendanz, R. Cibin, C. D. Kennedy y T. L. Veith, «Integrating Daily CO<sub>2</sub> Concentrations in SWAT-VSA to Examine Climate Change Impacts on Hydrology in a Karst Watershed,» *Transactions of the ASABE*, vol. 64, nº 4, pp. 1303-1308, 2021.
- [257] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2021 - The Physical Science Basis - Summary for Policymakers*, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.
- [258] Y. Wu, S. Liu y O. I. Abdul-Aziz, «Hydrological effects of the increased CO<sub>2</sub> and climate change in the Upper Mississippi River Basin using a modified SWAT,» *Climatic Change*, Vols. %1 de %23-4, nº 110, pp. 977-1003, 2012.
- [259] Y. Grusson, X. Sun, S. Gascoin, S. Sauvage, S. Raghavan, F. Anctil y J.-M. Sánchez-Pérez, «Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and streamflow dynamics over an alpine watershed,» *Journal of Hydrology*, vol. 531, pp. 574-588, 2015.
- [260] K. Rahman, C. Maringanti, M. Beniston, F. Widmer, K. Abbaspour y A. Lehmann, «Streamflow Modeling in a Highly Managed Mountainous Glacier Watershed Using SWAT: The Upper Rhone River Watershed Case in Switzerland,» *Water Resources Management*, vol. 27, 11 2013.

- [261] L. Gottschalk, J. L. Jensen, D. Lundquist, R. Solantie y A. Tollan, «Hydrologic Regions in the Nordic Countries,» *Hydrology Research*, vol. 10, pp. 273-286, 10 1979.
- [262] M. Strauch, R. Otto y M. Volk, «HRU aggregation and its effects on model outputs,» de *2015 International SWAT Conference, Sardinia, June, 2015*.
- [263] S. S. Putra, «Step 9.a QGIS Interface for SWAT (QSWAT) Tutorial,» 24 11 2016. [En línea]. Available: <https://santosasandyputra.wordpress.com/2016/11/24/step-9-a-qgis-interface-for-swat-qswat-tutorial/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [264] R. I. Gonzales Romero, «Copiar el contenido de archivos txt incrementalmente sobre hoja de excel,» *Todoexpertos*, 26 02 2015. [En línea]. Available: <https://www.todoexpertos.com/categorias/tecnologia-e-internet/software-y-aplicaciones/microsoft-excel/respuestas/834w4566guxhc/copiar-el-contenido-de-archivos-txt-incrementalmente-sobre-hoja-de-excel>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [265] J. Sánchez San Román, «Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves,» 2006.
- [266] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith, «Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements),» 1998.
- [267] G. Hargreaves y Z. Samani, «Reference Crop Evapotranspiration From Temperature,» *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 1, 01 1985.
- [268] J. Schuol y K. C. Abbaspour, «Calibration and Uncertainty Issues of a Hydrological Model (SWAT) Applied to West Africa.,» *Advances in Geosciences*, nº 9, pp. 137-143, 2006.

## Anejos

- Anejo A. Configuración de SWAT
- Anejo B. Estudio de las características de la cuenca de estudio y preparación de los inputs
- Anejo C. Configuración de SWAT-CUP



# **Anejo A**

## **Configuración de QSWAT**

## Sumario

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>2</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>3</b>
<b>SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS</b>	<b>4</b>
<b>1. INSTALACIÓN</b>	<b>6</b>
1.1. QGIS 2.6.1-1.....	6
1.2. SWAT Editor 2012.10.23 (8 June 2020) .....	6
1.3. QSWAT v1.9.....	6
1.4. SWAT-LUT 2.0.....	6
<b>2. CONFIGURACIÓN</b>	<b>7</b>
2.1. Abrir QSWAT.....	7
2.2. “Delineate Watershed” .....	7
2.2.1. “Delineate Watershed” por primera vez (caso 1) .....	7
2.2.2. “Delineate Watershed” recuperando resultados anteriores (caso 2).....	9
2.3. “Create HRUs” .....	10
2.3.1. Introducción de información de usos del suelo de diferentes años (SWAT-LUT).....	11
2.4. “Edit Inputs and Run SWAT” .....	13
2.4.1. Modificación de los valores de los parámetros .....	16
<b>3. CONSULTA DE LOS OUTPUTS</b>	<b>17</b>
3.1.1. Valores de los parámetros .....	19
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>23</b>

## Índice de figuras

Figura 2-1 Localización del icono SWAT en QGIS 2.6.1-1. _____	7
Figura 2-2 Ventana QSWAT para acceder a los diferentes niveles de configuración. _____	7
Figura 2-3 Evolución del número de subcuencas resultantes en función del umbral de área (“Threshold area”) definido para la cuenca de estudio. _____	8
Figura 2-4 Ventanas QSWAT para “Delineate Watershed” por primera vez. _____	9
Figura 2-5 Ventana QSWAT para “Delineate Watershed” recuperando resultados anteriores. ____	9
Figura 2-6 Ventanas QSWAT para “Create HRUs”. _____	11
Figura 2-7 Ventanas SWAT-LUT para añadir en el modelo SWAT la variación de usos del suelo a lo largo del periodo. _____	12
Figura 2-8 Ventanas QSWAT para “Edit Inputs and Run Swat”. _____	14
Figura 2-9 Ventanas QSWAT para modificar los parámetros (“Edit Inputs and Run SWAT”). ____	16
Figura 3-1 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Edit Inputs and Run SWAT”). _____	18

## Índice de tablas

Tabla 2-1 Valores de la “Lookup Table” para “global_landuses”. _____	12
--	----

## Símbolos y acrónimos

ACA	Agència Catalana de l'Aigua
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
CREAF	Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals
EEA	European Environment Agency
CTP	Comunidad de Trabajo de los Pirineos
CTFC	Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
Grumets	Grup de Recerca en Teledetecció i Sistemes d'Informació Geogràfica
HRUs	Hydrologic Response Units
HWSD	Harmonized World Soil Database
ICGC	Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya
IDAEA-CSIC	Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua del Consejo Superior de Investigaciones Científicas
IDESCAT	Institut d'Estadística de Catalunya
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISRIC	International Soil Reference and Information Centre
JRC	Joint Research Centre

LiDAR	Light Detection and Ranging
MCSC	Mapa de Cobertes de Sòl de Catalunya
MSC250M	Mapa de sòls de Catalunya 1:250.000
OFC	Observatori Forestal Català
OPCC	Observatorio Pirenaico de Cambio Climático
PEC	Performance Evaluation Criteria (criterios de evaluación del comportamiento)
SMC	Servei Meteorològic de Catalunya
SMU	Soil Mapping Units
ST	Soil Taxonomy
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
UAB	Universitat Autònoma de Barcelona
UN	United Nations
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
USLE	Universal Soil Loss Equation
WRB	World Reference Base for Soil Resources

## 1. Instalación

### 1.1. QGIS 2.6.1-1

Se descarga QGIS 2.6.1-1 desde <http://qgis.org/downloads/QGIS-OSGeo4W-2.6.1-1-Setup-x86.exe> y se procede a su instalación una vez descargado. Se utiliza la configuración por defecto.

### 1.2. SWAT Editor 2012.10.23 (8 June 2020)

A continuación se descarga SWAT Editor 2012.10.23 (8 June 2020) desde [https://swat.tamu.edu/media/116558/swateditor\\_install\\_201210\\_723.zip](https://swat.tamu.edu/media/116558/swateditor_install_201210_723.zip)

Una vez descargado se descomprime el archivo .zip y se procede a su instalación abriendo "Setup.Exe". Se utiliza la configuración por defecto.

### 1.3. QSWAT v1.9

A continuación se descarga QSWAT v1.9 desde <https://swat.tamu.edu/media/116370/qswatinstall19exe.zip>

Una vez descargado, se descomprime el archivo .zip, y se procede a su instalación. Se utiliza la configuración por defecto.

Para más detalles en el proceso de instalación se puede consultar el manual de usuario de QSWAT [1].

### 1.4. SWAT-LUT 2.0

A continuación se descarga SWAT-LUT 2.0 desde <https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=SWAT-LUT&modecode=30-70-05-00#downloadForm> y una vez descargado se procede a su instalación. Se utiliza la configuración por defecto.

## 2. Configuración

### 2.1. Abrir QSWAT

El primer paso es abrir QGIS 2.6.1-1 y guardar el proyecto. A continuación se va al icono “SWAT” (ver Figura 2-1).

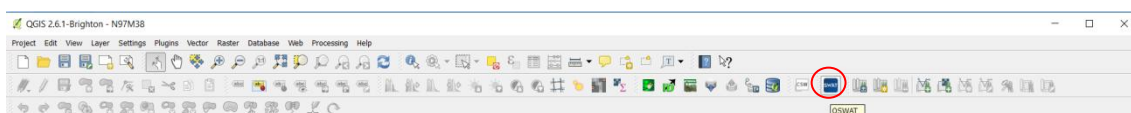


Figura 2-1 Localización del icono SWAT en QGIS 2.6.1-1.

Con ello se abrirá una ventana (ver Figura 2-2), en la que se podrá acceder a los diferentes niveles de configuración. Sin haber completado el anterior, no estará disponible el siguiente.

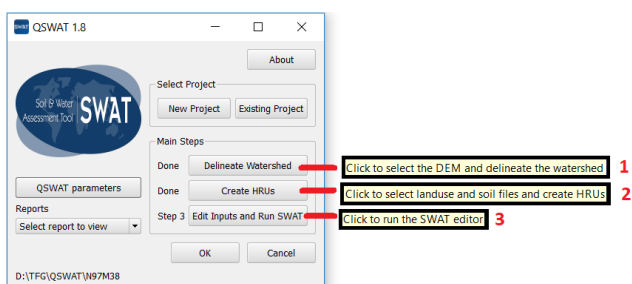


Figura 2-2 Ventana QSWAT para acceder a los diferentes niveles de configuración.

### 2.2. “Delineate Watershed”

Se pueden dar dos escenarios, uno en el que se realice la definición de la cuenca (“Delineate Watershed”) por primera vez, caso 1, en el que se seguiría el procedimiento tal y como se muestra en la Figura 2-4, y otro en el que se quiera realizar una simulación variando ciertos parámetros sin variar la cuenca definida anteriormente, caso 2, en el que seguiría el procedimiento tal y como se muestra en la Figura 2-5.

#### 2.2.1. “Delineate Watershed” por primera vez (caso 1)

En la Figura 2-4 se puede ver cómo se procede en el caso 1:



1. Introducir el archivo TIF del modelo digital de elevaciones (“DEM”)
2. Crear corrientes principales. Se ha mantenido el umbral por defecto (“Define threshold”) ya que se ha visto que para la cuenca de estudio era el umbral a partir del cual el número de subcuencas resultantes empezaba a aumentar más rápidamente (ver Figura 2-3), lo que implicaría un mayor tiempo de computación en relación al nivel de detalle conseguido.

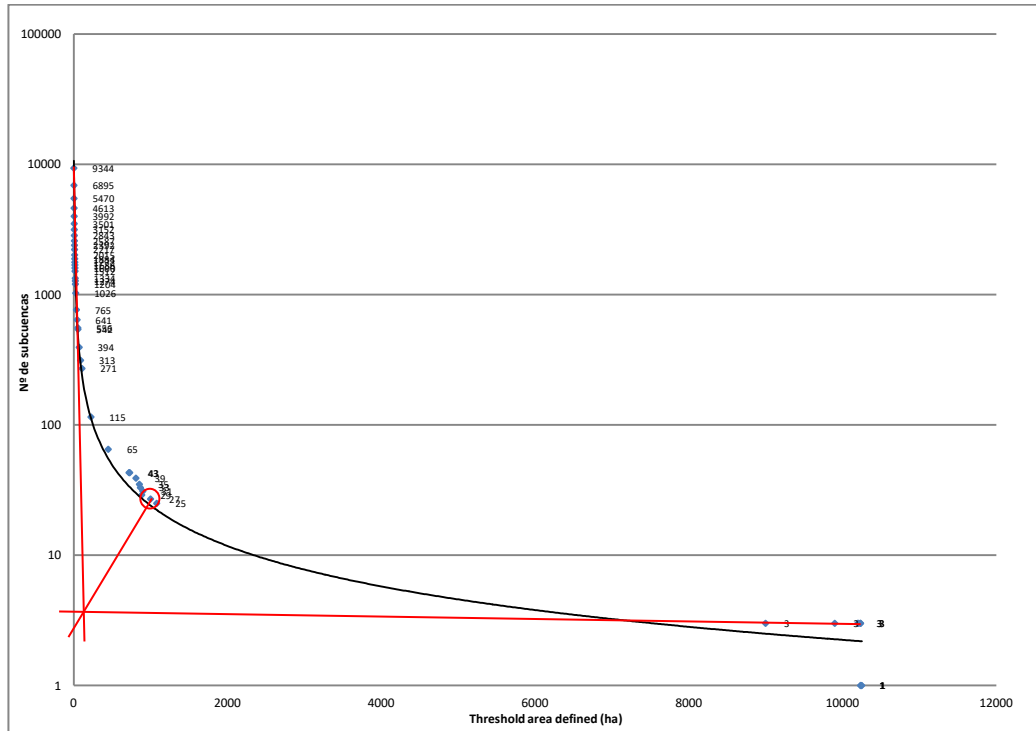


Figura 2-3 Evolución del número de subcuencas resultantes en función del umbral de área (“Threshold area”) definido para la cuenca de estudio.

3. 4. y 5. Localizar el punto de salida de la cuenca manualmente (marcándolo en el mapa). Se ha mantenido el umbral de desplazamiento por defecto (“Snap threshold”).
6. Definir subcuencas.
7. Aceptar la definición de cuenca.

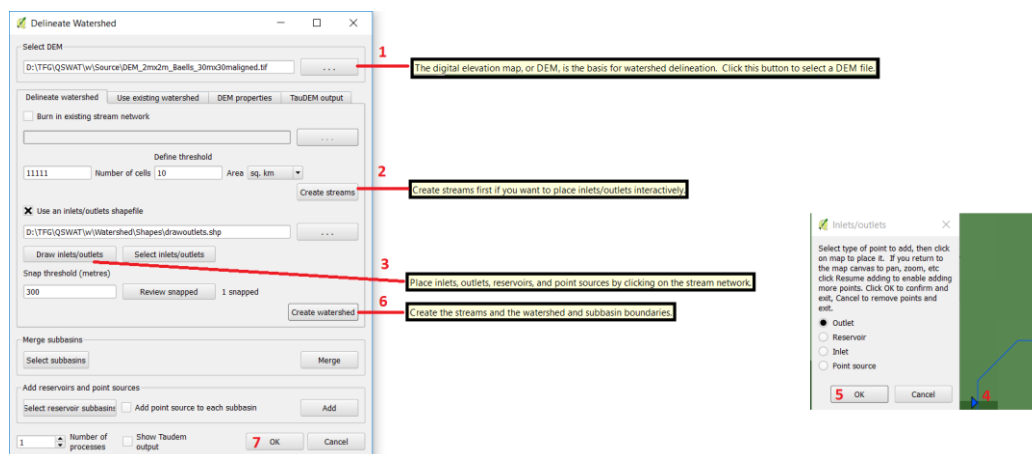


Figura 2-4 Ventanas QSWAT para “Delineate Watershed” por primera vez.

## 2.2.2. “Delineate Watershed” recuperando resultados anteriores (caso 2)

En la Figura 2-5 se puede ver cómo se procede en el caso 2:

1. Introducir el archivo TIF del modelo digital de elevaciones (“DEM”)
2. Introducir archivo ESRI Shapefile con la cuenca y subcuencas (“Watershed”) para la simulación anterior (“Nombre del proyecto/Watershed/Shapes/subs1.shp”).
3. Introducir archivo ESRI Shapefile con las corrientes principales (“Streams”) definidas para la simulación anterior (“Nombre del proyecto/Watershed/Shapes/riv1.shp”).
4. Introducir archivo ESRI Shapefile con el punto de salida (“output”) definido para la simulación anterior (“Nombre del proyecto/Watershed /Shapes/ drawoutlets\_snap.shp”).
5. Definir la cuenca.
6. Aceptar la definición de cuenca.

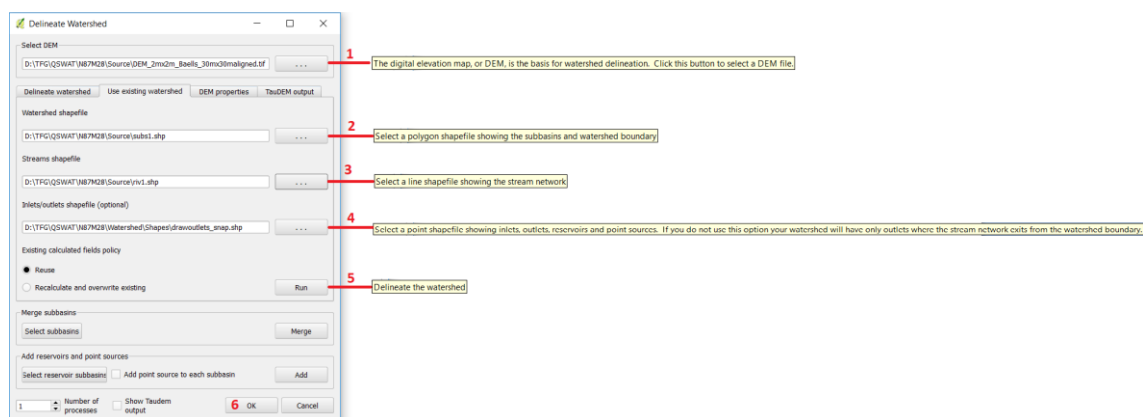


Figura 2-5 Ventana QSWAT para “Delineate Watershed” recuperando resultados anteriores.

## 2.3. “Create HRUs”

En este paso se definen los HRUs, en la Figura 1-5 se observa la ventana correspondiente de QSWAT y el orden de los pasos a realizar.

1. Introducir el archivo de mapa de usos de suelo (“Landuse map”) en formato TIF y con la clasificación según la tabla de usos del suelo global\_landuses [2].
2. Seleccionar la tabla usos del suelo (“Landuse table”) global\_landuses.
3. Introducir el archivo de mapa de suelos (“Soil map”) en formato TIF y con la clasificación según la tabla de suelos global\_soils [3].
4. Seleccionar la tabla de suelos (“Soil table”) global\_soils.
5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. Dividir en clases de pendiente. Al aumentar el número de clases aumenta el número de HRUs definidos. Un número excesivo podría ralentizar la simulación y sin una mejora significativa en la simulación [4].
13. 14. 15. Dividir en bandas de altitud las subcuencas. Esto permite subsanar la manera de asignar los datos meteorológicos de la estación o punto con datos meteorológicos más cercanos al centroide de la subcuenca al total de esta, para poder representar mejor la variación orográfica de las temperaturas y precipitación, ya que la cobertura de nieve y la fusión de la nieve pasan a calcularse independientemente en cada banda de elevación [5][6][7]. Lo que sería especialmente interesante en una cuenca con una diferencia de altimetría considerable (584,4 msnm cota mínima y 2542,21 msnm cota máxima, es decir 1957,81 m de diferencia altimétrica) y con un impacto significativo de la nieve en el ciclo hidrológico (con flujos altos y bajos de transición [8]) como la cuenca de estudio. Existen estudios que han constatado que el comportamiento del modelo en cuencas montañosas mejora con el uso de bandas de elevación [9][10][11][12][13][14][15][16][17][18][19][5][20]. El modelo permite un máximo de 10 bandas de elevación por subcuenca [5][6][7], por lo que se decide dividir las subcuencas en 10 bandas de elevación. Se ha comprobado que la configuración de bandas de elevación no representa un aumento del número de HRUs.
16. Darle a leer la información para crear las HRUs potenciales.
17. Seleccionar “Target number of HRU”.
18. Seleccionar el máximo de HRU moviendo la barra [21][4].
19. Crear las HRUs definitivas.

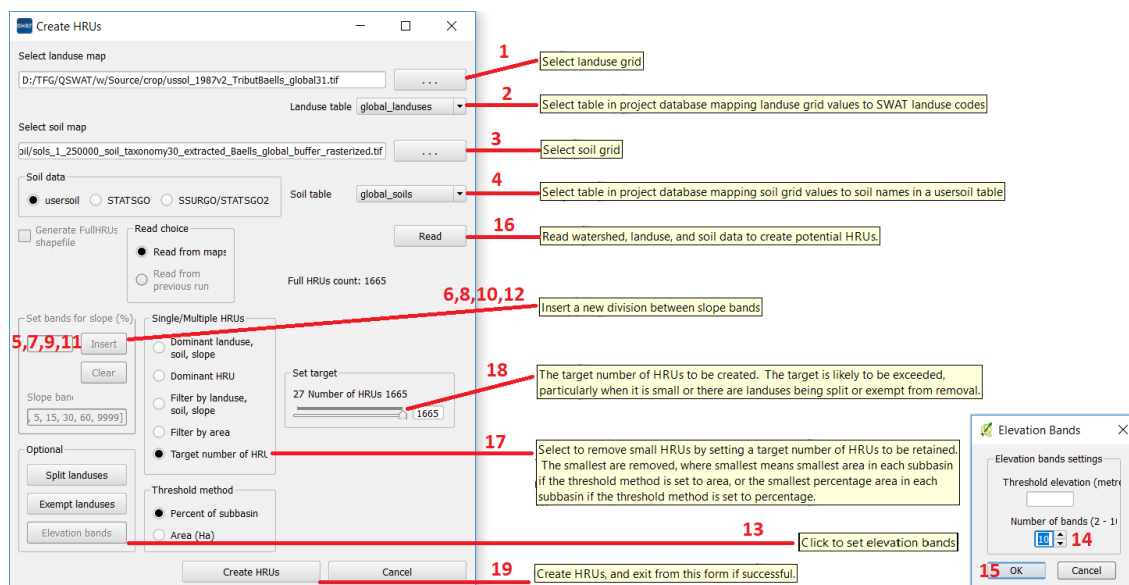


Figura 2-6 Ventanas QSWAT para “Create HRUs”.

### 2.3.1. Introducción de información de usos del suelo de diferentes años (SWAT-LUT)

Una vez creado el modelo, para que el modelo tenga en cuenta que los usos del suelo han ido variando a lo largo del tiempo se ha utilizado la herramienta SWAT-LUT [22] [23] para introducir estas variaciones en la base de datos del modelo SWAT. En la Figura 2-7 se observa la ventana correspondiente de QSWAT y el orden de los pasos a realizar:

1. 2. En la ventana “General Input”, en “Select SWAT project database” se selecciona la base de datos del proyecto SWAT y se aprieta en “Open Database”.
3. Comprobar que esté marcado “ArcSWAT Interface” y apretar “Define Landuse Rasters”.
4. 5. 6. 7. 8. Introducir la fecha (año, mes y día) del input de usos del suelo utilizado para crear y configurar el proyecto SWAT inicialmente, indicar la tipología de variación entre rasters de usos de suelo introducidos, en el caso del proyecto se decidió que fuera de año en año (“Yearly”), y apretar en “Update”.
9. Marcar “User interface”.
10. Indicar el número de rasters de usos del suelo a introducir.
11. 12. 13. Seleccionar el archivo de cada ráster de usos del suelo a introducir. Estos deben estar en formato TIF y codificados según la numeración de la tabla de usos del suelo global\_landuses [2].
14. 15. 16. Seleccionar la/s tabla/s en formato .csv con la codificación de “global\_landuses” en “Select Lookup Table”. En la Tabla 2-1 su muestra el formato y valores.

Tabla 2-1 Valores de la “Lookup Table” para “global\_landuses”.

VALUE	LANDUSE
1	URMD
2	CRDY
3	CRIR
4	MIXC
5	CRGR
6	CRWO
7	GRAS
8	SHRB
9	MIGS
10	SAVA
11	FODB
12	FODB
13	FOEB
14	FOEN
15	FOMI
16	WATR
17	WEHB
18	WEWO
19	BSVG
20	TUHB
21	TUWO
22	TUMI
23	TUBG
24	WATR

17. 18. 19. Indicar el año de cada ráster de usos del suelo a introducir.
20. 21. 22. Indicar el mes de cada ráster de usos del suelo a introducir, 12 (diciembre) generalmente.
23. 24. 25. Indicar el mes de cada ráster de usos del suelo a introducir, 31 generalmente.
26. 27. 28. Indicar la tipología de variación entre rasters de usos de suelo introducidos, en el caso del proyecto se decidió que fuera de año en año (“Yearly”), hacerlo para cada ráster de usos del suelo a introducir.
29. Apretar “Upload Landuse Rasters”.

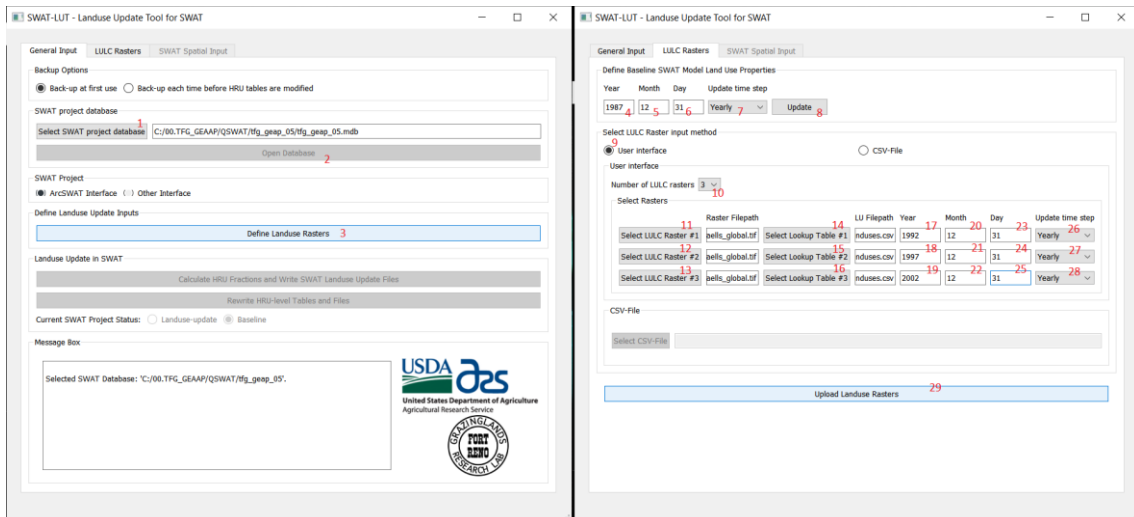


Figura 2-7 Ventanas SWAT-LUT para añadir en el modelo SWAT la variación de usos del suelo a lo largo del periodo.

Si se ha realizado correctamente el proceso, en la base de datos del proyecto tendrá la tabla “RasterInputLanduseUpdateTool” contendrá la fecha de cada ráster, las ubicaciones del ráster y de la tabla de codificación, así como el tipo de variación entre ellos.

## 2.4. “Edit Inputs and Run SWAT”

En este paso se introducen los datos meteorológicos y se configuran los parámetros de la simulación. Los pasos a seguir son (ver Figura 1-6):

1. 2. Copiar la ubicación del la base de datos introducida en SWAT Parameter Geodatabase (“ubicación\_modelo” / QSWATRef2012.mdb) en SWAT Soils Database.
3. 4. Conectar con las bases de datos “Connect to Databases”.
5. 6. Ir al menú de datos meteorológicos (“Write Input Tables / Weather Stations”)
7. 8. 8bis Seleccionar en “Locations Table” la tabla “WGEN\_user” calculada previamente a partir del histórico de datos de las estaciones y rellena en la base de datos QSWATRef2012.mdb del proyecto. Previamente a disponer de los datos necesarios para calcularla, se utilizó “WGEN\_US\_COOP\_1960\_2010”, la tabla que cubría el periodo más extenso, e incluía el periodo de simulación y calibración.
9. Ir al menú de Datos de Precipitación (“Rainfall data”).
10. Seleccionar “Raingages” para poder introducir archivos con datos de precipitación.
11. Introducir el archivo “Raingages”.
12. Ir al menú de Datos de Temperatura (“Temperature Data”).

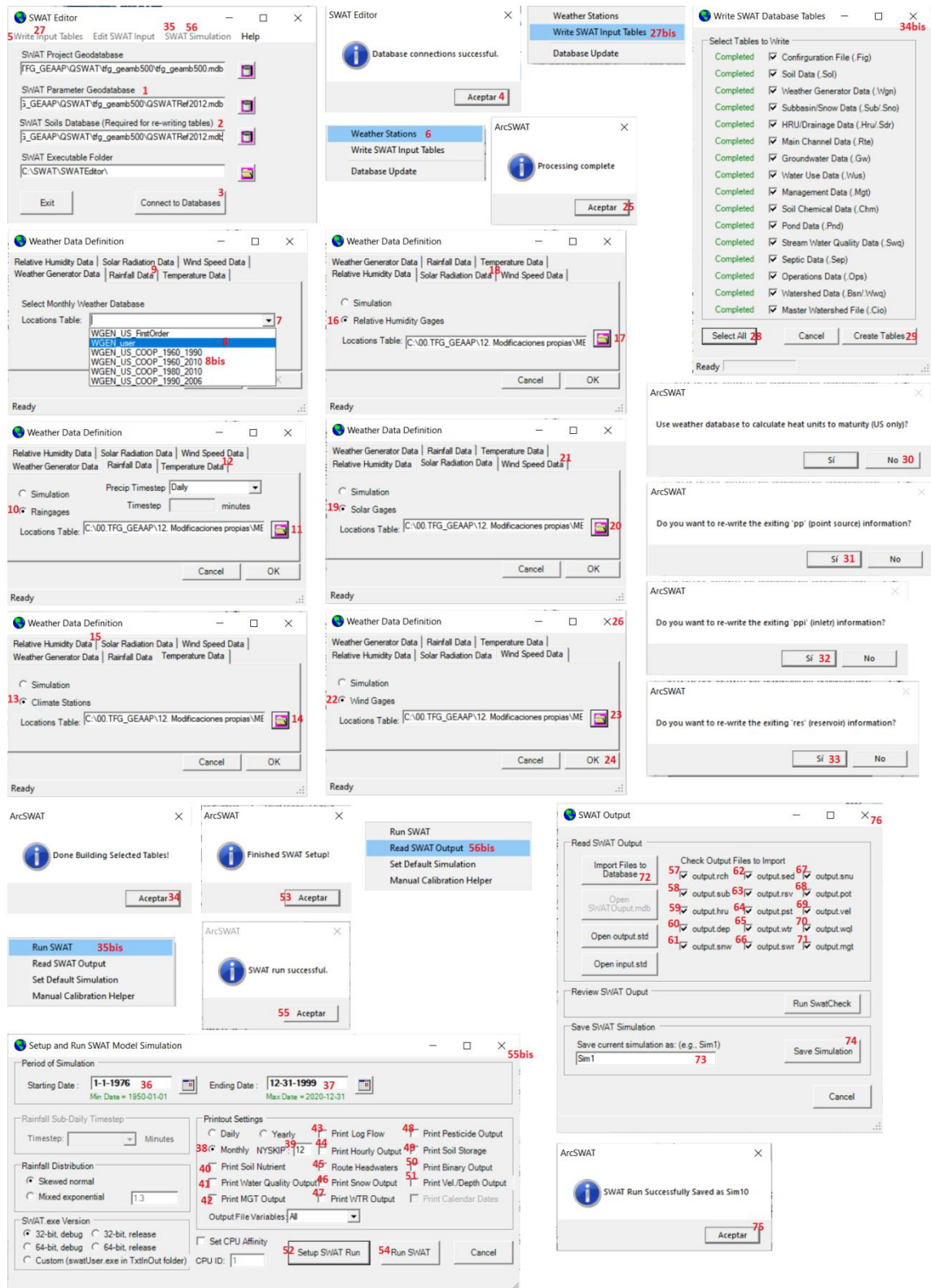


Figura 2-8 Ventanas QSWAT para “Edit Inputs and Run Swat”.

13. Seleccionar “Climate Stations” para poder introducir archivos con datos de temperatura.
14. Introducir el archivo “ClimateStations”.
15. Ir al menú de Datos de Humedad Relativa (“Relative Humidity Data”).
16. Si se dispone de datos de humedad relativa, seleccionar “Relative Humidity Gages” para poder introducir archivos con datos de humedad relativa. Si no, dejar “Simulation”.
17. Si se dispone de datos de humedad relativa, introducir el archivo “Relativehumiditygages”.
18. Ir al menú de Datos de Radiación Solar (“Solar Radiation Data”).
19. Si se dispone de datos de radiación solar, seleccionar “Solar Gages” para poder introducir archivos con datos de radiación solar. Si no, dejar “Simulation”.
20. Si se dispone de datos de radiación solar, introducir el archivo “Solargages”.
21. Ir al menú de Datos de Velocidad del Viento (“Wind Speed Data”).
22. Si se dispone de datos de velocidad del viento, seleccionar “Wind Gages” para poder introducir archivos con datos de velocidad del viento. Si no, dejar “Simulation”.
23. Si se dispone de datos de velocidad del viento, introducir el archivo “Windgages”.
24. 25. 26. Aceptar la introducción de datos meteorológicos.
27. 27bis. Ir al menú de creación de tablas de bases de datos (“Write Input Tables/Write SWAT Input Tables”).
28. Seleccionar todas las tablas.
29. 30. 31. 32. 33. 34. 34bis. Crear las tablas. Y cerrar la ventana.
35. 35bis. Ir al menú de configuración de la simulación (“SWAT Simulation/Run SWAT”).
36. Definir día inicial para empezar la simulación. Para comparar simulaciones este valor tiene que ser igual.
37. Introducir día final de la simulación.
38. Marcar simulación mensual (“Monthly”). Al disponer de datos meteorológicos diarios, se aconseja simular datos mensuales, ya que para simular datos diarios se aconseja disponer de datos meteorológicos subdiarios, es decir, es aconsejable simular a escalas temporales superiores a la de los datos meteorológicos [24].
39. Introducir duración del periodo de calentamiento “NYSKIP” (periodo en el que se realiza la simulación pero no se imprimen los datos, a la espera de que se establezca la simulación y se represente bien la inercia de los intercambios entre las aguas superficiales y subterráneas en el cálculo del caudal). Se recomiendan un mínimo de 2-3 años de periodo de calentamiento [25], muchos autores utilizan 3 años, y que se encuentre al menos entre el 10-20% del periodo de simulación. Mientras más anterior sea la fecha de inicio de la simulación contando el periodo de calentamiento, mejor se representará la inercia del sistema. Se ha observado de manera empírica que se considere periodo de calentamiento o no, si la fecha del inicio de la simulación es la misma respecto a la fecha del inicio del periodo de calentamiento en una simulación



con periodo de calentamiento, los resultados para cierta fecha serán iguales si no hay ninguna otra variación en su configuración.

40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. Marcar todos los resultados a imprimir (opcional).
52. 53. Aceptar la configuración de la simulación.
54. 55. 55bis. Realizar la simulación y cerrar.
56. 56bis. Abrir "Read SWAT Output".
57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. Seleccionar "Check Output Files to Import" e importar archivos a la base de datos "Import Files to Database". (opcional)
73. 74. Introducir el nombre de la simulación, guardar simulación ("Save Simulation").
75. 76. Aceptar y cerrar la ventana "Read SWAT Output".

### 2.4.1. Modificación de los valores de los parámetros

Algunos parámetros se pueden modificar mediante la ventana de QSWAT "Edit Inputs and Run SWAT/SWAT Simulation/Manual Calibration Helper" (ver Figura 2-9), pero otros parámetros, no aparecen en las opciones de "Select Parameter" (ver Figura 2-9) y hay que modificarlos directamente en los archivos mediante un editor de texto como "bloc de notas".

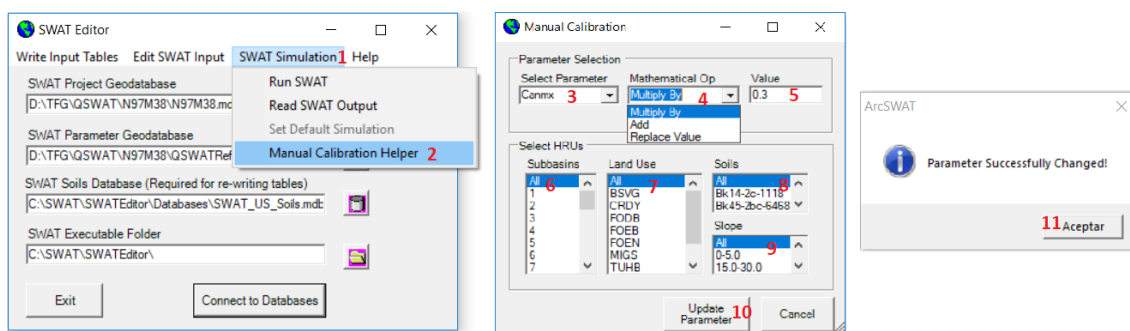


Figura 2-9 Ventanas QSWAT para modificar los parámetros ("Edit Inputs and Run SWAT").

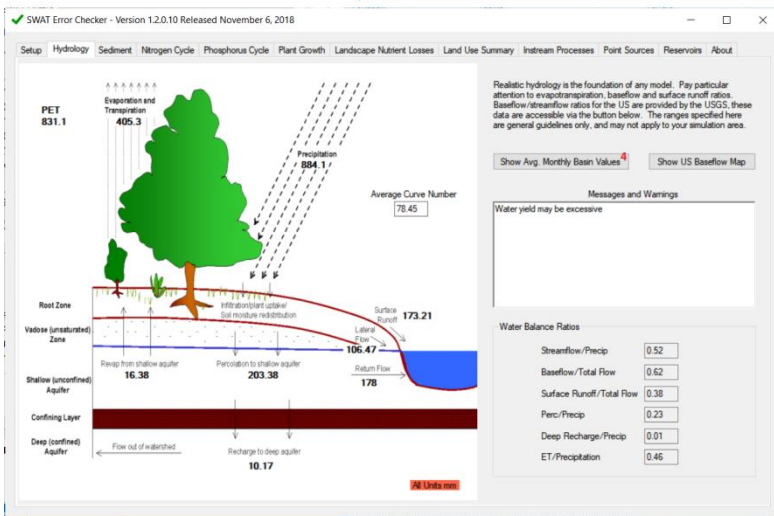
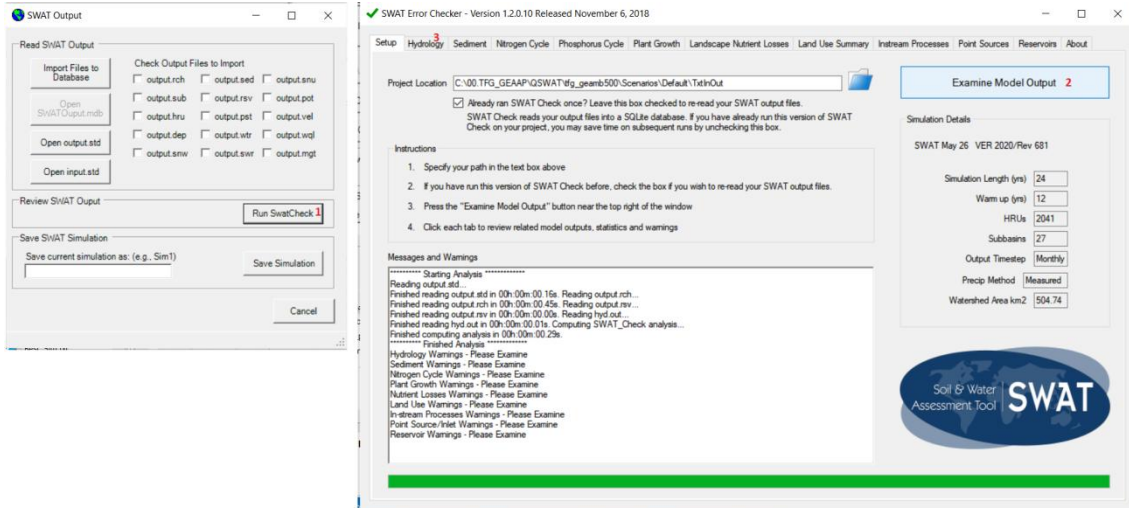
### 3. Consulta de los outputs

Los outputs se encuentran en la carpeta “Nombre del Proyecto/Scenarios/Default/TxtInOut”. Los archivos se pueden abrir con “bloc de notas”. Algunos de los más interesantes a nivel de caudal serían:

- output.std: en él se dan los resultados a nivel de cuenca.  
El parámetro más interesante para este estudio es “WATER YIELD (mm)”, “Water yield to streamflow from HRUs in watershed for the day, month or year (mm)”, caudal de salida referente a toda la cuenca. También hay datos de evapotranspiración (“ET (mm)”), precipitación (“PREC (mm)”), etc. [7]
- Output.rch: en él se dan los valores para cada corriente principal.  
El parámetro más interesante para este estudio es “FLOW\_OUTcms”, “Average daily streamflow out of reach during time step (m<sup>3</sup>/s)”, caudal de la corriente en su punto de salida.[7]
- Watout.dat: en él se dan los valores para la salida de la cuenca.  
El parámetro más interesante para este estudio es FLOWm<sup>3</sup>/s, donde se muestra el caudal medio para cada día de la simulación (aunque la simulación haya sido mensual).

A los 2 primeros también se puede acceder a través de la ventana QSWAT (“Edit Inputs and Run SWAT/SWAT Simulation/Read SWAT Output”) (ver Figura 2-7).

Es interesante para ver los datos resultantes de la simulación de una manera más visual la herramienta “Run SwatCheck” (“Edit Inputs and Run SWAT” / “SWAT Simulation” / “Read SWAT Output” / “Run SwatCheck”). Ver Figura 3-1.



Average Monthly Basin Values

| Mon | Rain (MM) | Snow Fall (MM) | SURF Q (MM) | LAT Q (MM) | Water Yield (MM) | ET (MM) | Sed. Yield (MM) | PET (MM) |
|-----|-----------|----------------|-------------|------------|------------------|---------|-----------------|----------|
| 1   | 65.43     | 16.27          | 15.78       | 9.20       | 48.41            | 7.58    | 20.59           | 14.43    |
| 2   | 18.42     | 3.33           | 3.22        | 5.62       | 29.41            | 10.23   | 5.00            | 22.83    |
| 3   | 31.43     | 4.07           | 6.91        | 4.98       | 29.31            | 20.45   | 10.30           | 53.86    |
| 4   | 72.96     | 2.01           | 8.60        | 6.28       | 27.17            | 35.49   | 15.81           | 73.08    |
| 5   | 101.21    | 0.13           | 14.47       | 12.16      | 41.67            | 56.27   | 19.23           | 107.61   |
| 6   | 91.78     | 0.00           | 13.47       | 10.30      | 41.29            | 62.65   | 13.60           | 125.13   |
| 7   | 61.17     | 0.00           | 3.89        | 6.80       | 24.49            | 61.87   | 1.96            | 143.76   |
| 8   | 97.58     | 0.00           | 10.87       | 8.96       | 28.19            | 60.27   | 4.59            | 123.20   |
| 9   | 107.26    | 0.00           | 22.42       | 10.19      | 40.91            | 41.06   | 11.85           | 81.18    |
| 10  | 90.07     | 0.00           | 24.01       | 12.39      | 49.74            | 26.36   | 16.58           | 48.27    |
| 11  | 74.76     | 3.43           | 24.70       | 9.98       | 52.17            | 14.11   | 19.45           | 23.20    |
| 12  | 71.89     | 11.49          | 24.86       | 9.67       | 55.06            | 8.86    | 19.61           | 14.31    |

Figura 3-1 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Edit Inputs and Run SWAT”).

### 3.1.1. Valores de los parámetros

Como se ha visto en la memoria, se necesita conocer los valores iniciales de los para poder definir correctamente el rango de variación en las simulaciones de calibración. Los valores de los parámetros se pueden consultar en la base de datos del proyecto, así como en los archivos que se encuentran en la carpeta “Nombre del Proyecto/Scenarios/Default/TxtInOut”. Estos, según su formato contienen unos parámetros u otros (lo mismo ocurre en la base de datos, pero localizándose en tablas con la extensión del archivo como título normalmente):

- Archivo .bsn (1): contiene los parámetros de configuración para la cuenca entera [7].
- Archivos .gw (tantos como HRUs): contienen los parámetros relacionados con el intercambio entre las aguas subterráneas y las superficiales [7].
- Archivos .hru (tantos como HRUs): contienen los parámetros de la caracterización de cada HRU [7].
- Archivos .mgt (tantos como HRUs): contiene los parámetros de manejo y comportamiento biológico de cada HRU [7].
- Archivos .rte (tantos como subcuencas): contienen los parámetros de las características de los cursos de agua superficiales [7].
- Archivos .sol (tantos como HRUs): contienen los parámetros relativos a las características edafológicas de cada HRU [7].
- Archivos .Sub (tantos como subcuencas): contienen los parámetros de caracterización para cada subcuenca [7].

Si la compilación se hace a partir de los archivos, la gran cantidad de archivos puede hacer necesaria la utilización de algún algoritmo para extraer la información, como por ejemplo la siguiente macro de MS Excel [26]:

Sub cargar\_**extensión\_archivo**()

'Selecciona una carpeta,

'abre cada archivo **extensión\_archivo** y copia la info en una fila

ruta = ThisWorkbook.Path

Set l1 = ThisWorkbook

Set fldr = Application.FileDialog(msoFileDialogFolderPicker)

With fldr

```
.Title = "Selecciona una carpeta"
```

```
.AllowMultiSelect = False
```

```
.InitialFileName = ruta
```

```
If .Show <> -1 Then Exit Sub
```

```
cp = .SelectedItems(1)
```

End With

```
Application.ScreenUpdating = False
```

```
ChDir cp & "\"
```

```
archi = Dir("*extensión_archivo ")
```

```
Do While archi <> ""
```

```
Workbooks.OpenText Filename:=cp & "\" & archi, _
```

```
Origin:=xlWindows, StartRow:=1, DataType:=xlDelimited, _
```

```
TextQualifier:=xlDoubleQuote, ConsecutiveDelimiter:=False, _
```

```
Tab:=False, Semicolon:=False, _
```

```
Comma:=True, Space:=False, _
```

```
Other:=False, OtherChar:="=", _
```

```
FieldInfo:=Array(Array(1, 2), Array(2, 2)), _
```

```
TrailingMinusNumbers:=True
```

```
Set l2 = ActiveWorkbook
```

```
Set h2 = I2.ActiveSheet
```

```
Range(Range("A1"), Range("A1").SpecialCells(xlLastCell)).Copy 'Copia todo el contenido del  
archivo de texto
```

```
'h2.Range("B3:B" & Range("B" & Rows.Count).End(xlUp).Row). _
```

```
' SpecialCells(xlCellTypeConstants, 23).Copy /Copia solo la segunda columna luego del  
separador
```

```
I1.Activate
```

```
Range("A" & Range("A" & Rows.Count).End(xlUp).Row + 1).PasteSpecial _
```

```
Paste:=xlPasteAll, _
```

```
Operation:=xlNone, _
```

```
SkipBlanks:=False, _
```

```
Transpose:=False
```

```
'Transpose:=True al pegar cambia la opción para que los datos importados se muestren  
en vertical
```

```
I2.Close False
```

```
cont = cont + 1
```

```
archi = Dir()
```

```
'MsgBox "llega hasta acá en el do " & cont /Mensaje de control, muestra si está entrando al  
do
```

```
Loop
```

```
Application.ScreenUpdating = True
```

```
MsgBox "Se cargaron : " & cont & " archivos extensión_archivo ", vbInformation, "CARGA DE  
extensión_archivo "
```

End Sub

Esta macro se tendría que modificar, reemplazando "extensión\_archivo" por cada una de las extensiones de los archivos de los que se quiere extraer los valores de los parámetros. Con lo que se conseguiría que se recopilaran en una hoja de MS Excel todos los valores de los archivos con la extensión introducida en la macro.

## Bibliografía

### Referencias bibliográficas

- [1] Y. Dile, R. Srinivasan y C. George, «User Manual: QGIS Interface for SWAT (QSWAT). Version 1.9.,» 08 2019. [En línea]. Available: [https://swat.tamu.edu/media/116371/qswat-manual\\_v19.pdf](https://swat.tamu.edu/media/116371/qswat-manual_v19.pdf). [Último acceso: 20 01 2022].
- [2] M. Mwiza, «Application of remote sensing using a GIS based soil water assessment tool (SWAT) to estimate river discharge in the Kabompo river basin-Zambia,» 2012.
- [3] GitHub, Inc, «DSMW - WORLD764.xls,» 2019. [En línea]. Available: <https://github.com/DublinR/GISwithRDemo/blob/master/JW/DSMW/WORLD764.xls>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [4] Y. Her, J. Frankenberger, I. Chaubey y R. Srinivasan, «Threshold effects in HRU definition of the Soil and Water Assessment Tool,» *Transactions of the ASABE*, vol. 58, pp. 367-378, 2015.
- [5] K. C. Abbaspour, J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist y R. Srinivasan, «Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT,» *Journal of Hydrology*, vol. 333, pp. 413-430, 2007.
- [6] S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry y J. R. Williams, *Soil & Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2009.,* 2009.
- [7] J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney y S. L. Neitsch, *Soil & Water Assessment Tool. Input/Output Documentation. Version 2012,* 2012.
- [8] L. Gottschalk, J. L. Jensen, D. Lundquist, R. Solantie y A. Tollan, «Hydrologic Regions in the Nordic Countries,» *Hydrology Research*, vol. 10, pp. 273-286, 10 1979.
- [9] T. A. Fontaine, T. S. Cruickshank, J. G. Arnold y R. H. Hotchkiss, «Development of a snowfall–snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT),»



*Journal of Hydrology*, vol. 262, pp. 209-223, 2002.

- [10] K. Rahman, C. Maringanti, M. Beniston, F. Widmer, K. Abbaspour y A. Lehmann, «Streamflow Modeling in a Highly Managed Mountainous Glacier Watershed Using SWAT: The Upper Rhone River Watershed Case in Switzerland,» *Water Resources Management*, vol. 27, 11 2013.
- [11] Y. Grusson, X. Sun, S. Gascoin, S. Sauvage, S. Raghavan, F. Anctil y J.-M. Sánchez-Pérez, «Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and streamflow dynamics over an alpine watershed,» *Journal of Hydrology*, vol. 531, pp. 574-588, 2015.
- [12] J. Schwank, R. Escobar, G. H. Girón y E. Morán-Tejeda, «Modeling of the Mendoza river watershed as a tool to study climate change impacts on water availability,» *Environmental Science and Policy*, vol. 43, pp. 91-97, 2014.
- [13] R. S. Ahl, S. W. Woods y H. R. Zuuring, «Hydrologic calibration and validation of SWAT in a snow-dominated Rocky Mountain watershed, Montana, U.S.A.,» *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 44, pp. 1411-1430, 2008.
- [14] X. Sun, Y. Hong, L. Bernard-Jannin, R. Chea, S. Sauvage y J. M. Sánchez Pérez, «Effects of elevation bands and snow parameters on the hydrological modeling of the upper part of the Garonne watershed (France),» de *(2013 International SWAT Conference, Toulouse, France)*, 2013.
- [15] Y. Tuo, Z. Duan, M. Disse y G. Chiogna, «Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige river basin (Italy),» *Science of the Total Environment*, vol. 573, pp. 66-82, 2016.
- [16] L. Palazón y A. Navas, «Case study: Effect of climatic characterization on river discharge in an alpine-prealpine catchment of the spanish pyrenees using the SWAT model,» *Water (Switzerland)*, vol. 8, 2016.
- [17] M. Meaurio, A. Zabaleta, J. A. Uriarte, R. Srinivasan y I. Antigüedad Auzmendi, «Evaluation of

- SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed,» *Journal of Hydrology*, vol. 525, pp. 326-334, 2015.
- [18] L. Palazón y A. Navas, «Modeling sediment sources and yields in a Pyrenean catchment draining to a large reservoir (Ésera River, Ebro Basin),» *Journal of Soils and Sediments*, vol. 14, pp. 1612-1625, 2014.
- [19] C. Carvalho-Santos, J. P. Nunes, A. T. Monteiro, L. Hein y J. P. Honrado, «Assessing the effects of land cover and future climate conditions on the provision of hydrological services in a medium-sized watershed of Portugal,» *Hydrological Processes*, vol. 30, pp. 720-738, 2016.
- [20] K. C. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. A. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang y B. Kløve, «A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model,» *Journal of Hydrology*, vol. 524, pp. 733-752, 2015.
- [21] M. Strauch, R. Otto y M. Volk, «HRU aggregation and its effects on model outputs,» de 2015 *International SWAT Conference, Sardinia, June, 2015*.
- [22] D. N. Moriasi, P. Naresh, J. L. Steiner, P. H. Gowda, M. Winchell, H. Rathjens, P. J. Starks y J. A. Verser, «SWAT-LUT: A Desktop Graphical User Interface for Updating Land Use in SWAT,» *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 55, nº 5, pp. 1102-1115, 3 09 2019.
- [23] D. Moriasi y V. Alan, «SWAT-LUT - Download : USDA ARS,» USDA ARS, 02 05 2016. [En línea]. Available: <https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=SWAT-LUT&modecode=30-70-05-00>. [Último acceso: 22 06 2022].
- [24] S. S. Putra, «Step 9.a QGIS Interface for SWAT (QSWAT) Tutorial,» 24 11 2016. [En línea]. Available: <https://santosasandyputra.wordpress.com/2016/11/24/step-9-a-qgis-interface-for-swat-qswat-tutorial/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [25] K. C. Abbaspour, SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual,

2015.

- [26] R. I. Gonzales Romero, «Copiar el contenido de archivos txt incrementalmente sobre hoja de excel,» Todoexpertos, 26 02 2015. [En línea]. Available: <https://www.todoexpertos.com/categorias/tecnologia-e-internet/software-y-aplicaciones/microsoft-excel/respuestas/834w4566guxhc/copiar-el-contenido-de-archivos-txt-incrementalmente-sobre-hoja-de-excel>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [27] G. Fischer, F. O. Nachtergaele, S. Prieler, E. Teixeira, G. Toth, H. Velthuisen, L. Verelst y D. Wiberg, «Global Agro-ecological Zones (GAEZ v3.0): Model Documentation,» 2012.
- [28] J. Almorox, La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación, 2010.
- [29] FAO, Guidelines for Soil Description, 4th ed., Rome, 2006.
- [30] EEA, «Land resources,» CORINE Land resources, 1994.

## **Anejo B**

**Estudio de las características  
de la cuenca de estudio y  
preparación de los inputs**

## Sumario

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>                         | <b>2</b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b>                          | <b>4</b>  |
| <b>SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS</b>                      | <b>5</b>  |
| <b>1. OROGRAFÍA E HIDROGRAFÍA</b>                | <b>9</b>  |
| 1.1. Tabla "ElevationBands" de SWAT .....        | 17        |
| <b>2. EDAFOLOGÍA</b>                             | <b>20</b> |
| <b>3. CLIMATOLOGÍA</b>                           | <b>22</b> |
| 3.1. Spain02_v5 .....                            | 22        |
| 3.1.1. Creación de estaciones virtuales.....     | 23        |
| <b>4. PREPARACIÓN ARCHIVOS CON DATOS DIARIOS</b> | <b>24</b> |
| 4.1.1. Base teórica .....                        | 24        |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>                              | <b>43</b> |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1-1 Altitudes del entorno de la cuenca de estudio.   | 10 |
| Figura 1-2 Rangos de altitudes máximas para cada subcuenca.   | 10 |
| Figura 1-3 Rangos de altitudes medias para cada subcuenca.  | 11 |
| Figura 1-4 Rangos de altitudes mínimas para cada subcuenca.   | 11 |
| Figura 1-5 Rangos de variación de altitud para cada subcuenca.  | 12 |
| Figura 1-6 Rangos del coeficiente de variación (CV) de la altitud para cada subcuenca.  | 12 |
| Figura 1-7 Pendientes en la cuenca de estudio.  | 13 |
| Figura 1-8 Rangos de pendientes máximas para cada subcuenca.  | 13 |
| Figura 1-9 Rangos de pendientes medias para cada subcuenca.   | 14 |
| Figura 1-10 Rangos de pendientes mínimas para cada subcuenca.   | 14 |
| Figura 1-11 Rangos de variación de las pendientes para cada subcuenca.  | 15 |
| Figura 1-12 Rangos del coeficiente de variación (CV) de las pendientes para cada subcuenca.   | 15 |
| Figura 1-13 Pendientes clasificadas según las clases implementadas en el modelo SWAT.   | 16 |
| Figura 1-14 Pendientes según las clases implementadas en el modelo SWAT dominantes en cada subcuenca (mayor superficie).  | 16 |
| Figura 1-15 Red hidrográfica básica de cada subcuenca de la cuenca de estudio, caracterizando cada curso fluvial con su correspondiente número de Strhaler.   | 17 |
| Figura 2-1 Distribución de suelos en la cuenca de estudio según clases de suelo combinando la clasificación Soil Taxonomy (ST) del United States Department of Agriculture (USDA) y la World Reference Base for soil resources (WRB) de la Food and Agriculture Organization of |    |

the United Nations (FAO) y la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). \_\_\_\_\_ 20

Figura 2-2 Clase de suelo dominante en cada subcuenca según clases de suelo combinando la clasificación Soil Taxonomy (ST) del United States Department of Agriculture (USDA) y la World Reference Base for soil resources (WRB) de la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) y la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). \_\_\_\_\_ 21

Figura 3-1 Ventana Netcdf-Extractor \_\_\_\_\_ 22

Figura 3-2 Proceso de creación de estaciones virtuales en los centroides de las subcuencas de la cuenca de estudio, interpolando los datos a partir de la proporción de área de influencia de cada uno de los puntos con datos de la rejilla Spain02\_v5 y teniendo en cuenta la orografía mediante estimación de costes acumulados \_\_\_\_\_ 23

Figura 3-1 Ventana Netcdf-Extractor \_\_\_\_\_ 27

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1-1 Características orográficas de la cuenca de estudio  | 9  |
| Tabla 1-2 Proporción de cuenca incluida en cada una de las clases de pendientes definidas en SWAT.   | 9  |
| Tabla 1-3 Tabla “ElevationBands” implementada. Columnas con la altitud del valor central del rango de altitudes de cada banda para cada subcuenca. | 18 |
| Tabla 1-4 Tabla “ElevationBands” implementada. Columnas con el ratio de superficie de cada subcuenca para cada banda.                              | 19 |



## Símbolos y acrónimos

|         |  |
|---------|--|
| 95PPU   | 95% Prediction Uncertainty   |
| ACA     | Agència Catalana de l'Aigua  |
| AEMET   | Agencia Estatal de Meteorología                                      |
| ASCII   | American Standard Code for Information Interchange                   |
| CREAF   | Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals                  |
| EEABB   | Escola d'Enginyeria Agroalimentària i de Biosistemes de Barcelona    |
| EEA     | European Environment Agency  |
| CEC     | Council of the European Union  |
| CORINE  | Coordination of the Information on the Environment                   |
| CTP     | Comunidad de Trabajo de los Pirineos                                 |
| CTFC    | Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya                 |
| DEM     | Digital Elevations Model (Modelo Digital de Elevaciones del terreno) |
| DIBA    | Diputació de Barcelona   |
| FAO     | Food and Agriculture Organization of the United Nations              |
| GIGO    | Garbage In, Garbage Out  |
| GIS     | Geographic Information System  |
| Glue    | Generalized Likelihood Uncertainty Estimation                        |
| Grumets | Grup de Recerca en Teledetecció i Sistemes d'Informació Geogràfica   |

|            |  |
|------------|--|
| HRUs       | Hydrologic Response Units  |
| HWSD       | Harmonized World Soil Database   |
| ICGC       | Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya   |
| IDAEA-CSIC | Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua del Consejo Superior de Investigaciones Científicas |
| IDESCAT    | Institut d'Estadística de Catalunya  |
| IGME       | Instituto Geológico y Minero de España   |
| IGN        | Instituto Geográfico Nacional  |
| IIASA      | International Institute for Applied Systems Analysis   |
| IMDEA      | Instituto Madrileño de Estudios Avanzados  |
| IPCC       | Intergovernmental Panel on Climate Change  |
| ISRIC      | International Soil Reference and Information Centre  |
| JRC        | Joint Research Centre  |
| LiDAR      | Light Detection and Ranging  |
| LHS        | Latin Hypercube Sampling   |
| McMc       | Markov chain Monte Carlo   |
| MCSC       | Mapa de Cobertes de Sòl de Catalunya   |
| MSC250M    | Mapa de Sòls de Catalunya 1:250.000  |
| NetCDF     | Network Common Data Form   |
| OFC        | Observatori Forestal Català  |

|          |  |
|----------|--|
| OMM      | Organización Meteorológica Mundial   |
| OPCC     | Observatorio Pirenaico de Cambio Climático                                   |
| ParaSol  | Parameter Solution   |
| PEC      | Performance Evaluation Criteria (criterios de evaluación del comportamiento) |
| PSO      | Particle Swarm Optimization  |
| QGIS     | Quantum GIS  |
| QSWAT    | QGIS interface for SWAT  |
| SCP      | Semi-Automatic Classification Plugin de QGIS                                 |
| SMC      | Servei Meteorològic de Catalunya   |
| SMU      | Soil Mapping Units   |
| SQL      | Structured Query Language  |
| ST       | Soil Taxonomy  |
| SUFI-2   | Sequential Uncertainty Fitting   |
| SWAT     | Soil and Water Assessment Tool   |
| SWAT-CUP | SWAT Calibration and Uncertainty Programs                                    |
| SWAT-LUT | Landuse Update Tool for SWAT   |
| TIF      | Tagged Image File format   |
| UAB      | Universitat Autònoma de Barcelona  |
| UB       | Universitat de Barcelona   |
| UC       | Universidad de Cantabria   |

|          |  |
|----------|--|
| UPC      | Universitat Politècnica de Catalunya                             |
| UPV      | Universitat Politècnica de València                              |
| UN       | United Nations   |
| UNESCO   | United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization |
| U.S. EPA | United States Environmental Protection Agency                    |
| USDA     | United States Department of Agriculture                          |
| USGS     | United States Geological Survey                                  |
| USLE     | Universal Soil Loss Equation                                     |
| WGEN     | Weather Generator  |
| WRB      | World Reference Base for Soil Resources                          |

## 1. Orografía e hidrografía

En la Tabla 1-1 se muestran las características altitudinales y de pendientes de la cuenca de estudio y sus subcuencas, mientras que en la Tabla 1-2 se muestra la proporción de superficie de cuenca que se incluye en cada una de las clases de pendientes implementadas en la configuración del modelo SWAT para este estudio. En las Figuras 1-1 a 1-20 se muestra esta información geolocalizada.

Tabla 1-1 Características orográficas de la cuenca de estudio

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

| Subcuenca | Área (km <sup>2</sup> ) | Cota          |              |                |               |                   |                               | Pendiente  |           |             |            |                |                               |
|-----------|-------------------------|---------------|--------------|----------------|---------------|-------------------|-------------------------------|------------|-----------|-------------|------------|----------------|-------------------------------|
|           |                         | Mínima (msnm) | Media (msnm) | Mediana (msnm) | Máxima (msnm) | Diferencia (msnm) | Coefficiente de Variación (%) | Mínima (%) | Media (%) | Mediana (%) | Máxima (%) | Diferencia (%) | Coefficiente de Variación (%) |
| 1         | 26.26                   | 799.07        | 1536.66      | 1477.60        | 2526.09       | 1727.02           | 24.22                         | 0.91       | 62.79     | 58.94       | 410.87     | 409.96         | 207.23                        |
| 2         | 35.75                   | 838.09        | 1486.25      | 1430.47        | 2409.12       | 1571.03           | 22.11                         | 0.53       | 43.28     | 42.01       | 154.86     | 154.33         | 239.81                        |
| 3         | 34.38                   | 798.79        | 1406.00      | 1357.67        | 2462.19       | 1663.40           | 23.99                         | 0.68       | 57.59     | 56.99       | 242.94     | 242.26         | 264.27                        |
| 4         | 23.23                   | 764.66        | 1479.75      | 1417.36        | 2407.95       | 1643.29           | 26.13                         | 0.63       | 47.93     | 47.77       | 169.01     | 168.38         | 263.18                        |
| 5         | 23.41                   | 952.61        | 1655.77      | 1623.30        | 2542.21       | 1589.60           | 23.45                         | 1.41       | 62.38     | 60.07       | 350.82     | 349.40         | 227.46                        |
| 6         | 38.03                   | 874.18        | 1243.68      | 1193.56        | 2050.38       | 1176.20           | 19.02                         | 0.15       | 41.52     | 40.18       | 180.32     | 180.17         | 226.52                        |
| 7         | 10.66                   | 875.99        | 1293.79      | 1303.36        | 1758.85       | 882.86            | 12.95                         | 0.67       | 47.94     | 45.39       | 247.41     | 246.74         | 192.00                        |
| 8         | 24.81                   | 950.60        | 1594.78      | 1553.07        | 2489.47       | 1538.87           | 21.67                         | 0.18       | 39.56     | 33.85       | 350.68     | 350.49         | 158.17                        |
| 9         | 21.14                   | 735.98        | 1331.34      | 1281.03        | 2266.99       | 1531.01           | 21.25                         | 0.01       | 33.02     | 26.67       | 186.57     | 186.55         | 158.62                        |
| 10        | 14.30                   | 637.29        | 1482.94      | 1506.98        | 2295.52       | 1658.23           | 21.85                         | 0.66       | 42.44     | 40.01       | 218.48     | 217.82         | 175.61                        |
| 11        | 13.72                   | 741.89        | 1318.80      | 1387.67        | 1778.62       | 1036.73           | 20.86                         | 0.53       | 46.13     | 42.21       | 283.98     | 283.44         | 190.27                        |
| 12        | 16.58                   | 741.47        | 1104.70      | 1054.70        | 1748.56       | 1007.09           | 19.07                         | 0.91       | 48.15     | 45.85       | 244.00     | 243.09         | 202.39                        |
| 13        | 28.39                   | 627.45        | 1425.24      | 1461.61        | 2289.85       | 1662.40           | 25.34                         | 0.06       | 48.21     | 47.64       | 241.19     | 241.12         | 194.36                        |
| 14        | 34.10                   | 628.28        | 951.26       | 933.00         | 1512.61       | 884.33            | 16.44                         | 0.34       | 40.22     | 38.58       | 185.91     | 185.57         | 193.91                        |
| 15        | 6.39                    | 628.35        | 887.48       | 836.55         | 1514.46       | 886.11            | 21.28                         | 0.85       | 40.20     | 38.64       | 165.09     | 164.24         | 202.89                        |
| 16        | 28.06                   | 734.75        | 1200.35      | 1192.76        | 1869.48       | 1134.73           | 17.65                         | 0.17       | 48.80     | 47.43       | 201.94     | 201.77         | 191.32                        |
| 17        | 18.33                   | 712.64        | 1055.34      | 1008.87        | 1747.51       | 1034.87           | 21.73                         | 0.45       | 44.07     | 44.41       | 152.21     | 151.77         | 208.87                        |
| 18        | 2.98                    | 838.12        | 1001.45      | 961.71         | 1396.56       | 558.44            | 12.68                         | 1.09       | 37.04     | 35.58       | 107.42     | 106.34         | 203.85                        |
| 19        | 14.16                   | 625.64        | 848.02       | 794.25         | 1640.48       | 1014.84           | 23.47                         | 0.02       | 45.85     | 42.15       | 286.72     | 286.70         | 161.23                        |
| 20        | 21.21                   | 762.63        | 1125.68      | 1097.80        | 1761.93       | 999.30            | 21.00                         | 0.33       | 42.44     | 41.69       | 158.33     | 157.99         | 218.09                        |
| 21        | 4.95                    | 693.07        | 953.64       | 924.72         | 1350.89       | 657.82            | 16.70                         | 1.01       | 41.88     | 35.76       | 168.14     | 167.14         | 160.81                        |
| 22        | 7.15                    | 711.06        | 914.07       | 870.98         | 1544.98       | 833.92            | 16.55                         | 0.45       | 40.95     | 36.43       | 222.67     | 222.22         | 147.22                        |
| 23        | 12.66                   | 693.07        | 1125.92      | 1128.03        | 1778.67       | 1085.60           | 19.05                         | 0.52       | 42.68     | 42.60       | 176.76     | 176.23         | 191.32                        |
| 24        | 19.00                   | 625.78        | 1062.26      | 1044.43        | 1701.08       | 1075.30           | 21.15                         | 0.39       | 48.21     | 41.57       | 228.02     | 227.63         | 154.08                        |
| 25        | 19.04                   | 625.58        | 1000.42      | 955.36         | 1658.11       | 1032.53           | 25.09                         | 0.00       | 45.29     | 42.01       | 272.04     | 272.04         | 163.81                        |
| 26        | 5.59                    | 627.48        | 784.00       | 750.56         | 1260.20       | 632.72            | 18.10                         | 0.00       | 36.22     | 35.67       | 146.65     | 146.65         | 138.94                        |
| 27        | 0.48                    | 584.40        | 647.10       | 628.53         | 788.70        | 204.30            | 4.72                          | 0.01       | 20.79     | 14.41       | 141.46     | 141.45         | 89.43                         |
| TOTAL     | 504.74                  | 584.40        | 1270.46      | 1215.32        | 2542.21       | 1957.81           | 28.86                         | 0.00       | 46.40     | 44.46       | 410.87     | 410.87         | 53.33                         |

Tabla 1-2 Proporción de cuenca incluida en cada una de las clases de pendientes definidas en SWAT.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

| Pendiente (%) |        | % cuenca |
|---------------|--------|----------|
| Mínima        | Máxima |          |
| 0             | < 5    | 0.92     |
| 5             | < 15   | 5.33     |
| 15            | < 30   | 19.74    |
| 30            | < 60   | 48.51    |
| 60            |        | 25.50    |

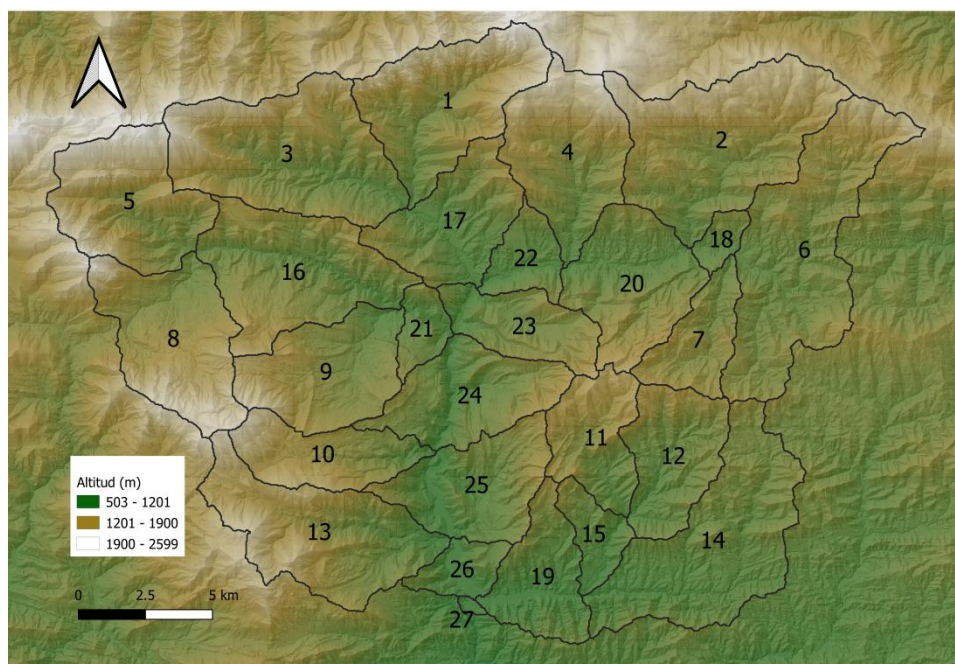


Figura 1-1 Altitudes del entorno de la cuenca de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

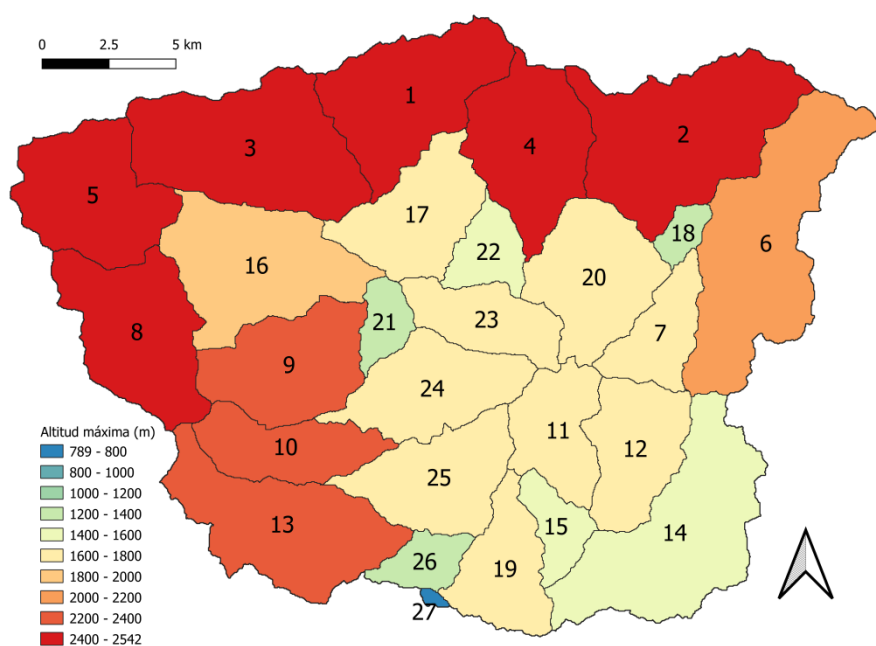


Figura 1-2 Rangos de altitudes máximas para cada subcuenca.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

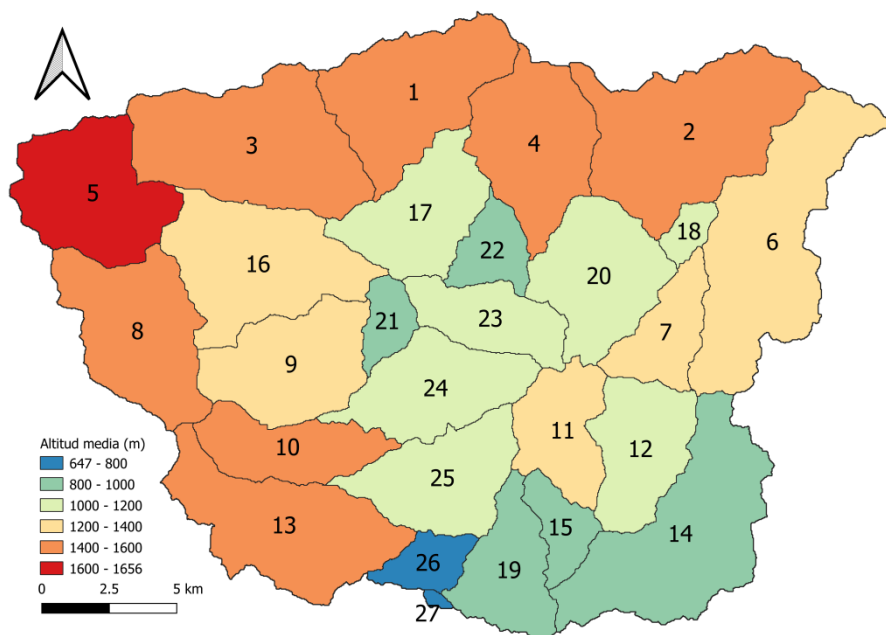


Figura 1-3 Rangos de altitudes medias para cada subcuenca.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

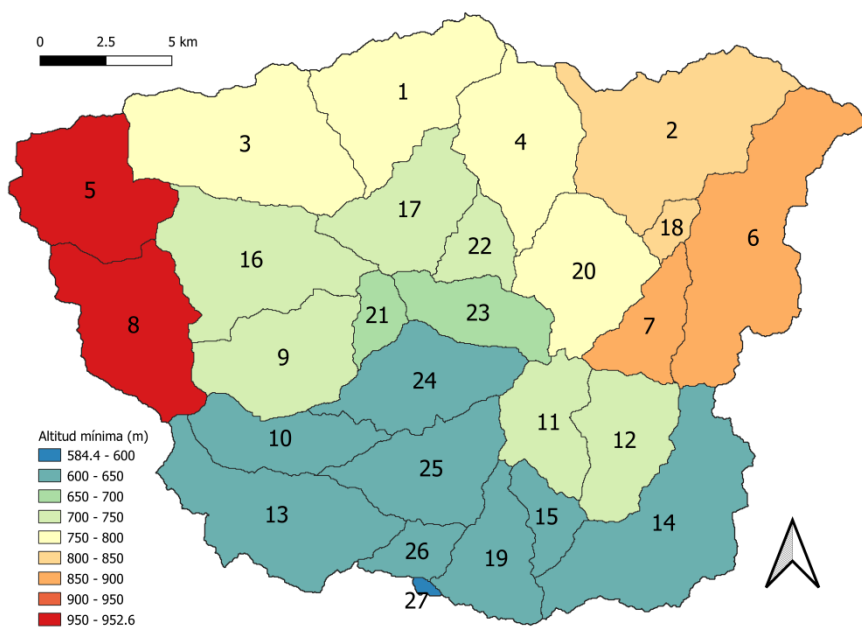


Figura 1-4 Rangos de altitudes mínimas para cada subcuenca.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

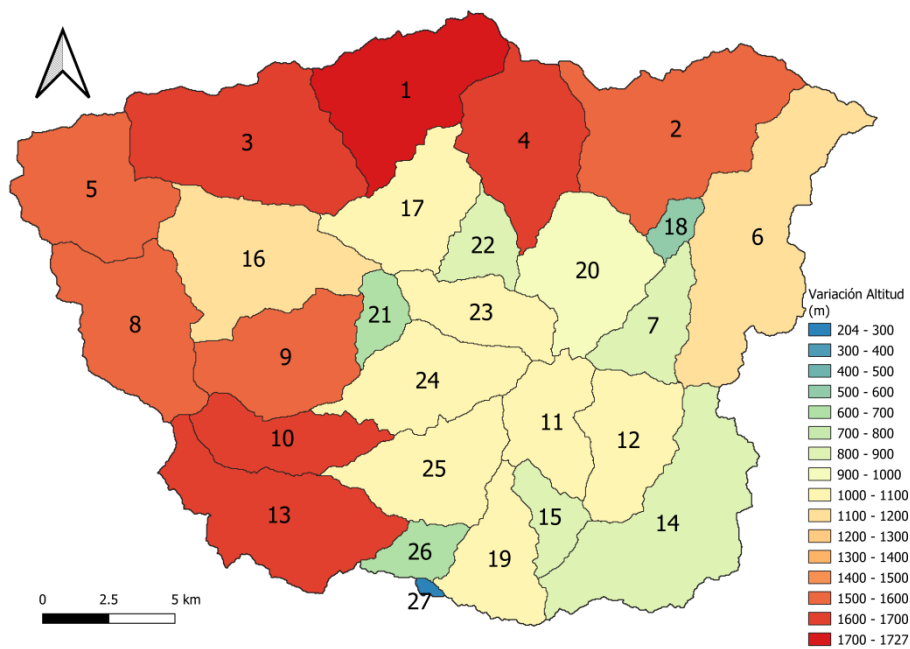


Figura 1-5 Rangos de variación de altitud para cada subcuenca.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

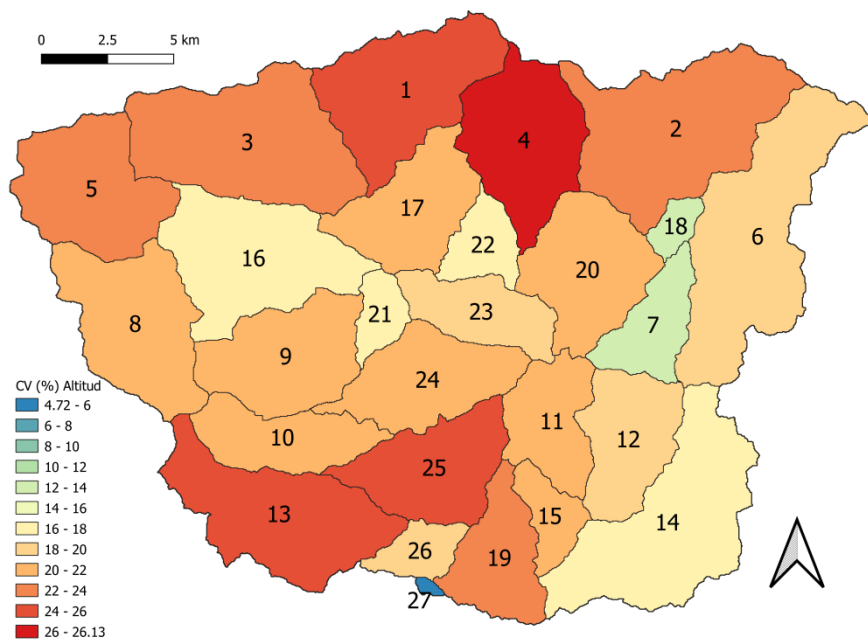


Figura 1-6 Rangos del coeficiente de variación (CV) de la altitud para cada subcuenca.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].



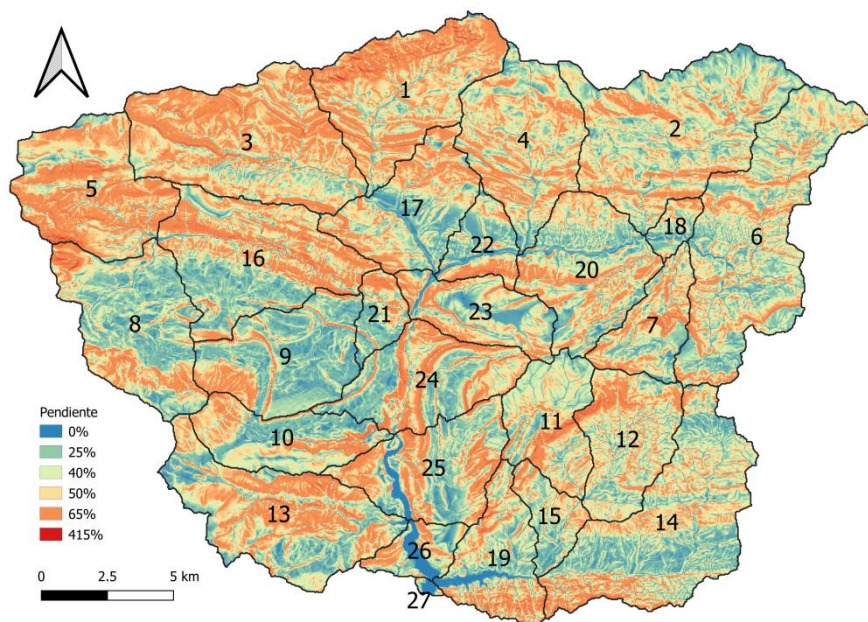


Figura 1-7 Pendientes en la cuenca de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

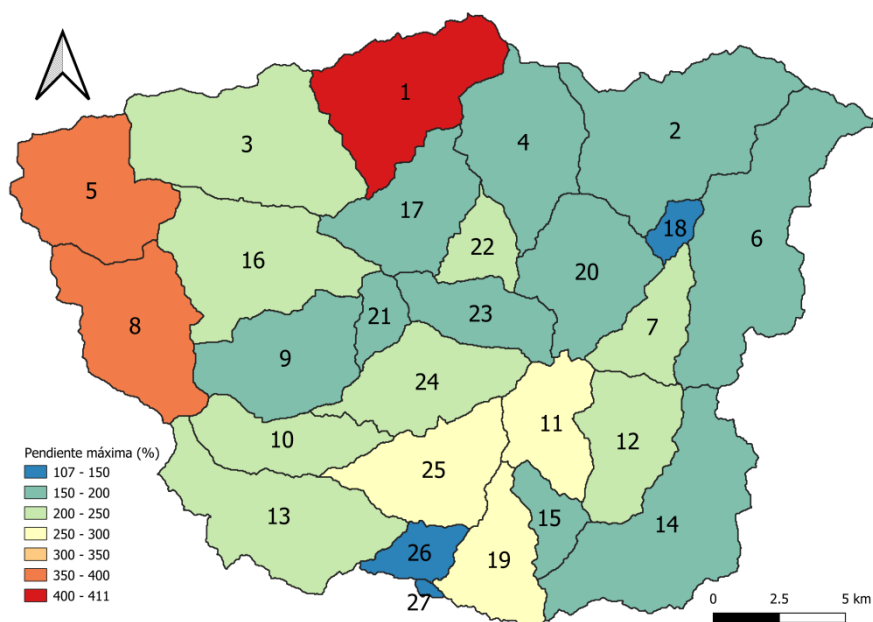


Figura 1-8 Rangos de pendientes máximas para cada subcuenca.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

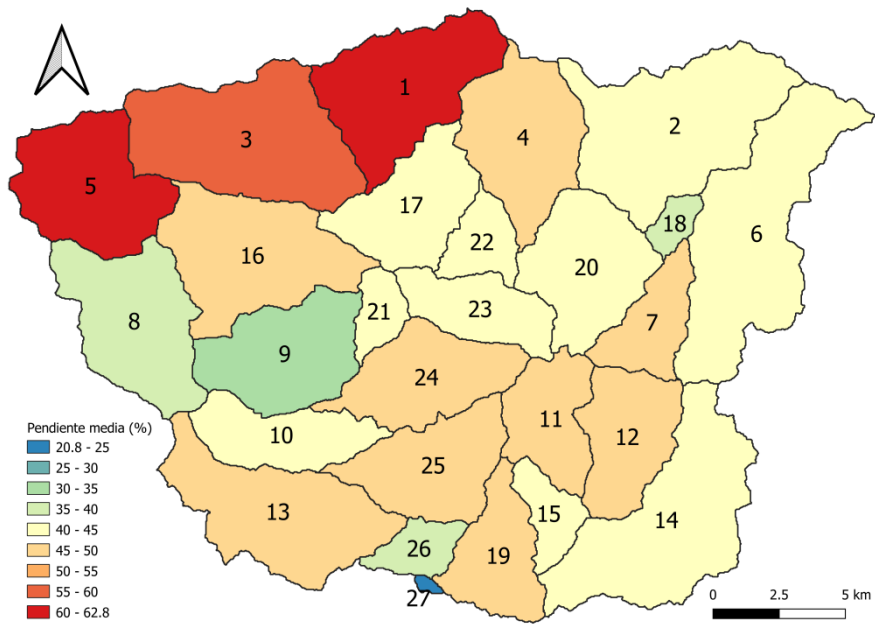


Figura 1-9 Rangos de pendientes medias para cada subcuenca.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

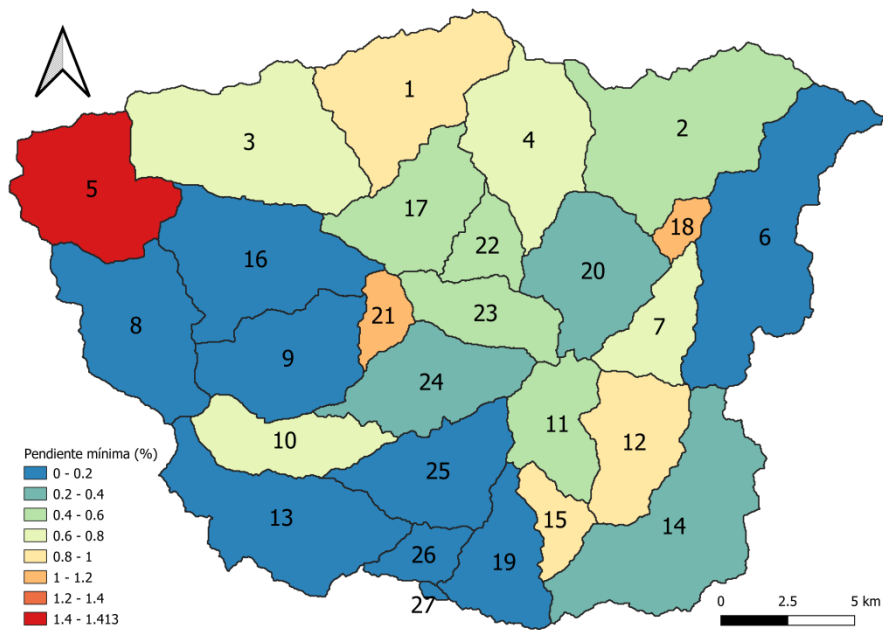


Figura 1-10 Rangos de pendientes mínimas para cada subcuenca.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

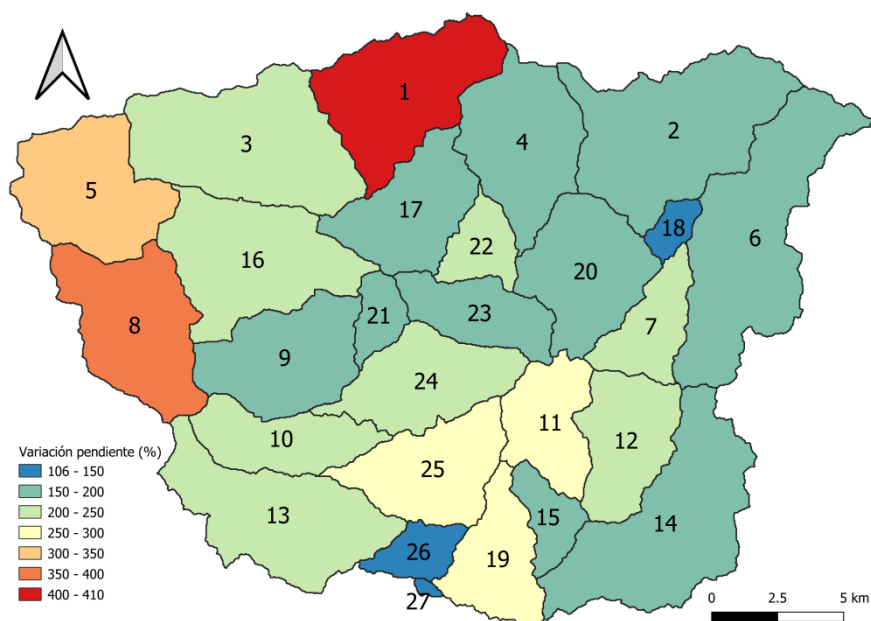


Figura 1-11 Rangos de variación de las pendientes para cada subcuena.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

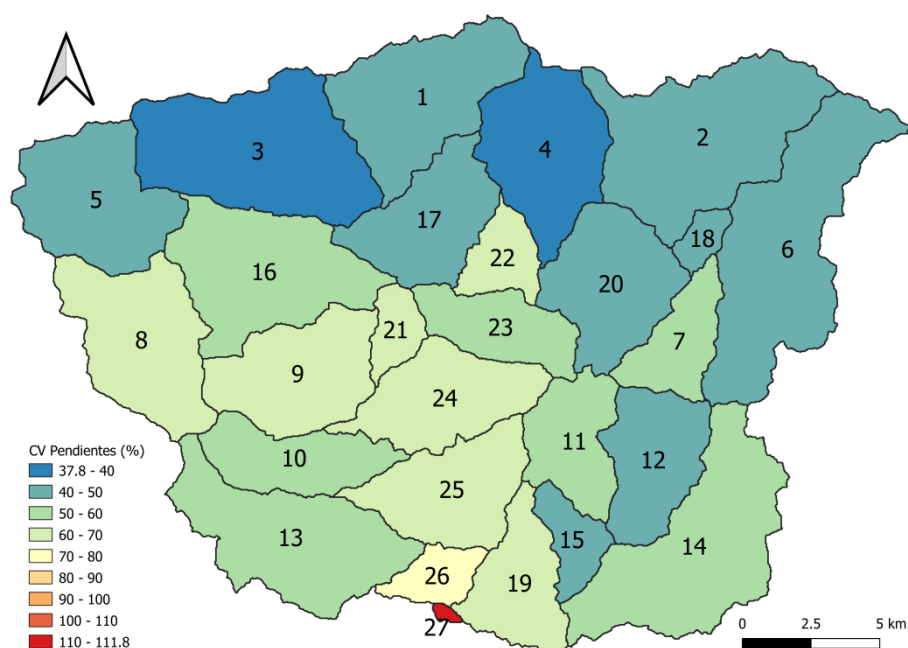


Figura 1-12 Rangos del coeficiente de variación (CV) de las pendientes para cada subcuena.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

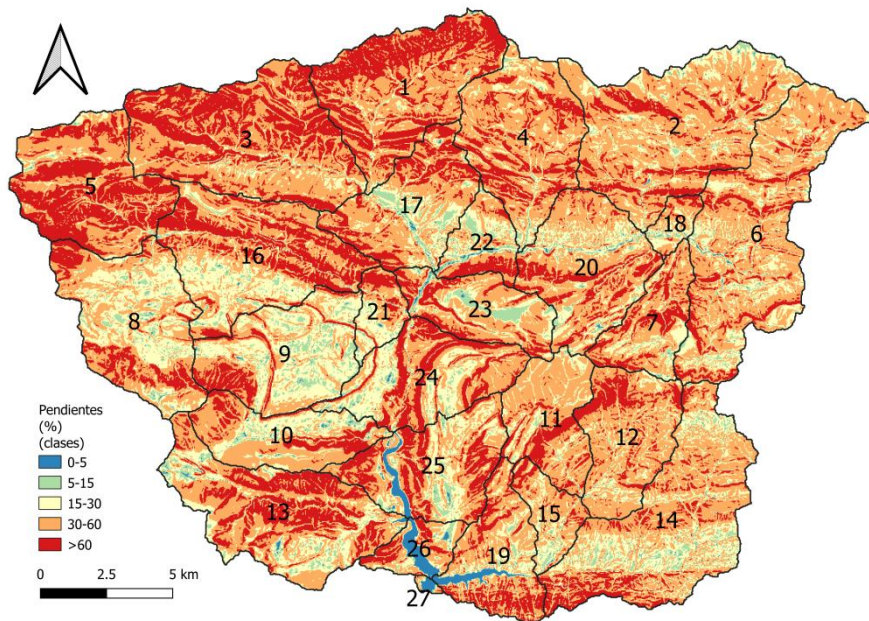


Figura 1-13 Pendientes clasificadas según las clases implementadas en el modelo SWAT.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

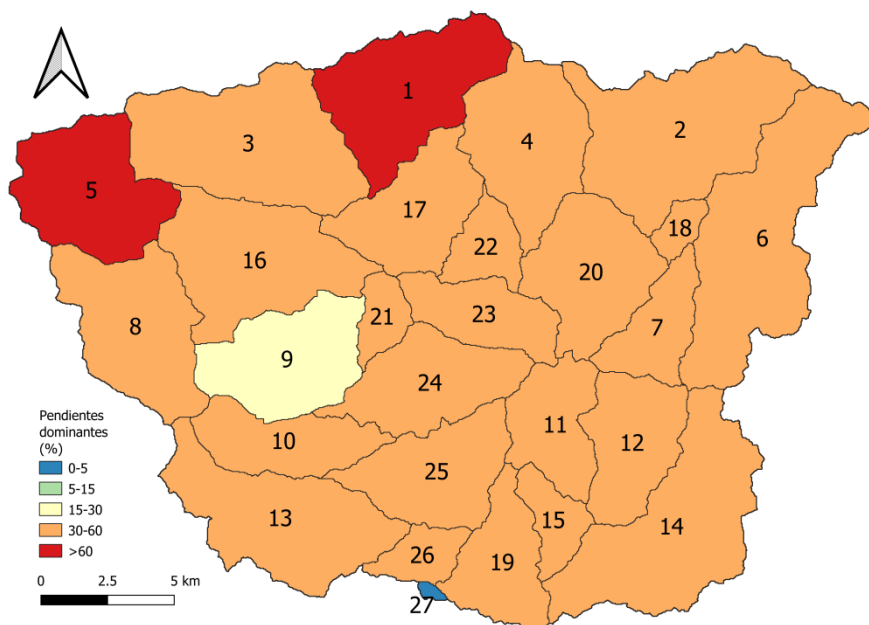


Figura 1-14 Pendientes según las clases implementadas en el modelo SWAT dominantes en cada subcuenca (mayor superficie).

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

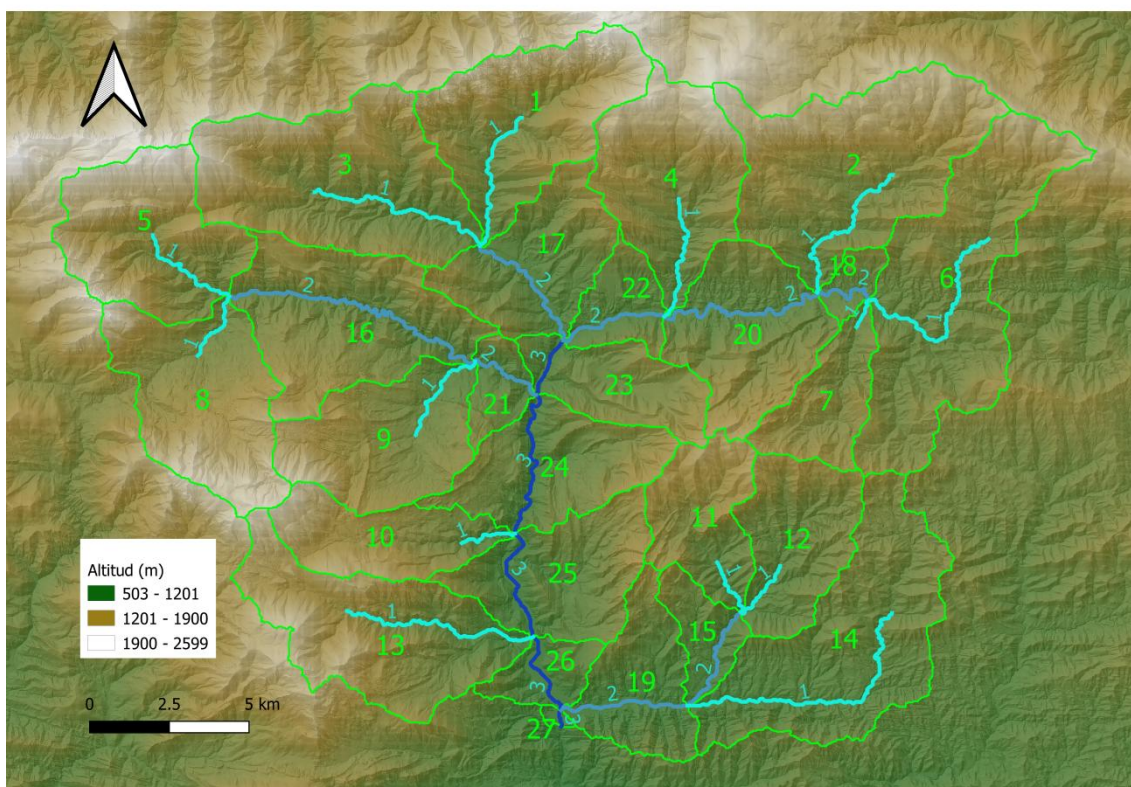


Figura 1-15 Red hidrográfica básica de cada subcuenca de la cuenca de estudio, caracterizando cada curso fluvial con su correspondiente número de Strhaler.

Fuente: Elaboración propia mediante QSWAT a partir de [1].

En la Figura 1-15 se observa que la máxima categoría de complejidad de la ramificación de la red básica (1 curso principal por subcuenca) que se alcanza es el número 3 según Strahler.

### 1.1. Tabla “ElevationBands” de SWAT

En la Tabla “ElevationBands”, en las columnas “ELEVbx” se implementa información sobre la altitud en msnm del valor central de altitudes de cada banda altitudinal para cada subcuenca (ver Tabla 1-3), mientras que en las columnas “ELEVb\_FRx” se implementa el ratio de superficie de la subcuenca que se encuentra dentro de esta banda (ver Tabla 1-4).

Tabla 1-3 Tabla “ElevationBands” implementada. Columnas con la altitud del valor central del rango de altitudes de cada banda para cada subcuenca.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

| OID | SUBBASIN | ELEV81  | ELEV82   | ELEV83   | ELEV84   | ELEV85   | ELEV86   | ELEV87   | ELEV88   | ELEV89   | ELEV810 |
|-----|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| 1   | 1        | 887.516 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1856.977 | 2052.758 | 2248.539 | 2436.26  | 0       |
| 2   | 2        | 907.026 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1856.977 | 2052.758 | 2248.539 | 2377.775 | 0       |
| 3   | 3        | 887.376 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1856.977 | 2052.758 | 2248.539 | 2404.31  | 0       |
| 4   | 4        | 772.421 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1856.977 | 2052.758 | 2248.539 | 2377.19 |
| 5   | 5        | 964.286 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1856.977 | 2052.758 | 2248.539 | 2444.32  | 0       |
| 6   | 6        | 925.071 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1856.977 | 2002.624 | 0        | 0        | 0       |
| 7   | 7        | 925.976 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.078 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 8   | 8        | 963.281 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1856.977 | 2052.758 | 2248.539 | 2417.95  | 0       |
| 9   | 9        | 758.081 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1856.977 | 2052.758 | 2208.819 | 0       |
| 10  | 10       | 708.736 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1856.977 | 2052.758 | 2223.084 | 0       |
| 11  | 11       | 761.036 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1768.853 | 0        | 0        | 0       |
| 12  | 12       | 760.826 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1655.933 | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 13  | 13       | 703.816 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1856.977 | 2052.758 | 2220.249 | 0       |
| 14  | 14       | 704.231 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1440.067 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 15  | 15       | 704.266 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1440.067 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 16  | 16       | 757.466 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1814.283 | 0        | 0        | 0       |
| 17  | 17       | 746.411 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1655.408 | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 18  | 18       | 907.041 | 1073.853 | 1269.634 | 1382.042 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 19  | 19       | 702.911 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1601.893 | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 20  | 20       | 771.406 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1760.508 | 0        | 0        | 0       |
| 21  | 21       | 736.626 | 878.0715 | 1073.853 | 1261.317 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 22  | 22       | 745.621 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1456.252 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 23  | 23       | 736.626 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1661.196 | 1768.878 | 0        | 0        | 0       |
| 24  | 24       | 702.981 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1632.193 | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 25  | 25       | 702.881 | 878.0715 | 1073.853 | 1269.634 | 1465.415 | 1610.708 | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 26  | 26       | 703.831 | 878.0715 | 1073.853 | 1215.972 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0       |
| 27  | 27       | 682.291 | 784.4405 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0       |

El primer paso fue crear las bandas de altitud, para que el criterio fuera homogéneo para toda la cuenca, se tomó la máxima altitud y la mínima altitud de la cuenca, y se obtuvo el rango de altitudes presentes en la cuenca de estudio. Dado que el máximo número de bandas eran 10, se dividió este rango en 10 intervalos.

Los valores centrales de cada banda en cada subcuenca, pueden ser iguales, correspondiéndose al la media del límite superior y el límite inferior del intervalo, si el intervalo queda completamente dentro del rango de altitudes de la subcuenca, o diferentes, si el intervalo queda parcialmente fuera de este rango. En este último caso, se toma el límite inferior del intervalo, y la máxima altitud de la subcuenca o el límite superior del intervalo y la mínima altitud de la subcuenca, dependiendo del extremo por donde exceda el intervalo. A continuación se toma el valor medio entre estos dos valores y ya se tiene el valor central de esa banda.

Tabla 1-4 Tabla “ElevationBands” implementada. Columnas con el ratio de superficie de cada subcuenca para cada banda.

Fuente: Elaboración propia a partir de [1].

| OID | SUBBASIN | ELEVB_FR1  | ELEVB_FR2  | ELEVB_FR3  | ELEVB_FR4  | ELEVB_FR5  | ELEVB_FR6  | ELEVB_FR7  | ELEVB_FR8  | ELEVB_FR9  | ELEVB_FR10 |
|-----|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1   | 1        | 0.03866456 | 0.13275519 | 0.21532872 | 0.18862686 | 0.13570302 | 0.12617399 | 0.09827243 | 0.04548571 | 0.01898951 | 0          |
| 2   | 2        | 0.03526835 | 0.15444064 | 0.24179337 | 0.16750579 | 0.12961937 | 0.19335918 | 0.06238043 | 0.01339241 | 0.00224046 | 0          |
| 3   | 3        | 0.08217493 | 0.20039792 | 0.2275714  | 0.19134009 | 0.13513443 | 0.08547344 | 0.05206943 | 0.02180685 | 0.00403152 | 0          |
| 4   | 4        | 0.00081367 | 0.07632996 | 0.16459375 | 0.20655585 | 0.18683405 | 0.11232516 | 0.0952381  | 0.09194467 | 0.05990159 | 0.00546321 |
| 5   | 5        | 0.00269086 | 0.10271392 | 0.18440071 | 0.15918352 | 0.15557008 | 0.15545476 | 0.1099408  | 0.07749673 | 0.05254863 | 0          |
| 6   | 6        | 0.072      | 0.38366864 | 0.31088757 | 0.13176331 | 0.04582249 | 0.04686391 | 0.00899408 | 0          | 0          | 0          |
| 7   | 7        | 0.02802397 | 0.2031738  | 0.43665063 | 0.27618806 | 0.05587913 | 8.441E-05  | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 8   | 8        | 0.00203156 | 0.09766008 | 0.21218937 | 0.19629966 | 0.19481226 | 0.10154181 | 0.09831308 | 0.09290767 | 0.00424451 | 0          |
| 9   | 9        | 0.00255461 | 0.08430195 | 0.21288372 | 0.30702091 | 0.19798186 | 0.10993316 | 0.0543705  | 0.02592924 | 0.00502406 | 0          |
| 10  | 10       | 0.01642749 | 0.04846425 | 0.11304129 | 0.16931017 | 0.23936304 | 0.22236908 | 0.11782477 | 0.0538142  | 0.0193857  | 0          |
| 11  | 11       | 0.00485501 | 0.17838866 | 0.12386826 | 0.16926913 | 0.29353103 | 0.22805406 | 0.00203385 | 0          | 0          | 0          |
| 12  | 12       | 0.00808886 | 0.29439227 | 0.41040117 | 0.13620325 | 0.1133489  | 0.03756582 | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 13  | 13       | 0.04175253 | 0.08369527 | 0.15385347 | 0.15065149 | 0.15594585 | 0.2255968  | 0.1300447  | 0.04901246 | 0.00944742 | 0          |
| 14  | 14       | 0.13986752 | 0.43617555 | 0.33763492 | 0.07822025 | 0.00810176 | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 15  | 15       | 0.35616631 | 0.38139535 | 0.15884426 | 0.07188161 | 0.03171247 | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 16  | 16       | 0.00811522 | 0.14982679 | 0.30578009 | 0.3179048  | 0.16294586 | 0.04846677 | 0.00696048 | 0          | 0          | 0          |
| 17  | 17       | 0.05941566 | 0.39842868 | 0.23859563 | 0.18281365 | 0.10159588 | 0.0191505  | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 18  | 18       | 0.53679132 | 0.33383595 | 0.12484922 | 0.00452352 | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 19  | 19       | 0.46463748 | 0.3230603  | 0.12035331 | 0.06443414 | 0.02618034 | 0.00133444 | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 20  | 20       | 0.00487991 | 0.3421879  | 0.25188831 | 0.21607401 | 0.139226   | 0.04570143 | 4.2434E-05 | 0          | 0          | 0          |
| 21  | 21       | 0.13158851 | 0.49909124 | 0.23773173 | 0.13158851 | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 22  | 22       | 0.1712415  | 0.56371191 | 0.17036011 | 0.08851675 | 0.00616973 | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 23  | 23       | 0.06759542 | 0.16667851 | 0.34942071 | 0.28545028 | 0.1036321  | 0.02665435 | 0.00056863 | 0          | 0          | 0          |
| 24  | 24       | 0.12001516 | 0.2221275  | 0.37861135 | 0.17358151 | 0.08359382 | 0.02207066 | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 25  | 25       | 0.21172577 | 0.31380615 | 0.22520095 | 0.13678487 | 0.10335697 | 0.0091253  | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 26  | 26       | 0.54759221 | 0.35963923 | 0.08713158 | 0.00563698 | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 27  | 27       | 0.99810964 | 0.00189036 | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |

Para obtener el ratio de subcuenca incluido en cada banda, se reclasifica mediante la herramienta r.reclass de QGIS el ráster del Modelo Digital de Elevaciones del terreno (MDT) en los intervalos de altitudes calculados, y a continuación, se recorta el ráster del MDT para cada subcuenca mediante la herramienta “Clip Raster by Mask Layer” de QGIS por ejemplo, y a continuación se crea un “Raster Layer Unique Values report”, y dividiendo la frecuencia de cada valor de intervalo por la suma de frecuencias, se obtiene el ratio de subcuenca para ese intervalo/banda.

## 2. Edafología

En la Figura 2-1 se muestra la distribución en la cuenca de estudio de las clases de suelo combinando la clasificación Soil Taxonomy (ST) del United States Department of Agriculture (USDA) y la World Reference Base for soil resources (WRB) de la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) y la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) según el Mapa de Sòls de Catalunya 1:250.000 (MSC250M) del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). En la Figura 2-2 se muestra la clase de suelo dominante en cada subcuenca según esta clasificación combinada.

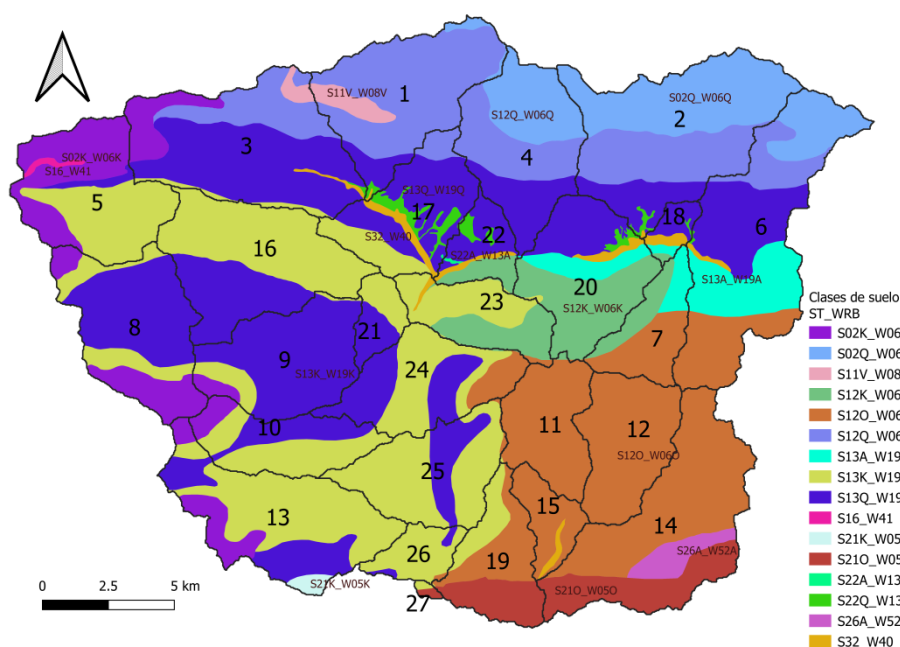


Figura 2-1 Distribución de suelos en la cuenca de estudio según clases de suelo combinando la clasificación Soil Taxonomy (ST) del United States Department of Agriculture (USDA) y la World Reference Base for soil resources (WRB) de la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) y la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).

Fuente: Elaboración propia mediante QSWAT a partir de [2] y [3].



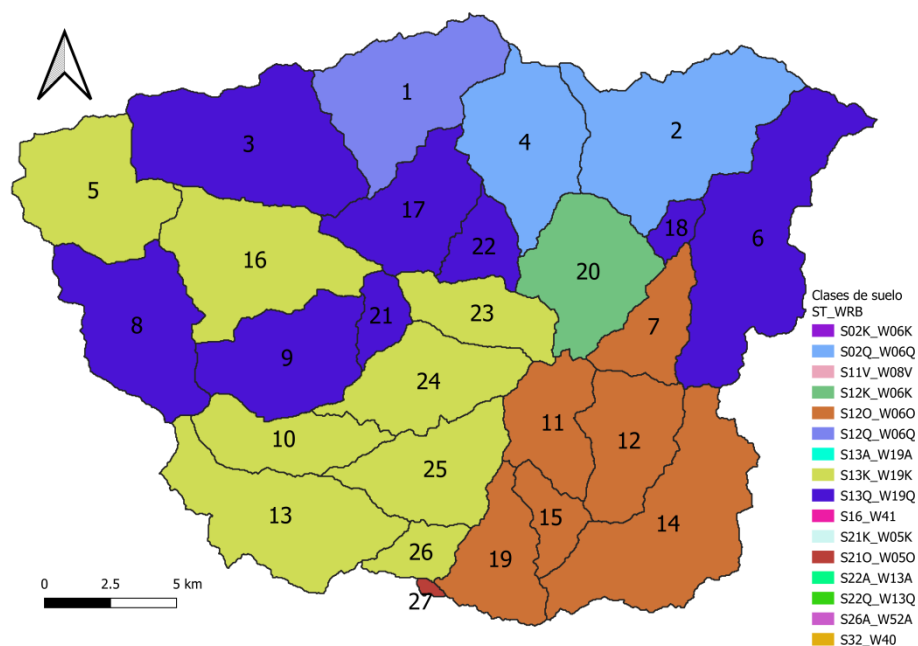


Figura 2-2 Clase de suelo dominante en cada subcuenca según clases de suelo combinando la clasificación Soil Taxonomy (ST) del United States Department of Agriculture (USDA) y la World Reference Base for soil resources (WRB) de la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) y la United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).

Fuente: Elaboración propia mediante QSWAT a partir de [2] y [3].

### 3. Climatología

#### 3.1. Spain02\_v5

Se trata de una rejilla regular de  $0,1^\circ$  (longitud) por  $0,1^\circ$  (latitud) ( $\sim 8,25$  km x  $\sim 11,1$  km) de datos meteorológicos diarios de precipitación y de temperatura máxima, mínima y media desde el 01/01/1950 al 31/12/2015 generada por la Universidad de Cantabria y el AEMET para toda España (Spain02 v5) [2] [3] [4] [5] [6] [7]. La información de esta rejilla de datos meteorológicos se encuentra en 9 archivos, 4 de datos diarios: (“DD”) de precipitación (“pr”, mm), temperatura media (“tas”, °C), temperatura máxima (“tasmax”, °C) y temperatura mínima (“tasmin”, °C); 4 archivos con la versión de datos mensuales de éstos (“MM”), así como un último archivo con la cota de cada punto de la rejilla (“orog”, msnm). Los archivos tienen formato NetCDF, por lo que para extraerlos se utilizó el programa Netcdf-Extractor (v2.1) [8]. La rejilla de datos meteorológicos diarios consiste en una rejilla de 24106 datos diarios (siendo 1 el día 01/01/1950 y 24106 el día 31/12/2015), 79 latitudes (siendo 1 la latitud  $36^\circ$ , y 79 la latitud  $43,8^\circ$ ) y 138 longitudes (siendo 1 la longitud  $-9,3^\circ$  y la 138 la longitud  $4,4^\circ$ ). Dado que la cuenca se extiende más en longitud que en latitud, para reducir el tiempo de extracción se recomienda que al extraer los datos, se visualicen en las tablas correspondientes a cada una de las latitudes. (Ver Figura 3-1).

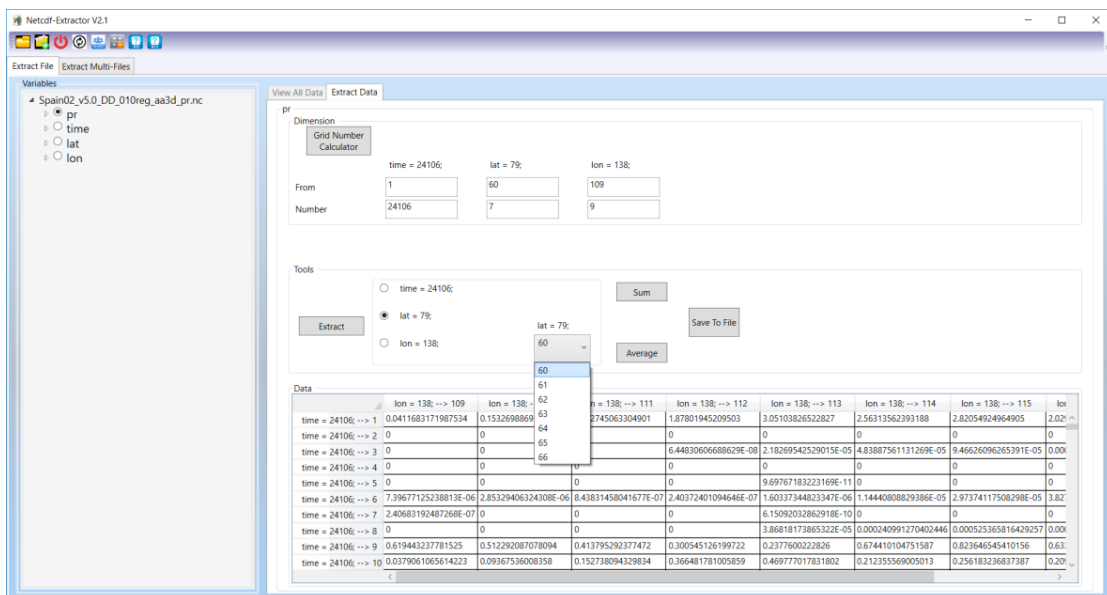
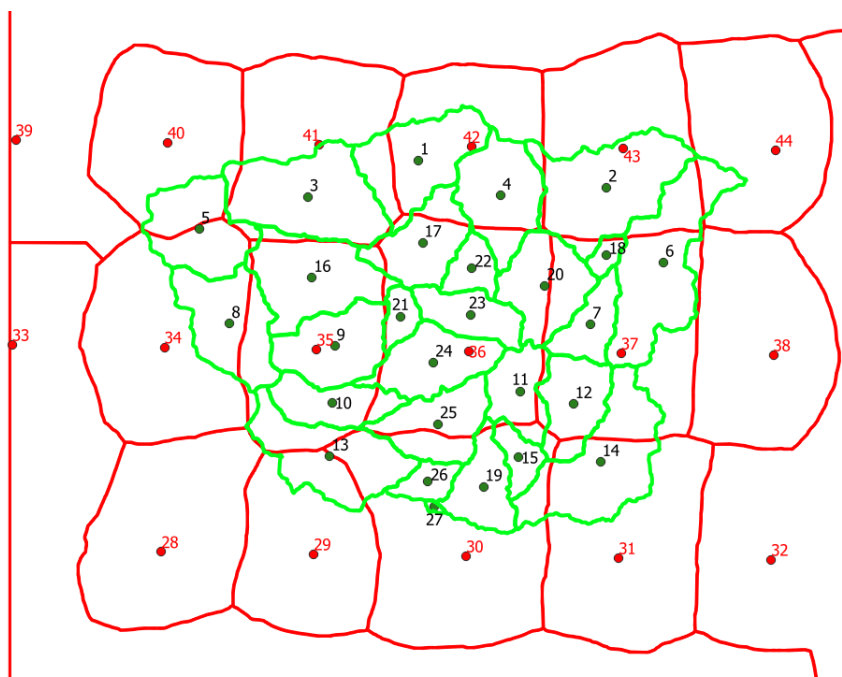


Figura 3-1 Ventana Netcdf-Extractor

### 3.1.1. Creación de estaciones virtuales

Se han creado estaciones virtuales en los centroides de las subcuencas en función de la proporción de la subcuenca que ocupa el área de influencia de cada punto de la rejilla de Spain02\_v5. Estas áreas de influencia se han estimado mediante una aproximación de costes acumulados en función de los datos topográficos a través de la herramienta r.cost de QGIS, para tener en cuenta la orografía en su definición. Ver Figura 3-2.



Polígonos verdes: subcuencas; Polígonos rojos: áreas de influencia puntos rejilla Spain02\_v5 (puntos rojos); Puntos verdes: centroides de las subcuencas definidas por SWAT, y puntos en los que se asigna la estación meteorológica más cercana que se introduzca.

Figura 3-2 Proceso de creación de estaciones virtuales en los centroides de las subcuencas de la cuenca de estudio, interpolando los datos a partir de la proporción de área de influencia de cada uno de los puntos con datos de la rejilla Spain02\_v5 y teniendo en cuenta la orografía mediante estimación de costes acumulados

Fuente: Elaboración propia a partir de MDE (ICGC) y de la rejilla Spain02\_v5 (UC-AEMET).

## 4. Preparación archivos con datos diarios

### 4.1.1. Base teórica

#### 4.1.1.1. Inputs necesarios para correr el modelo SWAT (datos climáticos)

Para una correcta estimación de los caudales mensuales utilizando el método Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración, el modelo SWAT necesita información diaria de la precipitación, temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa media, radiación solar media y velocidad del viento media, así como de la ubicación de la estación meteorológica a la que corresponden estos datos. En el Anejo B se muestra la estructura de los archivos en los que se introduce la información diaria en SWAT de estas variables meteorológicas.

Si no hubiera datos durante algún periodo de alguna de estas variables, SWAT puede simular sus valores mediante la herramienta Weather Generator (WGEN) a partir de bases de datos de tiempo mensual ("Monthly Weather Database"), también conocidas como "tablas WGEN". Estas tablas se crean y cumplimentan en la base de datos QSWATRef2012 .mdb del proyecto con los siguientes datos:

- STATION: Código de la estación meteorológica.
- WLATITUDE: Coordenadas de latitud de la estación meteorológica (º, norte positivo).
- WLONGITUDE: Coordenadas de longitud de la estación meteorológica (º, este positivo).
- WELEV: Cota altitudinal en la que se localiza la estación meteorológica (m).
- RAIN\_YRS: Número de años de datos con los que se ha estimado la máxima precipitación de 30 minutos de los diferentes meses de la estación meteorológica.
- TMPMXi: Promedio de las temperaturas máximas diarias para el mes i de la estación meteorológica j (ºC).
- TMPMNi: Promedio de las temperaturas mínimas diarias para el mes i de la estación meteorológica j (ºC).
- TMPSTDMXi: Desviación estándar de las temperaturas máximas diarias para el mes i de la estación meteorológica j (ºC).
- TMPSTDMNi: Desviación estándar de las temperaturas mínimas diarias para el mes i de la estación meteorológica j (ºC).
- PCPMMi: Promedio de las precipitaciones mensuales totales para el mes i de la estación meteorológica j (mm).

- PCPSTDi: Desviación estándar de las precipitaciones diarias para el mes  $i$  de la estación meteorológica  $j$  (mm/día).
- PCPSKWi: Coeficiente de sesgo de las precipitaciones diarias para el mes  $i$  de la estación meteorológica  $j$ .
- PR\_W1\_i: Probabilidad de que se dé un día húmedo ( $> 0$  mm) después de un día seco (0 mm) para el mes  $i$  de la estación meteorológica  $j$ .
- PR\_W2\_i: Probabilidad de que se dé un día húmedo ( $> 0$  mm) después de un día húmedo ( $> 0$  mm) para el mes  $i$  de la estación meteorológica  $j$ .
- PCPDi: Promedio del número de días de precipitación para el mes  $i$  de la estación meteorológica  $j$ .
- RAINHHMXi: Máxima precipitación de 30 minutos para el mes  $i$  de la estación meteorológica  $j$  (mm).
- SOLARAVi: Promedio de la radiación solar diaria para el mes  $i$  de la estación meteorológica  $j$  (MJ/m<sup>2</sup>/día)
- DEWPTi: Promedio de las temperaturas de rocío (°C) o de las humedades relativas (en tanto por 1), si ningún valor más grande de 1, para el mes  $i$  de la estación meteorológica  $j$ .
- WNDAVi: Promedio de la velocidad del viento diaria para el mes  $i$  de la estación meteorológica  $j$  (m/s).

En el Anejo B se muestran en detalle las fórmulas y consultas SQL utilizadas para su cálculo.

Para cumplimentar esta información, inicialmente solo se tenía acceso a una rejilla regular de 0,1° (longitud) por 0,1° (latitud) (~8,25 km x ~11,1 km) de datos meteorológicos diarios de precipitación y de temperatura máxima, mínima y media desde el 01/01/1950 al 31/12/2015 generada por la Universidad de Cantabria y el AEMET para toda España (Spain02 v5) [2] [23] [4] [5] [6] [7], lo que solo permitía a priori estimar la evapotranspiración mediante el método Hargreaves. La información de esta rejilla de datos meteorológicos se encuentra en 9 archivos, 4 de datos diarios (“DD”) de precipitación (“pr”, mm), temperatura media (“tas”, °C), temperatura máxima (“tasmx”, °C) y temperatura mínima (“tasmin”, °C), y la versión de estos de datos mensuales (“MM”), y otro archivo con la cota de cada punto de la rejilla (“orog”, msnm). Los archivos tienen formato NetCDF, por lo que para extraerlos se utilizó el programa Netcdf-Extractor (v2.1) [8]. En el Anejo B se explica con más detalle cómo se extrajeron los datos.

Posteriormente, en 2020, desde el Laboratori Forestal Català (CREAF-CTFC) [9] se desarrolló y se dio acceso a la herramienta “Meteoland App” [10] [11] en la que se pueden obtener datos diarios interpolados de las estaciones meteorológicas del AEMET y del Servicio Meteorológico Catalán (SMC) desde el 1 de enero de 1976 hasta la actualidad para polígonos (resolución espacial de 1

km) o puntos (resolución espacial de 30 m) ubicados en Cataluña. Los datos interpolados para puntos concretos se descargan en un archivo Geopackage, lo que permite trabajar con los datos fácilmente mediante consultas SQL en el mismo QGIS. Las variables meteorológicas que se obtienen son la temperatura media (°C), la temperatura mínima (°C), la temperatura máxima (°C), la amplitud térmica (°C), la humedad relativa media (%), la humedad relativa mínima (%), la humedad relativa máxima (%), la precipitación (mm), la radiación (MJ/m<sup>2</sup>), la velocidad del viento (m/s) y la evapotranspiración potencial (mm), lo que cubre todas las variables que se pueden introducir como input en SWAT a excepción de la máxima precipitación de 30 minutos, la cual se ha estimado a partir de los datos de precipitación y las fórmulas de Salas [12]. De esta manera, al disponer de todos los datos necesarios, se puede estimar la evapotranspiración mediante Penman-Monteith, que es el método recomendado por la FAO por su precisión y comportamiento consistente tanto en climas áridos como húmedos [13].

Para el periodo 1976-actualidad, se han interpolado los datos para los centroides de las subcuencas definidas por SWAT mediante la herramienta Meteoland App, mientras que para el periodo 1950-1975 se han creado estaciones virtuales en los centroides de las subcuencas en función de la proporción de la subcuenca que ocupa el área de influencia de cada punto de la rejilla de Spain02\_v5. Estas áreas de influencia se han estimado mediante una aproximación de costes acumulados en función de los datos topográficos a través de la herramienta r.cost de QGIS, para tener en cuenta la orografía.

#### **4.1.1.2. Inputs necesarios para correr el modelo SWAT (datos climáticos)**

Inicialmente se disponía de una rejilla regular de 0,1° (longitud) per 0,1° (latitud) (~8,25 km x ~11,1 km) de datos meteorológicos diarios de precipitación y de temperatura máxima, mínima y media desde el 01/01/1950 al 31/12/2015 generada por la Universidad de Cantabria y el AEMET para toda España (Spain02 v5). [2] [3] [4] [5] [6] [7] Esta información se encuentra en 9 archivos, 4 de datos diarios (“DD”) de precipitación (“pr”, mm), temperatura media (“tas”, °C), temperatura máxima (“tasmx”, °C) y temperatura mínima (“tasmin”, °C), y la versión de estos de datos mensuales (“MM”), y otro archivo con la cota de cada punto de la rejilla (“orog”, msnm). Los archivos tienen formato NetCDF, por lo que para extraerlos se utilizó el programa Netcdf-Extractor (v2.1). [8] La rejilla de datos meteorológicos diarios consiste en una rejilla de 24106 datos diarios (siendo 1 el día 01/01/1950 y 24106 el día 31/12/2015), 79 latitudes (siendo 1 la

latitud 36º, y 79 la latitud 43,8º) y 138 longitudes (siendo 1 la longitud -9,3º y la 138 la longitud 4,4º). Dado que la cuenca se extiende más en longitud que en latitud, para reducir el tiempo de extracción se recomienda que al extraer los datos, se visualicen en las tablas correspondientes a cada una de las latitudes. (Ver Figura 3-3).

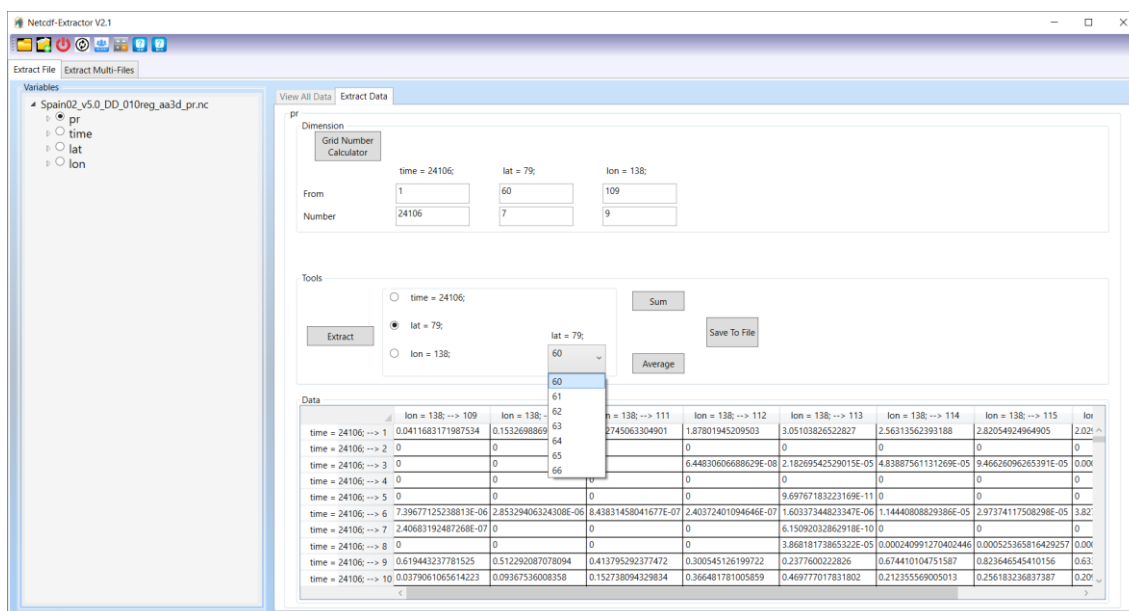


Figura 4-1 Ventana Netcdf-Extractor

Posteriormente, en 2020, desde el Laboratori Forestal Català (CREAF-CTFC) [14] se desarrolló y se dio acceso a la herramienta “Meteoland app” [15] [11] en la que se pueden obtener datos diarios interpolados de las estaciones meteorológicas del AEMET y del SMC desde el 1 de enero de 1976 hasta la actualidad para polígonos (resolución espacial de 1 km) o puntos (resolución espacial de 30 m). Los datos interpolados para puntos concretos se descargan en un archivo Geopackage, lo que permite trabajar con los datos fácilmente mediante consultas SQL en el mismo QGIS. Las variables meteorológicas que se obtienen son la temperatura media (°C), la temperatura mínima (°C), la temperatura máxima (°C), la amplitud térmica (°C), la humedad relativa media (%), la humedad relativa mínima (%), la humedad relativa máxima (%), la precipitación (mm), la radiación (MJ/m2), la velocidad del viento (m/s) y la evapotranspiración potencial (mm), lo que cubre todas las variables que se pueden introducir como input en SWAT a excepción de la máxima precipitación de 30 minutos, la cual se ha estimado a partir de los datos de precipitación y las fórmulas de Salas [16]. De esta manera, al disponer de todos los datos necesarios, se puede

estimar la evapotranspiración mediante Penman-Monteith, que es el método recomendado por la FAO por su precisión y comportamiento consistente tanto en climas áridos como húmedos [13].

Para el periodo 1976-actualidad, se han interpolado los datos para los centroides de las subcuencas definidas por SWAT mediante la herramienta Meteoland app, mientras que para el periodo 1950-1975 se han creado estaciones virtuales en los centroides de las subcuencas en función de la proporción de la subcuenca que ocupa el área de influencia de cada punto de la rejilla de Spain02\_v5. Estas áreas de influencia se han estimado mediante costes acumulados en función de los datos topográficos a través de la herramienta r.cost de QGIS para tener en cuenta la orografía.

A continuación se indica la información a introducir en el modelo y la manera de hacerlo:

#### 4.1.1.2.1 Precipitación (“Raingages”)

Se necesita introducir información de la precipitación de la manera siguiente:

- Un archivo de “Raingages” en formato txt que identifique cada estación meteorológica o punto con información de precipitación, y su localización:

**ID,NAME,LAT,LONG,ELEVATION**

→ Títulos de las columnas

ID: Nº identificación punto

NAME: Nombre del punto

LAT: Latitud (º, Norte positivo)

LONG: Longitud (º, Este positivo)

ELEVATION: Cota altimétrica (msnm)

**1,001,41.9,1.5,740.842105263158**

→ Datos del punto nº 1

**2,002,41.9,1.6,618.746666666667**

→ Datos del punto nº 2

...

→ Datos del punto nº i

- Tantos archivos txt como estaciones meteorológicas o puntos con información de precipitación, de nombre igual al “NAME” correspondiente definido en el archivo “Raingages”. Y con la siguiente información:

**19500101,001**

→ Día inicial / “NAME”

**0.0411683171987534000000000**

→ Precipitación 1er día (mm)

**0**

→ Precipitación 2º día (mm)

...

→ Precipitación i día (mm)



#### 4.1.1.2.2 Temperatura máxima y mínima (“Climate Stations”)

Se necesita introducir información de las temperaturas máximas (Tmax) y mínimas (Tmin) de la manera siguiente:

- Un archivo de “ClimateStations” en formato txt que identifique cada estación meteorológica o punto con información de temperaturas, y su localización, con el mismo formato que el archivo “Raingages” para los datos de precipitación.
- Tantos archivos txt como estaciones meteorológicas o puntos con información de temperaturas, de nombre igual al “NAME” correspondiente definido en el archivo “ClimateStations”. Y con la siguiente información:

|                                    |                                |
|------------------------------------|--------------------------------|
| 19500101,001                       | →Día inicial, “NAME”           |
| 4.88286638259888,1.05594789981842  | → Tmax y Tmin (°C) del 1er día |
| 3.72891211509705,-3.13052582740784 | → Tmax y Tmin (°C) del 2º día  |
| ...                                | → Tmax y Tmin (°C) del i día   |

#### 4.1.1.2.3 Humedad relativa (“Relative Humidity Gages”), Radiación solar (“Solar Gages”) y Velocidad del viento (“Windgages”)

Para estas variables, los datos se introducen de la misma manera que para las precipitaciones. Los datos diarios de humedad relativa, se introducen en tanto por 1, los de radiación solar, en MJ/m<sup>2</sup> y los de velocidad del viento, en m/s.

Es aconsejable que estos archivos se encuentren en carpetas separadas para cada variable meteorológica, especialmente si la codificación (identificación y “NAME”) de los puntos es la misma. Si faltara algún valor, se tendría que introducir el dato como -99.0, y comprobar que en las tablas resultantes en el directorio “ubicación\_modelo”\Scenarios\Default\TxtInOut de viento (.wnd), temperatura (.tmp), radiación solar (.slr), precipitación (.pcp) o humedad relativa (.hmd), el dato esté definido como “-099.000”, ya que en caso contrario la simulación dará error.

#### 4.1.1.2.4 Tabla WGEN

Para poder simular adecuadamente datos meteorológicos para días en los que no se dispone de datos observados, es necesario crear y cumplimentar la tabla WGEN en la base de datos QSWATRef2012 .mdb del proyecto con los siguientes datos:

- STATION: Código de la estación meteorológica.
- WLATITUDE: Coordenadas de latitud de la estación meteorológica (º, norte positivo).
- WLONGITUDE: Coordenadas de longitud de la estación meteorológica (º, este positivo).
- WELEV: Cota altitudinal en la que se localiza la estación meteorológica (m).
- RAIN\_YRS: Número de años de datos con los que se ha estimado la máxima precipitación de 30 minutos de los diferentes meses de la estación meteorológica.
- TMPMXi: Promedio de las temperaturas máximas diarias para el mes i de la estación meteorológica (ºC).
- TMPMNi: Promedio de las temperaturas mínimas diarias para el mes i de la estación meteorológica (ºC).
- TMPSTDMXi: Desviación estandard de las temperaturas máximas diarias para el mes i de la estación meteorológica (ºC).
- TMPSTDMNi: Desviación estandard de las temperaturas mínimas diarias para el mes i de la estación meteorológica (ºC).
- PCPMMi: Promedio de las precipitaciones mensuales totales para el mes i de la estación meteorológica (mm).
- PCPSTDi: Desviación estandard de las precipitaciones diarias para el mes i de la estación meteorológica (mm/día).
- PCPSKWi: Coeficiente de sesgo de las precipitaciones diarias para el mes i de la estación meteorológica.
- PR\_W1\_i: Probabilidad de que se dé un día húmedo (> 0 mm) después de un día seco (0 mm) para el mes i de la estación meteorológica.
- PR\_W2\_i: Probabilidad de que se dé un día húmedo (> 0 mm) después de un día húmedo (> 0 mm) para el mes i de la estación meteorológica.
- PCPDi: Promedio del número de días de precipitación para el mes i de la estación meteorológica.
- RAINHHMXi: Máxima precipitación de 30 minutos para el mes i de la estación meteorológica (mm).
- SOLARAVi: Promedio de la radiación solar diaria para el mes i de la estación meteorológica (MJ/m<sup>2</sup>/día)
- DEWPTi: Promedio de las temperaturas de rocío (ºC) o de las humedades relativas (en tanto por 1), si ningún valor más grande de 1, para el mes i de la estación meteorológica.
- WNDAVi: Promedio de la velocidad del viento diaria para el mes i de la estación meteorológica (m/s).

A continuación se muestran las consultas realizadas mediante código SQL para obtener los valores de las variables anteriores.

```
CREATE TABLE meteo_estaciones_virtuales
```

```
(
```

```
id SERIAL NOT NULL,
```

```
estacion INT NOT NULL,
```

```
fecha DATE NOT NULL,
```

```
dia_juliano INT NOT NULL,
```

```
mes INT NOT NULL,
```

```
anyo INT NOT NULL,
```

```
tmpmax NUMERIC NOT NULL,
```

```
tmpmin NUMERIC NOT NULL,
```

```
pcp NUMERIC NOT NULL
```

```
);
```

```
SELECT
```

```
anyo,mes,
```

```
max(tmpmax) as maxtmpmax,avg(tmpmax) as avgtmpmax,min(tmpmax) as mintmpmax,
```

```
max(tmpmin) as maxtmpmin,avg(tmpmin) as avgtmpmin,min(tmpmin) as mintmpmin,
```

```
sum(pcp) as pmensual,max(pcp) as pdmax,avg(pcp) as avgpd, min(pcp) as minpd, count(pcp>=1)
```

```
as dias_lluvia
```

```
FROM meteo_estaciones_virtuales
```

```
GROUP BY anyo,mes;
```

```
SELECT
```

```
estacion,anyo,mes,
```

```
max(tmpmax) as maxtmpmax,avg(tmpmax) as avgtmpmax,min(tmpmax) as mintmpmax,
```

```
max(tmpmin) as maxtmpmin,avg(tmpmin) as avgtmpmin,min(tmpmin) as mintmpmin,
```

```
sum(pcp) as pmensual,max(pcp) as pdmax,avg(pcp) as avgpd, min(pcp) as minpd, count(pcp>=1)  
as dias_lluvia
```

```
FROM meteo_estaciones_virtuales
```

```
GROUP BY estacion,anyo,mes;
```

```
WITH dias_precipitacion AS
```

```
(SELECT
```

```
estacion, anyo, mes, count(pcp) as dias_lluvia
```

```
FROM meteo_estaciones_virtuales
```

```
WHERE pcp>=0.1
```

```
GROUP BY estacion,anyo,mes)
```

```
SELECT
```

estacion, anyo, mes,

max(tmpmax) as maxtmpmax, avg(tmpmax) as avgtmpmax, min(tmpmax) as mintmpmax,

max(tmpmin) as maxtmpmin, avg(tmpmin) as avgtmpmin, min(tmpmin) as mintmpmin,

sum(pcp) as pmensual, max(pcp) as pdmax, avg(pcp) as avgpd, min(pcp) as minpd, dias\_lluvia

FROM meteo\_estaciones\_virtuales

LEFT JOIN dias\_precipitacion USING (estacion,anyo,mes)

GROUP BY estacion,anyo,mes,dias\_lluvia;

CREATE TABLE meteo\_por\_estaciones AS

WITH dias\_precipitacion AS

(SELECT

estacion, anyo, mes, count(pcp) as dias\_lluvia

FROM meteo\_estaciones\_virtuales

WHERE pcp>=0.1

GROUP BY estacion,anyo,mes)

SELECT

estacion, anyo, mes,

```
max(tmpmax) as maxtmpmax, avg(tmpmax) as avgtmpmax, min(tmpmax) as mintmpmax,  
max(tmpmin) as maxtmpmin, avg(tmpmin) as avgtmpmin, min(tmpmin) as mintmpmin,  
sum(pcp) as pmensual, max(pcp) as pdmax, avg(pcp) as avgpd, min(pcp) as minpd, dias_lluvia  
  
FROM meteo_estaciones_virtuales  
  
LEFT JOIN dias_precipitacion USING (estacion,anyo,mes)  
  
GROUP BY estacion,anyo,mes,dias_lluvia;
```

```
UPDATE meteo_por_estaciones
```

```
SET dias_lluvia=0
```

```
WHERE dias_lluvia IS NULL;
```

```
SELECT
```

```
estacion, mes,
```

```
max(maxtmpmax) as maxmaxtmpmax, avg(maxtmpmax) as avgmaxtmpmax, min(maxtmpmax) as  
minmaxtmpmax,
```

```
max(avgtmpmax) as maxavgtmpmax, avg(avgtmpmax) as avgavgtmpmax, min(avgtmpmax) as  
minavgtmpmax,
```

```
max(mintmpmax) as maxmintmpmax, avg(mintmpmax) as avgmintmpmax, min(mintmpmax) as  
minmintmpmax,
```

max(maxtmpmin) as maxmaxtmpmin, avg(maxtmpmin) as avgmaxtmpmin, min(maxtmpmin) as  
minmaxtmpmin,

max(avgtmpmin) as maxavgtmpmin, avg(avgtmpmin) as avgavgtmpmin, min(avgtmpmin) as  
minavgtmpmin,

max(mintmpmin) as maxmintmpmin, avg(mintmpmin) as avgmintmpmin, min(mintmpmin) as  
minmintmpmin,

max(pmensual) as maxpmensual, avg(pmensual) as avgpmensual, min(pmensual) as  
minpmensual,

max(pdmax) as maxmaxpd, avg(pdmax) as avgmaxpd, min(pdmax) as minmaxpd,

max(avgpd) as maxavgpd, avg(avgpd) as avgavgpd, min(avgpd) as minavgpd,

max(minpd) as maxminpd, avg(minpd) as avgminpd, min(minpd) as minminpd,

max(dias\_lluvia) as maxdias\_lluvia, avg(dias\_lluvia) as avgdias\_lluvia, min(dias\_lluvia) as  
mindias\_lluvia

FROM meteo\_por\_estaciones

GROUP BY estacion,mes

ORDER BY estacion,mes;

SELECT

mes,

max(maxtmpmax) as maxmaxtmpmax, avg(maxtmpmax) as avgmaxtmpmax, min(maxtmpmax) as  
minmaxtmpmax,

max(avgtmpmax) as maxavgtmpmax, avg(avgtmpmax) as avgavgtmpmax, min(avgtmpmax) as minavgtmpmax,

max(mintmpmax) as maxmintmpmax, avg(mintmpmax) as avgmintmpmax, min(mintmpmax) as minmintmpmax,

max(maxtmpmin) as maxmaxtmpmin, avg(maxtmpmin) as avgmaxtmpmin, min(maxtmpmin) as minmaxtmpmin,

max(avgtmpmin) as maxavgtmpmin, avg(avgtmpmin) as avgavgtmpmin, min(avgtmpmin) as minavgtmpmin,

max(mintmpmin) as maxmintmpmin, avg(mintmpmin) as avgmintmpmin, min(mintmpmin) as minmintmpmin,

max(pmensual) as maxpmensual, avg(pmensual) as avgpmensual, min(pmensual) as minpmensual,

max(pdmax) as maxmaxpd, avg(pdmax) as avgmaxpd, min(pdmax) as minmaxpd,

max(avgpd) as maxavgpd, avg(avgpd) as avgavgpd, min(avgpd) as minavgpd,

max(minpd) as maxminpd, avg(minpd) as avgminpd, min(minpd) as minminpd,

max(dias\_lluvia) as maxdias\_lluvia, avg(dias\_lluvia) as avgdias\_lluvia, min(dias\_lluvia) as mindias\_lluvia

FROM meteo\_por\_estaciones

GROUP BY mes

ORDER BY mes;

SELECT

mes,anyo,



max(maxtmpmax) as maxmaxtmpmax, avg(maxtmpmax) as avgmaxtmpmax, min(maxtmpmax) as  
minmaxtmpmax,

max(avgtmpmax) as maxavgtmpmax, avg(avgtmpmax) as avgavgtmpmax, min(avgtmpmax) as  
minavgtmpmax,

max(mintmpmax) as maxmintmpmax, avg(mintmpmax) as avgmintmpmax, min(mintmpmax) as  
minmintmpmax,

max(maxtmpmin) as maxmaxtmpmin, avg(maxtmpmin) as avgmaxtmpmin, min(maxtmpmin) as  
minmaxtmpmin,

max(avgtmpmin) as maxavgtmpmin, avg(avgtmpmin) as avgavgtmpmin, min(avgtmpmin) as  
minavgtmpmin,

max(mintmpmin) as maxmintmpmin, avg(mintmpmin) as avgmintmpmin, min(mintmpmin) as  
minmintmpmin,

max(pmensual) as maxpmensual, avg(pmensual) as avgpmensual, min(pmensual) as  
minpmensual,

max(pdmax) as maxmaxpd, avg(pdmax) as avgmaxpd, min(pdmax) as minmaxpd,

max(avgpd) as maxavgpd, avg(avgpd) as avgavgpd, min(avgpd) as minavgpd,

max(minpd) as maxminpd, avg(minpd) as avgminpd, min(minpd) as minminpd,

max(dias\_lluvia) as maxdias\_lluvia, avg(dias\_lluvia) as avgdias\_lluvia, min(dias\_lluvia) as  
mindias\_lluvia

FROM meteo\_por\_estaciones

GROUP BY anyo,mes

ORDER BY mes,anyo;

```
CREATE TABLE meteo_por_estaciones_anyo AS

WITH dias_precipitacion AS

(SELECT

estacion, anyo, count(pcp) as dias_lluvia

FROM meteo_estaciones_virtuales

WHERE pcp>=0.1

GROUP BY estacion,anyo)

SELECT

estacion, anyo,

max(tmpmax) as maxtmpmax, avg(tmpmax) as avgtmpmax, min(tmpmax) as mintmpmax,

max(tmpmin) as maxtmpmin, avg(tmpmin) as avgtmpmin, min(tmpmin) as mintmpmin,

sum(pcp) as panual, max(pcp) as pdmax, avg(pcp) as avgpd, min(pcp) as minpd, dias_lluvia

FROM meteo_estaciones_virtuales

LEFT JOIN dias_precipitacion USING (estacion,anyo)

GROUP BY estacion,anyo,dias_lluvia;

UPDATE meteo_por_estaciones_anyo
```

SET dias\_lluvia=0

WHERE dias\_lluvia IS NULL;

SELECT

estacion,

max(maxtmpmax) as maxmaxtmpmax, avg(maxtmpmax) as avgmaxtmpmax, min(maxtmpmax) as  
minmaxtmpmax,

max(avgtmpmax) as maxavgtmpmax, avg(avgtmpmax) as avgavgtmpmax, min(avgtmpmax) as  
minavgtmpmax,

max(mintmpmax) as maxmintmpmax, avg(mintmpmax) as avgmintmpmax, min(mintmpmax) as  
minmintmpmax,

max(maxtmpmin) as maxmaxtmpmin, avg(maxtmpmin) as avgmaxtmpmin, min(maxtmpmin) as  
minmaxtmpmin,

max(avgtmpmin) as maxavgtmpmin, avg(avgtmpmin) as avgavgtmpmin, min(avgtmpmin) as  
minavgtmpmin,

max(mintmpmin) as maxmintmpmin, avg(mintmpmin) as avgmintmpmin, min(mintmpmin) as  
minmintmpmin,

max(panual) as maxpanual, avg(panual) as avgpanual, min(panual) as minpanual,

max(pdmax) as maxmaxpd, avg(pdmax) as avgmaxpd, min(pdmax) as minmaxpd,

max(avgpd) as maxavgpd, avg(avgpd) as avgavgpd, min(avgpd) as minavgpd,

max(minpd) as maxminpd, avg(minpd) as avgminpd, min(minpd) as minminpd,

max(dias\_lluvia) as maxdias\_lluvia, avg(dias\_lluvia) as avgdias\_lluvia, min(dias\_lluvia) as  
mindias\_lluvia

FROM meteo\_por\_estaciones\_anyo

GROUP BY estacion

ORDER BY estacion;

SELECT

max(maxtmpmax) as maxmaxtmpmax, avg(maxtmpmax) as avgmaxtmpmax, min(maxtmpmax) as  
minmaxtmpmax,

max(avgtmpmax) as maxavgtmpmax, avg(avgtmpmax) as avgavgtmpmax, min(avgtmpmax) as  
minavgtmpmax,

max(mintmpmax) as maxmintmpmax, avg(mintmpmax) as avgmintmpmax, min(mintmpmax) as  
minmintmpmax,

max(maxtmpmin) as maxmaxtmpmin, avg(maxtmpmin) as avgmaxtmpmin, min(maxtmpmin) as  
minmaxtmpmin,

max(avgtmpmin) as maxavgtmpmin, avg(avgtmpmin) as avgavgtmpmin, min(avgtmpmin) as  
minavgtmpmin,

max(mintmpmin) as maxmintmpmin, avg(mintmpmin) as avgmintmpmin, min(mintmpmin) as  
minmintmpmin,

max(panual) as maxpanual, avg(panual) as avgpanual, min(panual) as minpanual,

max(pdmax) as maxmaxpd, avg(pdmax) as avgmaxpd, min(pdmax) as minmaxpd,

max(avgpd) as maxavgpd, avg(avgpd) as avgavgpd, min(avgpd) as minavgpd,

max(minpd) as maxminpd, avg(minpd) as avgminpd, min(minpd) as minminpd,

max(dias\_lluvia) as maxdias\_lluvia, avg(dias\_lluvia) as avgdias\_lluvia, min(dias\_lluvia) as  
mindias\_lluvia

FROM meteo\_por\_estaciones\_anyo;



## Bibliografía

### Referencias bibliográficas

- [1] ICGC, «Model d'elevacions del terreny de 2x2 m,» Generalitat de Catalunya, 19 05 2016. [En línea]. Available: <http://www.icgc.cat/ca/Administracio-i-empresa/Descarregues/Elevacions/Model-d-elevacions-del-terreny-de-2x2-m>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [2] ICGC, «Mapa de sòls de Catalunya 1:250.000 - Soil Taxonomy,» 2021. [En línea]. Available: [https://app1.icgc.cat/bd/msc250mstv10sh0fsp1r010\\_2019.zip](https://app1.icgc.cat/bd/msc250mstv10sh0fsp1r010_2019.zip). [Último acceso: 05 06 2022].
- [3] ICGC, «Mapa de sòls de Catalunya 1:250.000 - World Reference Base for Soil Resources (WRB),» 2021. [En línea]. Available: [https://app1.icgc.cat/bd/msc250mwrbv10sh0fsp1r010\\_2019.zip](https://app1.icgc.cat/bd/msc250mwrbv10sh0fsp1r010_2019.zip). [Último acceso: 05 05 2022].
- [4] S. Herrera García, J. Fernández Fernández, J. M. Gutiérrez, R. Ancell, M. R. Pons, M. D. Frías, S. Kotlarski, P. Szabó, O. Rätty, K. Keuler, P. M. Soares, R. M. Cardoso, T. Bosshard, C. Pagé, F. Boberg, F. A. Isotta, A. Jaczewski, F. Kreienkamp, M. A. Liniger y C. Lussana, «Spain02: A set of gridded precipitation and temperature datasets,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.meteo.unican.es/es/datasets/spain02>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [5] S. Herrera García y J. Fernández Fernández, «Desarrollo, validación y aplicaciones de Spain02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitaciones y temperatura en España,» *Santander Meteorology Group*, p. 124, 2011.
- [6] S. Herrera García, J. M. Gutiérrez, R. Ancell, M. R. Pons, M. D. Frías y J. Fernández Fernández, «Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02),» *International Journal of Climatology*, vol. 32,

- pp. 74-85, 2012.
- [7] S. Herrera García, J. M. Gutiérrez, M. D. Frías y J. Fernández Fernández, «Nuevas versiones de Spain02: Datos diarios de precipitación y temperatura para estudios de regionalización y análisis de tendencias,» *International Journal of Climatology*, vol. 32, pp. 74-85, 2012.
- [8] S. Herrera García, J. Fernández Fernández y J. M. Gutiérrez, «Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: Assessing the effect of the interpolation methodology,» *International Journal of Climatology*, vol. 36, pp. 900-908, 2016.
- [9] S. Kotlarski, P. Szabó, S. Herrera García, O. Räty, K. Keuler, P. M. Soares, R. M. Cardoso, T. Bosshard, C. Pagé, F. Boberg, J. M. Gutiérrez, F. A. Isotta, A. Jaczewski, F. Kreienkamp, M. A. Liniger, C. Lussana y K. Pianko-Kluczyńska, «Observational uncertainty and regional climate model evaluation: A pan-European perspective,» *International Journal of Climatology*, 2017.
- [10] AgriMetSoft, «Netcdf-Extractor,» Agricultural and Meteorological Software, 2019. [En línea]. Available: <https://agrimetsoft.com/netcdf-extractor-download.aspx>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [11] S. Herrera García y J. Fernández Fernández, «Desarrollo, validación y aplicaciones de Spain02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitaciones y temperatura en España,» *Santander Meteorology Group*, p. 124, 2011.
- [12] CREAM-CTFC, «Laboratori Forestal Català,» CREAM-CTFC, 2019. [En línea]. Available: <https://laboratoriforestal.creaf.cat/>. [Último acceso: 22 06 2022].
- [13] M. De Cáceres, N. Martin-StPaul, M. Turco, A. Cabon y V. Granda, «Meteoland app (Laboratori Forestal Català),» CREAM-CTFC, 15 10 2020. [En línea]. Available: [https://laboratoriforestal.creaf.cat/meteoland\\_app/](https://laboratoriforestal.creaf.cat/meteoland_app/). [Último acceso: 03 05 2022].
- [14] M. De Cáceres, N. Martin-StPaul, M. Turco, A. Cabon y V. Granda, «Estimating daily



- meteorological data and downscaling climate models over landscapes,» *Environmental Modelling and Software*, vol. 108, nº 1364-8152, pp. 186-196, 2018.
- [15] M. L. Salas Regalado, «Nueva formulación para calcular la intensidad de precipitación para cualquier duración a partir de la precipitación diaria en la España peninsular,» 2016. [En línea]. Available: [https://hidrologia.usal.es/Complementos/calculo\\_IDF\\_Salas.pdf](https://hidrologia.usal.es/Complementos/calculo_IDF_Salas.pdf). [Último acceso: 25 04 2022].
- [16] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith, *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*, Roma: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [17] CREAM-CTFC, «Laboratori Forestal Català,» CREAM-CTFC, 2019. [En línea]. Available: <https://laboratoriforestal.cream.cat/>. [Último acceso: 22 Junio 2022].
- [18] M. De Cáceres, N. Martin-StPaul, M. Turco, A. Cabon y V. Granda, «Meteoland app (Laboratori Forestal Català,» CREAM-CTFC, 15 Octubre 2020. [En línea]. Available: [https://laboratoriforestal.cream.cat/meteoland\\_app/](https://laboratoriforestal.cream.cat/meteoland_app/). [Último acceso: 3 Mayo 2022].
- [19] M. L. Salas Regalado, «Nueva formulación para calcular la intensidad de precipitación para cualquier duración a partir de la precipitación diaria en la España peninsular,» 2016. [En línea]. Available: [https://hidrologia.usal.es/Complementos/calculo\\_IDF\\_Salas.pdf](https://hidrologia.usal.es/Complementos/calculo_IDF_Salas.pdf). [Último acceso: 25 abril 2022].
- [20] ACA, «RESOLUCIÓ TES/1549/2018, de 4 de juliol,» *Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya*, vol. 7659, nº 9.7.2018, pp. 1-16, 2018.
- [21] Y. Her, J. Frankenberger, I. Chaubey y R. Srinivasan, «Threshold effects in HRU definition of the Soil and Water Assessment Tool,» *Transactions of the ASABE*, vol. 58, pp. 367-378, 2015.
- [22] J. Ibàñez y J. A. Burriel, «Ocupació del sòl a Catalunya : 3a edició del Mapa de Cobertes (MCSC-3),» CREAM, 2009.

- [23] S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry y J. R. Williams, Soil & Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2009., 2009.
- [24] R. Poyatos, J. Latron y P. Llorens, «Land Use and Land Cover Change After Agricultural Abandonment,» *Mountain Research and Development*, vol. 23, pp. 362-368, 2003.
- [25] ACA, «Pla de gestió del districte de conca fluvial de Catalunya 2016-2021,» Generalitat de Catalunya, 2015.
- [26] P. Serra, X. Pons y D. Saurí, «Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors,» *Applied Geography - APPL GEOGR*, vol. 28, pp. 189-209, 7 2008.
- [27] J. M. García-Ruiz, T. Lasanta, P. Ruiz-Flano, L. Ortigosa, S. White, C. González y C. Martí, «Land-use changes and sustainable development in mountain areas: a case study in the Spanish Pyrenees,» *Landscape Ecology*, vol. 11, pp. 267-277, 01 10 1996.
- [28] J. M. Bosch y J. D. Hewlett, «A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration,» *Journal of Hydrology*, vol. 55, pp. 3-23, 1982.
- [29] C. Buendia, R. J. Batalla, S. Sabater, A. Palau y R. Marcé, «Runoff Trends Driven by Climate and Afforestation in a Pyrenean Basin,» *Land Degradation and Development*, vol. 27, pp. 823-838, 2016.
- [30] P. Pérez-Cutillas, M. F. Cataldo, D. A. Zema, J. De Vente y C. Boix-Fayos, «Efectos de la revegetación a escala de cuenca sobre el caudal y la evapotranspiración en ambiente mediterráneo. Cuenca del Taibilla (SE de España) Greening-up effects on streamflow and evapotranspiration in Mediterranean catchments. An example of Taibilla catchment (SE Spain),» *Bosque*, vol. 39, pp. 119-129, 2018.
- [31] I. R. Calder, «Forests and water—Ensuring forest benefits outweigh water costs,» *Forest Ecology and Management*, vol. 251, pp. 110-120, 2007.

- [32] C. Allen, D. Breshears y N. McDowell, «On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene,» *Ecosphere*, vol. 6, pp. art129; 1-55, 8 2015.
- [33] F. Gallart y P. Llorens, «Catchment Management under Environmental Change: Impact of Land Cover Change on Water Resources,» *Water International - WATER INT*, vol. 28, pp. 334-340, 9 2003.
- [34] R. S. Kovats, R. Valentini, L. M. Bouwer, E. Georgopoulou, D. Jacob, E. Martin, M. Rounsevell y J. Soussana, «23. Europe,» *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 1267-1326, 2014.
- [35] A. Iglesias, L. Garrote, F. Flores y M. Moneo, «Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean,» *Water Resources Management*, vol. 21, pp. 775-788, 1 2007.
- [36] C. Millar, N. Stephenson y S. Stephens, «Millar CI, Stephenson NL, Stephens SL.. Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecol Appl* 17: 2145-2151,» *Ecological applications : a publication of the Ecological Society of America*, vol. 17, pp. 2145-51, 1 2008.
- [37] F. Gallart, J. Delgado, S. Beatson, H. Posner, P. Llorens y R. Marcé, «Analysing the effect of global change on the historical trends of water resources in the headwaters of the Llobregat and Ter river basins (Catalonia, Spain),» *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 36, pp. 655-661, 12 2011.
- [38] R. Defries y K. Eshleman, «Land-Use Change and Hydrologic Processes: A Major Focus for the Future,» *Hydrological Processes*, vol. 18, pp. 2183-2186, 8 2004.
- [39] J. P. Nunes, J. Seixas y N. R. Pacheco, «Vulnerability of water resources, vegetation

- productivity and soil erosion to climate change in Mediterranean watersheds,» *Hydrological Processes*, vol. 22, pp. 3115-3134, 2008.
- [40] V. Acácio, F. S. Dias, F. X. Catry, M. Rocha y F. Moreira, «Landscape dynamics in Mediterranean oak forests under global change: understanding the role of anthropogenic and environmental drivers across forest types,» *Global Change Biology*, vol. 23, pp. 1199-1217, 2017.
- [41] J. M. García-Ruiz, J. I. López-Moreno, S. Vicente-Serrano, T. Lasanta y S. Beguería, «Mediterranean Water Resources in a Global Change Scenario,» *Earth-Science Reviews*, vol. 105, pp. 121-139, 4 2011.
- [42] V. Andréassian, «Waters and forests: from historical controversy to scientific debate,» *Journal of Hydrology*, vol. 291, pp. 1-27, 2004.
- [43] S. Beguería, J. I. López-Moreno, A. Lorente, M. Seeger y J. M. García-Ruiz, «Assessing the Effect of Climate Oscillations and Land-use Changes on Streamflow in the Central Spanish Pyrenees,» *Ambio*, vol. 32, pp. 283-6, 7 2003.
- [44] L. Zhang, W. R. Dawes y G. R. Walker, «Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale,» *Water Resources Research*, vol. 37, pp. 701-708, 2001.
- [45] T. Hatton y R. George, «The role of afforestation in managing dryland salinity,» de *Plantations, farm forestry and water: Workshop Proceedings, Publication No. 01/20*, Melbourne, 2001.
- [46] OPCC-CTP, «El cambio climático en los Pirineos : impactos, vulnerabilidades y adaptación,» 2018.
- [47] S. Castellari y B. Kurnik, «Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report.,» EEA Reports, 2017.
- [48] IDESCAT, «Projeccions de la població a Catalunya 2013-2051,» 2015.

- [49] D. Hawtree, J. P. Nunes, J. J. Keizer, R. Jacinto, J. Santos, M. E. Rial-Rivas, A.-K. Boulet, F. Tavares-Wahren y K.-H. Feger, «Time series analysis of the long-term hydrologic impacts of afforestation in the Águeda watershed of north-central Portugal,» *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, pp. 3033-3045, 2015.
- [50] UN, «Global Forest Goals and Targets of the UN Strategic Plan for Forests 2030,» 2019.
- [51] UN, «Plan estratégico de las Naciones Unidas para los bosques 2017-2030 y programa de trabajo cuadrienal del Foro de las Naciones Unidas sobre los Bosques para el período 2017-2020,» 2017.
- [52] UN, «United Nations strategic plan for forests, 2017-2030,» 2016.
- [53] X. Duran, M. J. Picó y L. Reales, «El Cambio Climático en cataluña. Resumen ejecutivo del Tercer informe sobre el cambio climático en Cataluña,» 2017.
- [54] A. Del Campo, T. J. G. Fernandes y A. Molina, «Hydrology-oriented (adaptive) silviculture in a semiarid pine plantation: How much can be modified the water cycle through forest management?,» *European Journal of Forest Research*, vol. 133, 3 2014.
- [55] A. Molina y A. Del Campo, «The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations,» *Forest Ecology and Management*, vol. 269, p. 206–213, 4 2012.
- [56] J. I. López-Moreno, S. Vicente-Serrano, J. Zabalza, J. Revuelto, M. Gilaberte-Búrdalo, C. Azorin-Molina, E. Morán-Tejeda, J. M. García-Ruiz y C. Tague, «Respuesta hidrológica del Pirineo central al cambio ambiental proyectado para el siglo XXI,» *Pirineos*, vol. 169, p. e004, 12 2014.
- [57] J. A. López-Bustins, «Lluvias fuertes, pero mal repartidas. El caso del clima Mediterráneo,» *Biblio3W*, vol. 23, pp. 4-9, 2018.
- [58] R. Seidl, T. A. Spies, D. L. Peterson, S. L. Stephens and J. A. Hicke, "Searching for resilience:

- addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services,» *The Journal of applied ecology*, vol. 53, no. 1, pp. 120-129, 2 2016.
- [59] R. J. Keenan, «Climate change impacts and adaptation in forest management: a review,» *Annals of Forest Science*, vol. 72, pp. 145-167, 01 3 2015.
- [60] C. Macleod, D. Scholefield y P. Haygarth, «Integration for sustainable catchment management,» *The Science of the total environment*, vol. 373, pp. 591-602, 3 2007.
- [61] K. A. Brauman, G. C. Daily, T. K. Duarte y H. A. Mooney, «The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services,» *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 32, pp. 67-98, 2007.
- [62] FAO, «FAO - Land & Water - Land Resources Planning Toolbox - Soil and Water Assessment Tool,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1111246/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [63] IPCC, «IPCC Data,» [En línea]. Available: <https://www.ipcc.ch/data/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [64] TEXAS A&M UNIVERSITY - AGRILIFE RESEARCH, USDA - Agricultural Research Service, «SWAT - Soil and Water Assessment Tool,» 2019. [En línea]. Available: <https://swat.tamu.edu/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [65] QGIS, «QGIS-2.6.1-1,» 2019. [En línea]. Available: <http://qgis.org/downloads/QGIS-OSGeo4W-2.6.1-1-Setup-x86.exe>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [66] TEXAS A&M UNIVERSITY - AGRILIFE RESEARCH, USDA - Agricultural Research Service, «SWAT Editor,» 2019. [En línea]. Available: <https://swat.tamu.edu/software/swat-editor/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [67] TEXAS A&M UNIVERSITY - AGRILIFE RESEARCH, USDA - Agricultural Research Service, «SWAT Check,» 2019. [En línea]. Available: <https://swat.tamu.edu/software/swat-check/>.

- [Último acceso: 24 09 2019].
- [68] M. Mwiza, «Application of remote sensing using a GIS based soil water assessment tool (SWAT) to estimate river discharge in the Kabompo river basin-Zambia,» 2012.
- [69] L. Gies y V. Merwade, «Creating SWAT Soil Database using FAO Soil and Terrain Database of East Africa (SOTER) Data».
- [70] GitHub, Inc, «DSMW - WORLD764.xls,» 2019. [En línea]. Available: <https://github.com/DublinR/GISwithRDemo/blob/master/JW/DSMW/WORLD764.xls>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [71] C. George, «Predefined watershed and stream network».
- [72] G. Fischer, F. O. Nachtergaele, S. Prieler, E. Teixeira, G. Toth, H. Velthuisen, L. Verelst y D. Wiberg, «Global Agro-ecological Zones (GAEZ v3.0): Model Documentation,» 2012.
- [73] J. Almorox, La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación, 2010.
- [74] FAO, Guidelines for Soil Description, 4th ed., Rome, 2006.
- [75] EEA, «Land resources,» CORINE Land resources, 1994.
- [76] A. Del Campo, M. González-Sanchis, A. Lidón, A. García-Prats, C. Lull, I. Bautista, G. Ruíz-Pérez y F. Francés, «Ecohydrological-Based Forest Management in Semi-arid Climate,» 2017.
- [77] T. A. Fontaine, T. S. Cruickshank, J. G. Arnold y R. H. Hotchkiss, «Development of a snowfall–snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT),» *Journal of Hydrology*, vol. 262, pp. 209-223, 2002.
- [78] Y. Grusson, X. Sun, S. Gascoin, S. Sauvage, S. Raghavan, F. Anctil y J.-M. Sánchez-Pérez, «Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and

- streamflow dynamics over an alpine watershed,» *Journal of Hydrology*, vol. 531, pp. 574-588, 2015.
- [79] K. Rahman, C. Maringanti, M. Beniston, F. Widmer, K. Abbaspour y A. Lehmann, «Streamflow Modeling in a Highly Managed Mountainous Glacier Watershed Using SWAT: The Upper Rhone River Watershed Case in Switzerland,» *Water Resources Management*, vol. 27, 11 2013.
- [80] K. C. Abbaspour, J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist y R. Srinivasan, «Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT,» *Journal of Hydrology*, vol. 333, pp. 413-430, 2007.
- [81] J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney y S. L. Neitsch, Soil & Water Assessment Tool. Input/Output Documentation. Version 2012, 2012.
- [82] J. Schwank, R. Escobar, G. H. Girón y E. Morán-Tejeda, «Modeling of the Mendoza river watershed as a tool to study climate change impacts on water availability,» *Environmental Science and Policy*, vol. 43, pp. 91-97, 2014.
- [83] R. S. Ahl, S. W. Woods y H. R. Zuuring, «Hydrologic calibration and validation of SWAT in a snow-dominated Rocky Mountain watershed, Montana, U.S.A.,» *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 44, pp. 1411-1430, 2008.
- [84] M. Meaurio, A. Zabaleta, J. A. Uriarte, R. Srinivasan y I. Antigüedad Auzmendi, «Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed,» *Journal of Hydrology*, vol. 525, pp. 326-334, 2015.
- [85] Y. Tuo, Z. Duan, M. Disse y G. Chiogna, «Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige river basin (Italy),» *Science of the Total Environment*, vol. 573, pp. 66-82, 2016.
- [86] L. Palazón y A. Navas, «Case study: Effect of climatic characterization on river discharge in an alpine-prealpine catchment of the spanish pyrenees using the SWAT model,» *Water*



- (Switzerland), vol. 8, 2016.
- [87] L. Gottschalk, J. L. Jensen, D. Lundquist, R. Solantie y A. Tollan, «Hydrologic Regions in the Nordic Countries,» *Hydrology Research*, vol. 10, pp. 273-286, 10 1979.
- [88] M. Strauch, R. Otto y M. Volk, «HRU aggregation and its effects on model outputs,» de *2015 International SWAT Conference, Sardinia, June, 2015*.
- [89] X. Sun, Y. Hong, L. Bernard-Jannin, R. Chea, S. Sauvage y J. M. Sánchez Pérez, «Effects of elevation bands and snow parameters on the hydrological modeling of the upper part of the Garonne watershed (France),» de *(2013 International SWAT Conference, Toulouse, France), 2013*.
- [90] K. C. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. A. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang y B. Kløve, «A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model,» *Journal of Hydrology*, vol. 524, pp. 733-752, 2015.
- [91] L. Palazón y A. Navas, «Modeling sediment sources and yields in a Pyrenean catchment draining to a large reservoir (Ésera River, Ebro Basin),» *Journal of Soils and Sediments*, vol. 14, pp. 1612-1625, 2014.
- [92] C. Carvalho-Santos, J. P. Nunes, A. T. Monteiro, L. Hein y J. P. Honrado, «Assessing the effects of land cover and future climate conditions on the provision of hydrological services in a medium-sized watershed of Portugal,» *Hydrological Processes*, vol. 30, pp. 720-738, 2016.
- [93] S. S. Putra, «Step 9.a QGIS Interface for SWAT (QSWAT) Tutorial,» 24 11 2016. [En línea]. Available: <https://santosasandyputra.wordpress.com/2016/11/24/step-9-a-qgis-interface-for-swat-qswat-tutorial/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [94] K. C. Abbaspour, *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual*, 2015.

- [95] R. I. Gonzales Romero, «Copiar el contenido de archivos txt incrementalmente sobre hoja de excel,» Todoexpertos, 26 02 2015. [En línea]. Available: <https://www.todoexpertos.com/categorias/tecnologia-e-internet/software-y-aplicaciones/microsoft-excel/respuestas/834w4566guxhc/copiar-el-contenido-de-archivos-txt-incrementalmente-sobre-hoja-de-excel>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [96] ICGC; Grumets (CREAF-UAB), «Mapa d'usos i cobertes del sòl,» Generalitat de Catalunya, 2019. [En línea]. Available: [http://territori.gencat.cat/ca/01\\_departament/12\\_cartografia\\_i\\_toponimia/bases\\_cartografiques/medi\\_ambient\\_i\\_sostenibilitat/bases\\_miramont/territori/mapa-dusos-i-cobertes-del-sol/](http://territori.gencat.cat/ca/01_departament/12_cartografia_i_toponimia/bases_cartografiques/medi_ambient_i_sostenibilitat/bases_miramont/territori/mapa-dusos-i-cobertes-del-sol/). [Último acceso: 24 09 2019].
- [97] IIASA, «Harmonized World Soil Database (HWSD v 1.21),» International Institute for Applied Systems Analysis, 20 12 2017. [En línea]. Available: <https://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/water/HWSD.html>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [98] FAO, «Base de Datos Armonizada de los Suelos del Mundo v1.2,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/base-de-datos-armonizada-de-los-suelos-del-mundo-v12/es/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [99] ICGC, «Geoíndex - Sòls,» Generalitat de Catalunya, 2019. [En línea]. Available: <http://www.icgc.cat/Administracio-i-empresa/Eines/Visualitzadors-Geoindex/Geoindex-Sols>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [100] FAO, «FAO Digital Soil Map of the World (DSMW),» 2019. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026564/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [101] Harvard, «WorldMap - Digital Soil Map of the World,» 2015. [En línea]. Available: [https://worldmap.harvard.edu/data/geonode:DSMW\\_RdY](https://worldmap.harvard.edu/data/geonode:DSMW_RdY). [Último acceso: 24 09 2019].

- [102] ICGC y A. Baltiérrez Moras, «Cartografia d'unitats edafològiques de Catalunya a escala 1:250.000: Berguedà i Garrotxa,» 2014.
- [103] FAO, «Mapa Mundial de Suelos de la FAO/UNESCO,» FAO, 2019. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/mapa-mundial-de-suelos-de-faunesco/es/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [104] IGN, «Atlas Nacional de España - Categoría:Medio natural,» Gobierno de España, 11 03 2019. [En línea]. Available: [http://atlasnacional.ign.es/wane/Categor%C3%ADa:Medio\\_natural](http://atlasnacional.ign.es/wane/Categor%C3%ADa:Medio_natural). [Último acceso: 24 09 2019].
- [105] ICGC, «Mapes d'interès històric,» Generalitat de Catalunya, [En línea]. Available: <http://www.icgc.cat/ca/Administracio-i-empresa/Serveis/Sols/Antecedents-historics/Mapes-d-interes-historic>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [106] JRC, «Soils of the European Union,» European Commission, 24 09 2019. [En línea]. Available: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC46573>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [107] JRC, «Soil Datasets > Data > European Soil Database > Raster Library 10kmx10km,» European Comission, 25 10 2013. [En línea]. Available: [https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB\\_Archive/raster\\_archive/ESDBv2\\_ETRS\\_LAEA\\_raster\\_archive.html](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/raster_archive/ESDBv2_ETRS_LAEA_raster_archive.html). [Último acceso: 24 09 2019].
- [108] ISRIC, «SoilGrids — global gridded soil information,» [En línea]. Available: <https://www.isric.org/explore/soilgrids>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [109] ISRIC, «ISRIC World Soil Information,» [En línea]. Available: <https://www.isric.org/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [110] FAO, «GeoNetwork - Find and analyze geo-spatial data,» [En línea]. Available:

- <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [111] FAO-UNESCO, Soil map of the world. Volume V - Europe, vol. 5, 1981, p. 1168.
- [112] JRC, «The European Soil Database,» European Comission, [En línea]. Available: [https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB\\_Archive/ESDB\\_Data\\_Distribution/ESDB\\_Data\\_full\\_distribution/ESDBv2\\_data/fr\\_easy.htm](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/ESDB_Data_Distribution/ESDB_Data_full_distribution/ESDBv2_data/fr_easy.htm). [Último acceso: 24 09 2019].
- [113] J. Sánchez San Román, «Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves,» 2006.
- [114] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith, «Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements),» 1998.
- [115] G. Hargreaves y Z. Samani, «Reference Crop Evapotranspiration From Temperature,» *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 1, 1 1985.
- [116] M. Zambrano-Bigiarini, Package ' hydroGOF '. Goodness-of-Fit Functions for Comparison of Simulated and Observed Hydrological Time Series, 2013.
- [117] P. K. Kitanidis y R. L. Bras, «Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model: 2. Applications and results,» *Water Resources Research*, vol. 16, pp. 1034-1044, 1980.
- [118] C. Corradini y F. Melone, «An adaptive model for on-line flood predictions using a piecewise uniformity framework,» *Journal of Hydrology*, vol. 88, pp. 365-382, 1986.
- [119] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel y T. L. Veith, «Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations,» *Transactions of the ASABE*, vol. 50, pp. 885-900, 2007.
- [120] H. Gupta, S. Sorooshian y P. Yapo, «Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison With Multilevel Expert Calibration,» *Journal of Hydrologic Engineering - J HYDROL ENG*, vol. 4, 4 1999.

- [121] D. E. D. C. Arriesgado, K. L. Ligan, C. B. L. Lumba, L. S. Tomenio, M. B. Solomon, J. M. Vergel, F. F. Ramos, A. Cunanan Yabut y O. López, «STUDY OF ANTECEDENT MOISTURE CONDITION IN RAINFALL AND RUNOFF RELATIONSHIP FOR RIO GRANDE DE MINDANAO RIVER,» 2017.
- [122] T. M. Hill, «Predicting elections: Who's the most accurate ?,» *significancemagazine.com*, 2015.
- [123] S. Dent, R. B. Hanna y L. T. Wright, «Automated Calibration using Optimization Techniques with SWMM RUNOFF,» *Journal of Water Management Modeling*, vol. 6062, 2004.
- [124] D. Moriasi, M. Gitau, N. Pai y P. Daggupati, «Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria,» *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, vol. 58, pp. 1763-1785, 12 2015.
- [125] F. M. Meins, M. S. Krol, M. J. Booij y P. R. Oel, «Evaluation of spatial scale alternatives for hydrological modelling of the Lake Naivasha basin, Kenya,» 2013.
- [126] M. K. Muleta, «Model Performance Sensitivity to Objective Function during Automated Calibrations,» *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 17, pp. 756-767, 2012.
- [127] C. Dagbagnon y D. Sohoulane, «Assessment of sediment inflow to a reservoir using the SWAT model under undammed conditions: A case study for the Somerville reservoir, Texas, USA,» *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 6, pp. 222-229, 2018.
- [128] P. Krause, D. P. Boyle y F. Bäse, «Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment,» *Advances in Geosciences*, vol. 5, pp. 89-97, 2005.
- [129] D. Legates y G. McCabe, «Evaluating the Use Of "Goodness-of-Fit" Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation,» *Water Resources Research*, vol. 35, pp. 233-241, 1

- 1999.
- [130] C. J. Willmott, «ON THE VALIDATION OF MODELS,» *Physical Geography*, vol. 2, pp. 184-194, 1981.
- [131] C. J. Willmott, «On the Evaluation of Model Performance in Physical Geography,» de *Spatial Statistics and Models*, G. L. Gaile y C. J. Willmott, Edits., Dordrecht, Springer Netherlands, 1984, pp. 443-460.
- [132] H. Gupta, H. Kling, K. Yilmaz y G. Martinez, «Decomposition of the Mean Squared Error and NSE Performance Criteria: Implications for Improving Hydrological Modelling,» *Journal of Hydrology*, vol. 377, pp. 80-91, 10 2009.
- [133] W. Vervoort, Course Notes Advanced SWAT: Calibrating using SWAT-CUP, 2017, pp. 1-27.
- [134] T. Alemayehu, A. Van Griensven, B. T. Woldegiorgis y W. Bauwens, «An improved SWAT vegetation growth module and its evaluation for four tropical ecosystems,» *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, pp. 4449-4467, 2017.
- [135] A. C. Lazzari Franco y N. Bernardi Bonumá, «Multi-variable SWAT model calibration with remotely sensed evapotranspiration and observed flow,» *RBRH*, vol. 22, 2017.
- [136] N. Hoghooghi, D. Radcliffe, R. Mukundan y A. Gotvald, «Multi-Site Sensitivity Analysis and Calibration of a SWAT Model on a Selected Urban Watershed in Metropolitan Atlanta, GA».
- [137] ASCE, «Criteria for Evaluation of Watershed Models,» *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 119, pp. 429-442, 5 1993.
- [138] Y. Castañeda Morales, R. Franco y F. M. Castro Barrios, «MODELACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RIO COELLO, BAJO ESCENARIO DE CAMBIO CLIMATICO, A TRÁVES DE LA APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLOGICO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL),» 2016.

- [139] Z. Kalantari, C. S. Santos Ferreira, R. P. D. Walsh, A. J. D. Ferreira y G. Destouni, «Urbanization Development under Climate Change: Hydrological Responses in a Peri-Urban Mediterranean Catchment,» *Land Degradation and Development*, vol. 28, pp. 2207-2221, 2017.
- [140] X. Wang y A. M. Melesse, «Evaluation of the SWAT model's snowmelt hydrology in a northwestern Minnesota watershed,» *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 48, pp. 1359-1376, 2005.
- [141] J. Singh, H. V. Knapp, J. G. Arnold y M. Demissie, «HYDROLOGICAL MODELING OF THE IROQUOIS RIVER WATERSHED USING HSPF AND SWAT1,» *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 41, pp. 343-360, 2005.
- [142] M. J. Delgado Tinoco, P. Llorens García, F. Gallart Gallego y J. Martínez Vilalta, «Efecto de la variabilidad climática y de los cambios en las cubiertas del suelo sobre el balance hidrológico en la cabecera del río Llobregat,» 2011.
- [143] D. Okcu, E. Sezgin y H. Okcu, «DEVELOPING A NEW TOTAL SEDIMENT TRANSPORT FORMULA VIA POLYNOMIAL BEST SUBSET REGRESSION,» *International Journal of Management and Applied Science*, pp. 50-56, 2018.
- [144] G. Aneiros-Pérez, R. Cao y J. M. Vilar-Fernández, «Functional methods for time series prediction: A nonparametric approach,» *Journal of Forecasting*, vol. 30, pp. 377-392, 2011.
- [145] Y. Kim, K. Sartelet, J. C. Raut y P. Chazette, «Evaluation of the Weather Research and Forecast/Urban Model Over Greater Paris,» *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 149, pp. 105-132, 2013.
- [146] D. Biondi, «Proposta per la definizione di un protocollo per la validazione di modelli idrologici,» de *Università della Calabria*, 2012.

- [147] F. García Fernández, L. García Esteban, P. De Palacios, M. Navarro y M. Conde, «Prediction of standard particleboard mechanical properties utilizing an artificial neural network and subsequent comparison with a multivariate regression model,» *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, vol. 17, p. 178, 2008.
- [148] M. Jajarmizadeh, L. M. Sidek, S. Harun y M. Salarpour, «Optimal Calibration and Uncertainty Analysis of SWAT for an Arid Climate,» *Air, Soil and Water Research*, vol. 10, 2017.
- [149] M. P. López, C. Yacoub López y A. Pérez-Foguet, «CALIBRACIÓN DEL MODELO PARA EL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN LOS SEDIMENTOS EN LA CUENCA DE JEQUETEPEQUE, CAJAMARCA, PERÚ,» 2012.
- [150] Z. Yu, *SWAT Output Viewer User Manual (v 0.1)*, 2016.
- [151] U. Duru, E. Wohl, S. Rathburn, M. Arabi y W. Sanford, «MODELING SEDIMENT YIELD AND DEPOSITION USING THE SWAT MODEL : A CASE STUDY OF CUBUK I AND CUBUK II RESERVOIRS, TURKEY,» 2015.
- [152] M. Ahmadi, I. I. Ascough, K. C. DeJonge y M. Arabi, «Multisite-multivariable sensitivity analysis of distributed watershed models: enhancing the perceptions from computationally frugal methods.,» *Ecological Modelling*, vol. 279, pp. 54-67, 2014.
- [153] Varios, «Best of 1-1250 Messages».
- [154] G. Singh y D. Saraswat, «Development and evaluation of targeted marginal land mapping approach in SWAT model for simulating water quality impacts of selected second generation biofeedstock,» *Environmental Modelling and Software*, vol. 81, pp. 26-39, 2016.
- [155] R. Ang y C. Oeurng, «Simulating streamflow in an ungauged catchment of Tonlesap Lake Basin in Cambodia using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model,» *Water Science*, vol. 32, pp. 89-101, 2018.



- [156] S. M. Ghoraba, «Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model,» *Alexandria Engineering Journal*, vol. 54, pp. 583-594, 2015.
- [157] G. Tamayo García y C. S. Paez-Bimos, «Evaluación de los caudales líquidos y de producción de sedimentos estimados con el modelo soil water assesment tool (swat) y su relación con los caudales líquidos y sólidos observados,» 2016.
- [158] J. E. Nash y J. V. Sutcliffe, «River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles,» *Journal of Hydrology*, vol. 10, pp. 282-290, 1970.
- [159] C. Baffaut y V. W. Benson, «Modeling Flow and Pollutant Transport in a Karst Watershed with SWAT,» *Transactions of the ASABE*, vol. 52, pp. 469-479, 2009.
- [160] D. De Almeida Bressiani, P. W. Gassman, J. Gurgel Fernandes, L. H. Pospissil Garbossa, R. Srinivasan, N. Bernardi Bonumá y E. M. Mendiondo, «A review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects,» *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 8, pp. 1-27, 2015.
- [161] F. J. Segura Méndez, J. Senent Aparicio, J. Pérez Sánchez y D. Pulido Velázquez, «Análisis comparativo de modelos agregados de balance hídrico en la España peninsular y su sensibilidad a la incertidumbre climática,» 2017.
- [162] C. Carvalho-Santos, A. T. Monteiro, J. C. Azevedo, J. P. Honrado y J. P. Nunes, «Climate Change Impacts on Water Resources and Reservoir Management: Uncertainty and Adaptation for a Mountain Catchment in Northeast Portugal,» *Water Resources Management*, vol. 31, pp. 3355-3370, 2017.
- [163] J. Zabalza-Martínez, S. M. Vicente-Serrano, J. I. López-Moreno, G. B. Calvo, R. Savé, D. Pascual, E. Pla, E. Morán-Tejeda, F. Domínguez-Castro y C. L. Tague, «The influence of climate and land-cover scenarios on dam management strategies in a highwater pressure catchment in Northeast Spain,» *Water (Switzerland)*, vol. 10, 2018.

- [164] C. D. ESTUDIOS DEL JILOCA, «Aplicación Del “Swat” Como Modelo Para La Gestión Del Agua Y El Suelo En La Cuenca Hidrográfica Del Jiloca,» 2010.
- [165] C. Santhi, J. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan y L. M. Hauck, «Validation of the SWAT Model on a Large River Basin with Point and Nonpoint Sources,» *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 37, pp. 1169-1188, 10 2001.
- [166] J. M. Ubalde, X. Sort y R. M. Poch, «Application of a very ubdetailed soil survey ubmethod in viticultural ubzoning in Catalonia, Spain,» *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, vol. 43, pp. 55-66, 2009.
- [167] J. I. López-Moreno, J. Zabalza-Martínez, S. M. Vicente-Serrano, J. Revuelto, M. Gilaberte, C. Azorin-Molina, E. Morán-Tejeda, J. M. García-Ruiz y C. L. Tague, «Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees,» *Science of the Total Environment*, vol. 493, pp. 1222-1231, 2014.
- [168] K. O. Asante, G. A. Artan, S. Pervez, C. Bandaragoda y J. P. Verdin, «Technical Manual for the Geospatial Stream Flow Model (GeoSFM): US Geological Survey Open-File Report 2007-1441,» *US Geological Survey, Reston*, 2008.
- [169] S. Jadhav, H. He y K. Jenkins, «Prediction of earnings per share for industry,» de *IC3K 2015 - Proceedings of the 7th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management*, 2015.
- [170] M. Méndez Morales, «Sistema de vigilancia y monitoreo para la prevención de desastres por inundación en el sistema de cuencas del río Toyogres y la quebrada Zopilote en Dulce Nombre de Cartago,» 2012.
- [171] M. Olaleye, K. Dahal y Z. Pervez, «A Fuzzy-based Throughput Prediction for Wireless Communication Systems,» de *2018 IEEE (SMC) International Conference on Innovations in Intelligent Systems and Applications, INISTA 2018*, 2018.

- [172] B. K. Pandey, A. K. Gosain, G. Paul y D. Khare, «Climate change impact assessment on hydrology of a small watershed using semi-distributed model,» *Applied Water Science*, vol. 7, pp. 2029-2041, 2017.
- [173] J. G. Arnold, D. N. Moriasi, P. W. Gassman, K. C. Abbaspour, M. J. White, R. Srinivasan, C. Santhi, R. D. Harmel, A. V. Griensven, M. W. Van Liew, N. Kannan, M. K. Jha, A. Griensven, M. W. Van Liew, N. Kannan y M. K. Jha, «SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION,» *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, vol. 55, pp. 1491-1508, 2012.
- [174] G. P. Fernandez, G. M. Chescheir, R. W. Skaggs y D. M. Amatya, «Development and Testing of Watershed Scale Models for Poorly Drained Soils,» *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 48, 3 2005.
- [175] F. F. Tang, H. S. Xu y Z. X. Xu, «Model calibration and uncertainty analysis for runoff in the Chao River Basin using sequential uncertainty fitting,» *Procedia Environmental Sciences*, vol. 13, pp. 1760-1770, 2012.
- [176] L. P. Ogwen, J. M. Gathenya y P. G. Home, «Hydrologic analysis of Malewa watershed as a basis for Implementing Payment for Environmental Services (PES),» pp. 657-687, 2009.
- [177] A. Zhang, T. Li, Y. Si, R. Liu, H. Shi, X. Li, J. Li y X. Wu, «Double-layer parallelization for hydrological model calibration on HPC systems,» *Journal of Hydrology*, vol. 535, pp. 737-747, 2016.
- [178] B. Vilaysane, K. Takara, P. Luo, I. Akkharath y W. Duan, «Hydrological Stream Flow Modelling for Calibration and Uncertainty Analysis Using SWAT Model in the Xedone River Basin, Lao PDR,» *Procedia Environmental Sciences*, vol. 28, pp. 380-390, 2015.
- [179] R. Fernández De Villarán San Juan, «UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA “SWAT” PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EMISIÓN DE SEDIMENTOS EN CUENCAS,» 2017.

- [180] P.-y. Chen, M. Di Luzio y J. G. Arnold, «Impact of Two Land-Cover Data Sets on Stream Flow and Total Nitrogen Simulations Using a Spatially Distributed,» *Global Priorities in Land Remote Sensing*, 2005.
- [181] J. G. Arnold, C. Santhi, M. Di Luzio, E. B. Haney, N. Kannan y M. J. White, «The HUMUS/SWAT National Water Quality Modeling System,» 2010.
- [182] Y. Grusson, F. Anctil, S. Sauvage y J. M. Sánchez Pérez, «Testing the SWAT model with gridded weather data of different spatial resolutions,» *Water (Switzerland)*, vol. 9, pp. 1-16, 2017.
- [183] P. L. INRM Consultants, «Glacier and Snowmelt Modelling Using Swat : Ganga Basin Case Study».
- [184] M. Fan y H. Shibata, «Spatial and temporal analysis of hydrological provision ecosystem services for watershed conservation planning of water resources,» *Water Resources Management*, vol. 28, pp. 3619-3636, 2014.
- [185] M. Fan y H. Shibata, «Simulation of watershed hydrology and stream water quality under land use and climate change scenarios in Teshio River watershed, northern Japan,» *Ecological Indicators*, vol. 50, pp. 79-89, 2015.
- [186] J. Aubia Ferré, P. Llorens García y F. Gallart Gallego, «MODELITZACIÓ EMPÍRICA DE L'EFFECTE DEL CANVI CLIMÀTIC I DEL CANVI DE LES COBERTES EN L'ESCOLAMENT,» 2010.
- [187] C. Santhi, R. Srinivasan, J. G. Arnold y J. R. Williams, «A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas,» *Environmental Modelling and Software*, vol. 21, pp. 1141-1157, 2006.
- [188] S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan y J. R. Williams, SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL USER'S MANUAL. VERSION 2000, 2002.
- [189] B. Birhanu, P. Ndomba y F. Mtalo, «Application of SWAT Model for Mountainous

- Catchment,» *Catchment and Lake Research*, pp. 2003-2008, 2007.
- [190] C. Amonett y S. T. Bednarz, *Part I - Watershed Modeling Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*.
- [191] J. Oestreicher, «Prospectivas y Aplicaciones del Modelo Hidrológico SWAT: Adaptación del modelo para su uso en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá».
- [192] N. D. Bennett, B. Croke, G. Guariso, J. Guillaume, S. Hamilton, A. J. Jakeman y V. Andreassian, «Characterising performance of environmental models,» *Environ. Model. Softw.* 40(February 2013), pp. 1-20, 11 2012.
- [193] P. Daggupati, H. Yen, M. White, R. Srinivasan, J. Arnold, S. Keitzer y S. Sowa, «Impact of model development, calibration and validation decisions on hydrological simulations in West Lake Erie Basin: Impact of Model Development Decisions on Streamflow Simulations,» *Hydrological Processes*, vol. 29, pp. 5307-5320, 5 2015.
- [194] R. D. Harmel, P. Smith, K. Migliaccio, I. Chaubey, K. Douglas-Mankin, B. Benham, S. Shukla, R. Muñoz-Carpena y B. Robson, «Evaluating, Interpreting, and Communicating Performance of Hydrologic/Water Quality Models Considering Intended use: A Review and Recommendations,» *Environmental Modelling & Software*, vol. 57, 7 2014.
- [195] R. Harmel, P. Smith y K. Migliaccio, «Modifying Goodness-of-Fit Indicators to Incorporate Both Measurement and Model Uncertainty in Model Calibration and Validation,» *Transactions of the ASABE*, vol. 53, 1 2010.
- [196] R. D. Harmel y P. K. Smith, «Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit in hydrologic and water quality modeling,» *Journal of Hydrology*, vol. 337, pp. 326-336, 2007.
- [197] G. V. Glass, «Primary, Secondary, and Meta-Analysis of Research,» *Educational Researcher*, vol. 5, pp. 3-8, 1976.

- [198] J. E. Hunter, F. L. Schmidt y G. B. Jackson, «Meta-Analysis: Cumulating Research Findings Across Studies Sage Publications: Beverly Hills, 1982, 176 pp.,» *Educational Researcher*, vol. 15, pp. 20-21, 1986.
- [199] M. Hunt, *How Science Takes Stock: The Story of Meta-Analysis*, Russell Sage Foundation, 1997.
- [200] L. C. Lyons, «Meta-analysis: Methods of accumulating results across research domains,» *Retrieved February*, vol. 6, p. 2002, 1998.
- [201] E. Servat y A. Dezetter, «Selection of Calibration Objective Functions in the Context of Rainfall-Runoff Modeling in a Sudanese Savannah Area,» *Hydrological Sciences Journal*, vol. 36, pp. 307-330, 8 1991.
- [202] R. W. Zeckoski, M. Smolen, D. Moriasi, J. Frankenberger y G. W. Feyereisen, «Hydrologic and water quality terminology as applied to modeling,» *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, vol. 58, pp. 1619-1635, 1 2015.
- [203] S. Sorooshian, «Surface water hydrology: On-line estimation,» *Reviews of Geophysics*, vol. 21, pp. 706-721, 1983.
- [204] C. Zheng, M. Hill, G. Cao y R. Ma, «MT3DMS: Model use, calibration, and validation,» *Transactions of the ASABE*, vol. 55, pp. 1549-1559, 7 2012.
- [205] J. C. Refsgaard, «Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models,» *Journal of Hydrology*, vol. 198, pp. 69-97, 1997.
- [206] EPA, «Guidance for Quality Assurance Project Plans,» *Environmental Protection Agency*, pp. 1-58, 2002.
- [207] V. KLEMEŠ, «Operational testing of hydrological simulation models,» *Hydrological Sciences Journal*, vol. 31, pp. 13-24, 1986.

- [208] R. Serra i Rotés, «L'embassament de la Baells (Berguedà): la transformació d'un paisatge natural i cultural,» de *NATURA I CULTURA AL PIRINEU 12es Trobades Culturals Pirinenques*, 2016.
- [209] J. Romero Sabí, L. Perona Ribés, M. Santandreu Viaplana, DIBA, G. Gascón Picallo, J. Solsona Bernades, B. Iglesias Álvarez, E. Soler García de Oteyza, M. Fuguet Martí, K. Quiroz Sierra, I. Jansana, X. Irigoyen, M. Anglarill Pérez y A. Torrella Reñé, «Pla Especial de l'Embassament de la Baells,» 2018.
- [210] ACA, «Perfil de zona de bany continental - Embassament de la Baells,» pp. 1-10, 2010.
- [211] ACA, «ACA - Consulta de Dades,» [En línea]. Available: <http://aca.gencat.cat/ca/laigua/consulta-de-dades/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [212] TEXAS A&M UNIVERSITY - AGRILIFE RESEARCH, USDA - Agricultural Research Service, [En línea]. Available: [https://swat.tamu.edu/media/90112/swat-calibration-techniques\\_slides.pdf](https://swat.tamu.edu/media/90112/swat-calibration-techniques_slides.pdf). [Último acceso: 05 Mayo 2022].
- [213] 2W2E GmbH - Water Weather Energy Ecosystem, «SWAT-CUP,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.2w2e.com/home/SwatCup>. [Último acceso: 05 Abril 2022].
- [214] D. Nguyen Khoi y V. Thi Thom, «Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in a river catchment of Vietnam,» *Global Ecology and Conservation*, nº 4, pp. 538-548, 13 Octubre 2015.
- [215] F. Zhao, Y. Wu, L. Qiu, Y. Sun, L. Sun, Q. Li, J. Niu y G. Wang, «Parameter Uncertainty Analysis of the SWAT Model in a Mountain-Loess Transitional Watershed on the Chinese Loess Plateau,» *Water*, vol. 10, nº 6, p. 690, 25 Mayo 2018.
- [216] D. W. Wolfe, R. M. Gifford, D. Hilbert y Y. Luo, «Integration of photosynthetic acclimation to CO<sub>2</sub> at the whole-plant level,» *Global Change Biology*, vol. 4, nº 8, pp. 879-893, 4 Enero 1998.

- [217] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2021 - The Physical Science Basis - Summary for Policymakers*, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021.
- [218] Y. Wu, S. Liu y O. I. Abdul-Aziz, «Hydrological effects of the increased CO<sub>2</sub> and climate change in the Upper Mississippi River Basin using a modified SWAT,» *Climatic Change*, Vols. %1 de %23-4, nº 110, pp. 977-1003, 2012.
- [219] USDA Soil Science Division Staff, *Soil Survey Manual*, vol. 18, 2017.
- [220] FAO - IUSS Working Group WRB, *World reference base for soil resources 2014*, vol. 106, 2015.
- [221] United Nations University, «Europe/Asia Soil Maps - Global data SWAT,» UN, [En línea]. Available: [https://swat.tamu.edu/media/116408/ea\\_soil.zip](https://swat.tamu.edu/media/116408/ea_soil.zip). [Último acceso: 10 04 2022].
- [222] TEXAS A&M UNIVERSITY - AGRILIFE RESEARCH, USDA - Agricultural Research Service, «QSWAT,» 2019. [En línea]. Available: <https://swat.tamu.edu/software/qswat/>. [Último acceso: 10 02 2022].
- [223] H. Sellami, I. La Jeunesse, S. Benabdallah y M. Vanclooster, «Parameter and rating curve uncertainty propagation analysis of the SWAT model for two small Mediterranean catchments,» *Hydrological Sciences Journal*, vol. 58, nº 8, pp. 1635-1657, 2013.
- [224] A. Malagò, O. Vigiak, F. Bouraoui y M. Franchini, «The impact of Hillslope Length parameter on SWAT streamflow prediction in the Upper Danube. In Conference Proceedings: Danube Conference 2014, Bridging the sciences - crossing the borders.,» *XXVI Conference of the Danubian Countries -Conference 2014*, pp. 113-116, 2014.
- [225] J. Senent-Aparicio, J. Pérez-Sánchez, J. Carrillo-García y J. Soto, «Using SWAT and Fuzzy TOPSIS to Assess the Impact of Climate Change in the Headwaters of the Segura River Basin (SE Spain),» *Water*, vol. 2, nº 9, p. 149, 2017.
- [226] G. Salmoral, B. A. Willaarts, P. A. Troch y A. Garrido, «Drivers influencing streamflow



- changes in the Upper Turia basin, Spain,» *Science of the Total Environment*, vol. 258, nº 68, pp. 503-504, 2015.
- [227] G. Salmoral Portillo, Implications of agricultural production, policy and land use changes on water resource assessment (Tesis doctoral), Madrid: ETSIAM-UPM, 2014.
- [228] A. M. Epelde Beraza, Modelización de procesos hidrológicos y de contaminación por nitratos mediante dos códigos numéricos (SWAT y MOHID). Cuenca agrícola del río Alegría (País Vasco) (Tesis Doctoral), Leioa: Universidad del País Vasco, 2015.
- [229] J. Schuol y K. C. Abbaspour, «Calibration and Uncertainty Issues of a Hydrological Model (SWAT) Applied to West Africa.,» *Advances in Geosciences*, nº 9, pp. 137-143, 2006.
- [230] A. Irvem y A. El-Sadek, «Evaluation of Streamflow Simulation By SWAT Model for The Seyhan River,» *Çukurova J. Agric. Food Sci.*, vol. 2, nº 33, pp. 99-110, 2018.
- [231] S. G. Setegn, R. Srinivasan y B. Dargahi, «Hydrological Modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia Using SWAT Model.,» *The Open Hydrology Journal*, nº 2, pp. 49-62, 2008.
- [232] L. L. Moreira, D. Schwamback y D. Rigo, «Sensitivity analysis of the Soil and Water Assessment Tools (SWAT) model in streamflow modeling in a rural river basin,» *Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas*, vol. 13, nº 6, 2018.
- [233] K. Khalid, M. F. Ali, N. F. Abd Rahman, M. R. Mispan, S. H. Haron, Z. Othman y M. F. Bachok, «Sensitivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm,» *Procedia Engineering*, nº 162, pp. 441-447, 2016.
- [234] B. Narsimlu, A. Gosain y B. Chahar, «Assessment of Future Climate Change Impacts on Water Resources of Upper Sind River Basin, India Using SWAT Model,» *Water Resources Management: An International Journal, Published for the European Water Resources Association (EWRA)*, vol. 27, nº 10, pp. 3647-3662, 2013.
- [235] W. Francesconi, R. Srinivasan, E. Pérez-Miñana, S. P. Willcock y M. Quintero, «Using the

- Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review,» *Journal of Hydrology*, vol. 535, pp. 625-636, 04 2016.
- [236] Y. Yuan, W. Nie y E. Sanders, «PROBLEMS AND PROSPECTS OF SWAT MODEL APPLICATION ON AN ARID/SEMIARID WATERSHED IN ARIZONA,» de *SEDHYD 2014 Joint Conference, March 23 - 27, 2014.*, Reno, NV, 2015.
- [237] M. Sahu, S. Lahari, A. K. Gosain y A. Ohri, «Hydrological Modeling of Mahi Basin Using SWAT,» *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*, vol. 5, nº 3, pp. 68-79, 09 2016.
- [238] N. Shivhare, P. K. Singh Dikshit y S. B. Dwivedi, «A Comparison of SWAT Model Calibration Techniques for Hydrological Modeling in the Ganga River Watershed,» *Engineering*, nº 4, pp. 643-652, 2018.
- [239] N. Shivhare, P. K. Singh Dikshit y S. B. Dwivedi, «Corrigendum to “A Comparison of SWAT Model Calibration Techniques for Hydrological Modeling in Ganga River Watershed” [Engineering 4 (2018) 643–652],» *Engineering*, nº 5, p. 181, 2015.
- [240] S. K. Himanshu, A. Pandey y P. Shrestha, «Application of SWAT in an Indian River Basin for Modeling Runoff, Sediment and Water Balance.,» *Environ Earth Sci*, nº 3, p. 76, 2016.
- [241] L. T. Ha, W. G. Bastiaanssen, A. van Griensven, A. I. J. M. van Dijk y G. B. Senay, «SWAT-CUP for Calibration of Spatially Distributed Hydrological Processes and Ecosystem Services in a Vietnamese River Basin Using Remote Sensing,» *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2017.
- [242] G. G. Tamayo García, Evaluación de los caudales líquidos y de producción de sedimentos estimados con el modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT) y su relación con los caudales líquidos y sólidos observados, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [243] D. Waidler, «Conservation Practice Modeling,» Texas AgriLife Research, 2009.
- [244] R. Arias, M.-L. Rodríguez-Blanco, M. M. Taboada-Castro, J. P. Nunes, J. J. Keizer y M. T. Taboada-Castro, «Water Resources Response to Changes in Temperature, Rainfall and

- CO2 Concentration: A First Approach in NW Spain,» *Water*, nº 6, pp. 3049-3067, 2014.
- [245] E. P. Querner y M. Zanen, Modelling water quantity and quality using SWAT : a case study in the Limpopo River basin, South Africa, vol. 2405, Alterra: Wageningen, 2013.
- [246] G. T. Ayele, E. Z. Teshale, B. Yu, I. D. Rutherford y J. Jeong, «Streamflow and Sediment Yield Prediction for Watershed Priorization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia,» *Water*, vol. 9, nº 782, 10 2017.
- [247] K. C. Abbaspour, S. A. Vaghefi y R. Srinivasan, «A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference,» *Water*, vol. 1, nº 10, p. 6, 2018.
- [248] OFC, «INDICADORS - Catalunya, un país de boscos.,» Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya, 2018. [En línea]. Available: <http://www.observatoriforestal.cat/resum-del-sector/>. [Último acceso: 24 09 2019].
- [249] M. Lindner, M. Maroschek, S. Netherer, A. Kremer, A. Barbati, J. Garcia-Gonzalo, R. Seidl, S. Delzon, P. Corona, M. Kolström, M. Lexer y M. Marchetti, «Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems,» *Forest Ecology and Management*, vol. 259, pp. 698-709, 02 2010.
- [250] D. N. Moriasi, P. Naresh, J. L. Steiner, P. H. Gowda, M. Winchell, H. Rathjens, P. J. Starks y J. A. Verser, «SWAT-LUT: A Desktop Graphical User Interface for Updating Land Use in SWAT,» *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 55, nº 5, pp. 1102-1115, 3 09 2019.
- [251] D. Moriasi y V. Alan, «SWAT-LUT - Download : USDA ARS,» USDA ARS, 02 05 2016. [En línea]. Available: <https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=SWAT-LUT&modecode=30-70-05-00>. [Último acceso: 22 06 2022].
- [252] H. Kling, M. Fuchs y M. Paulin, «Runoff conditions in the upper Danube basin under an

- ensemble of climate change scenarios,» *Journal of Hydrology*, vol. 424, nº 425, pp. 264-277, 2012.
- [253] D. Biondi, G. Freni, V. Iacobellis, G. Mascaro y A. Montanari, «Validation of hydrological models: Conceptual basis, methodological approaches and a proposal for a code of practice,» *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 42, nº 44, pp. 70-76, 2012.
- [254] C. Purcell, S. P. Batke, R. Caballero, W. K. Soh, M. Murray y J. C. McElwain, «Increasing stomatal conductance in response to rising atmospheric CO<sub>2</sub>,» *Annals of Botany*, vol. 121, nº 7, p. 1427, 08 06 2018.
- [255] Diputació de Barcelona - Oficina Tècnica de Planificació i Anàlisi Territorial , «Descàrrega "CS08000\_A56 - Mapa de Cobertes del Sòl de 1956" (Visor SITMUN - Consulta Provincial),» 10 03 2014. [En línea]. Available: <https://sitmun.diba.cat/sitmun2/visor.jsp?app=2&ter=1>. [Último acceso: 11 07 2022].
- [256] Instituto Geográfico Nacional (IGN), «Descarga "Ortofotos AMS (B) 1956-1957" - PNOA-IGN,» 1957. [En línea]. Available: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/busquedaSerie.do?codSerie=VAMSB>. [Último acceso: 11 07 2022].
- [257] R. De Queiroga Miranda, J. Domiciano Galvíncio, M. S. Beserra de Moura y R. Srinivasan, «Paralelização do algoritmo SUFI2: Uma abordagem Windows,» *Revista Brasileira de Geografia Física*, vol. 10, nº 05, pp. 1535-1544, 2017.
- [258] Y. Bouslih, A. Rochdi, N. El Amrani Paaza y L. Liuzzo, «Understanding the effects of soil data quality on SWAT model performance and hydrological processes in Tamedroust watershed (Morocco),» *Journal of African Earth Sciences*, vol. 160, 2019.
- [259] H. Oruc, M. Çelen, F. Gülgen, M. Salim Öncel, S. Vural y B. Kılıç, «Sensitivity of the SWAT Model to Soil Data Parameterization; Case Study in Saz - Çayırova Stream, Turkey,» de *5th EurAsia Waste Management Symposium*, Istanbul, 2020.

- [260] X. Ye, Q. Zhang y V. R. N., «The effect of soil data resolution on hydrological processes modelling in a large humid watershed,» *Hydrological Processes*, vol. 25, nº 1, pp. 130-140, 2011.
- [261] F. Yang, G.-L. Zhang, J.-L. Yang, D.-C. Li, Y.-G. Zhao, F. Liu, R.-M. Yang y F. Yang, «Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes,» *Journal of Hydrology*, vol. 519, pp. 3086-3093, 2014.
- [262] K. J. Ankenbauer y S. P. Loheide, «The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA,» *Hydrological Processes*, vol. 31, nº 4, pp. 891-901, 2017.
- [263] S. Schütte, R. E. Schulze y M. Scholes, «Impacts of soil carbon on hydrological responses - a sensitivity study of scenarios across diverse climatic zones in South Africa,» *South African Journal of Science*, vol. 117, nº 5-6, 2021.
- [264] H. Sellami, I. La Jeuness, S. Benabdallah, N. Baghdadi y M. Vancloster, «Uncertainty analysis in model parameters regionalization: a case study involving the SWAT model in Mediterranean catchments (Southern France),» *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 18, nº 6, p. 2393–2413, 2014.
- [265] K. M. Gunn, A. R. Buda, H. E. Preisendanz, R. Cibin, C. D. Kennedy y T. L. Veith, «Integrating Daily CO<sub>2</sub> Concentrations in SWAT-VSA to Examine Climate Change Impacts on Hydrology in a Karst Watershed,» *Transactions of the ASABE*, vol. 64, nº 4, pp. 1303-1308, 2021.
- [266] S. Herrera García y J. Fernández Fernández, «Desarrollo, validación y aplicaciones de Spain02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitaciones y temperatura en España,» *Santander Meteorology Group*, p. 124, 2011.



# **Anejo C**

## **Configuración de SWAT-CUP**

## Sumario

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>  | <b>3</b>  |
| <b>SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS</b>   | <b>4</b>  |
| <b>1. INSTALACIÓN</b>   | <b>5</b>  |
| 1.1. SWAT-CUP 2019 5.2.1  | 5         |
| <b>2. CONFIGURACIÓN</b>   | <b>6</b>  |
| 2.1. Crear proyecto SWAT-CUP  | 6         |
| 2.2. Configurar la iteración  | 7         |
| 2.2.1. Configuración de los parámetros a modificar y del número de simulaciones   | 7         |
| 2.2.2. Comprobar que los datos sobre los periodos de calentamiento y de calibración o validación sean correctos   | 9         |
| 2.2.3. Introducción de los valores observados   | 12        |
| 2.2.4. Configuración de la extracción de datos de las simulaciones  | 13        |
| 2.2.5. Configuración de la función objetivo de la calibración   | 15        |
| 2.3. Correr la iteración  | 17        |
| <b>3. CONSULTA DE LOS DATOS</b>   | <b>19</b> |
| 3.1. Rango de valores aceptables para los diferentes parámetros   | 19        |
| 3.2. Outputs de las iteraciones   | 20        |
| 3.2.1. 95PPU plot - Gráfica comparativa de las series temporales de caudales observados, caudales simulados por la mejor simulación y representación gráfica del intervalo de confianza “95PPU” de la iteración | 20        |
| 3.2.2. Dotty Plots –Gráficos con la respuesta en la función objetivo de los parámetros modificados a las modificaciones realizadas en su valor.   | 21        |
| 3.2.3. Best_Par.txt – valores de modificación de los parámetros con el mejor comportamiento en base a la función objetivo   | 22        |
| 3.2.4. Best_Sim.txt – Valores observados y valores de salida para la mejor simulación de la iteración   | 23        |
| 3.2.5. Rango de valores aceptables para los diferentes parámetros   | 24        |
| 3.2.6. Summary_Stat.txt – Compendio de estadísticos descriptivos del comportamiento del modelo para la mejor simulación de la iteración   | 25        |



|  |           |
|--|-----------|
| 3.2.7. Global sensitivity – Sensibilidad del modelo respecto a la modificación de cada uno de los parámetros modificados en la iteración ..... | 26        |
| 3.2.8. Otros.....  | 28        |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....  | <b>29</b> |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 2-1 Ventanas de SWAT-CUP para crear nuevo proyecto. _____   | 7  |
| Figura 2-2 Ventanas de SWAT-CUP para configurar los parámetros y el número de simulaciones. _____  | 9  |
| Figura 2-3 Localización del archivo File.Cio en SWAT-CUP 2019 5.2.1. _____   | 9  |
| Figura 2-4 Ventanas de SWAT-CUP para introducir los valores observados. _____  | 12 |
| Figura 2-5 Ventanas de SWAT-CUP para configurar la extracción de datos de las simulaciones. _____  | 15 |
| Figura 2-6 Ventanas de SWAT-CUP para configurar la función objetivo de la calibración. _____   | 17 |
| Figura 2-7 Ventanas de SWAT-CUP para correr y guardar la iteración. _____  | 18 |
| Figura 3-1 Localización del compendio “Absolute_SWAT_Values.txt” con los rangos de valores posibles de diferentes parámetros de SWAT en SWAT-CUP 2019 5.2.1. _____ | 19 |
| Figura 3-2 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“95ppu plot”). _____   | 20 |
| Figura 3-3 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Dotty Plots”). _____  | 21 |
| Figura 3-4 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Best_Pat.txt”). _____   | 22 |
| Figura 3-5 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Best_Sim.txt”). _____   | 23 |
| Figura 3-6 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“New_pars.txt”). _____   | 24 |
| Figura 3-7 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Summary_Stat”). _____   | 25 |
| Figura 3-8 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Global Sensivity – Graph View”). _____  | 26 |
| Figura 3-9 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Global Sensivity – Grid View”). _____   | 27 |

## Símbolos y acrónimos

PEC Performance Evaluation Criteria (criterios de evaluación del comportamiento)

SWAT Soil and Water Assessment Tool

# 1. Instalación

## 1.1. SWAT-CUP 2019 5.2.1

Se descarga SWAT-CUP 2019 5.2.1 desde <https://swat.tamu.edu/software/swat-cup/> y se procede a su instalación una vez descargado. Se utiliza la configuración por defecto.

## 2. Configuración

A continuación se muestra el proceso de configuración seguido. En el Manual de Usuario de SWAT-CUP [1] se profundiza más en este asunto.

### 2.1. Crear proyecto SWAT-CUP

Una vez abierto SWAT-CUP 2019 5.2.1, en la Figura 2-1 se puede ver cómo se procede:

1. 2. 3. Se clicla en los tres puntos de colores, y se aprieta “New” en el desplegable que aparece (si se quisiera abrir un proyecto ya creado en vez de crearlo, se apretaría “Open”. A continuación se aprieta “Next” en la ventana aparecida “Welcome to the SWAT-CUP Project creation Wizard”.
4. 5. En la ventana “Import a swat TxtInOut directory” se selecciona la carpeta “TxTInOut” del proyecto QSWAT a calibrar y validar y se aprieta “Next”.
6. 7. 8. 9. 10. En la ventana “SWAT Version”, se selecciona la versión de SWAT del desplegable “SWAT Version”, en este caso, 2012, y a continuación se selecciona la arquitectura del procesador (“Procesor Architecture”) del desplegable que aparece, 64 bits en el hardware utilizado para este estudio. A continuación se aprieta “Next”.
11. 12. 13 En la ventana “Project type” se selecciona el método de calibración a utilizar del desplegable que aparece, Sufi2 para este estudio (en la memoria se argumenta el porqué). A continuación se aprieta a “Next”.
14. 15. 16. En la ventana “Project Name and Location” se le da un nombre al proyecto, se selecciona la carpeta en la que guardar el proyecto, y se aprieta en finalizar, apareciendo una ventanita que indica que se están copiando los datos del proyecto SWAT en la carpeta indicada.

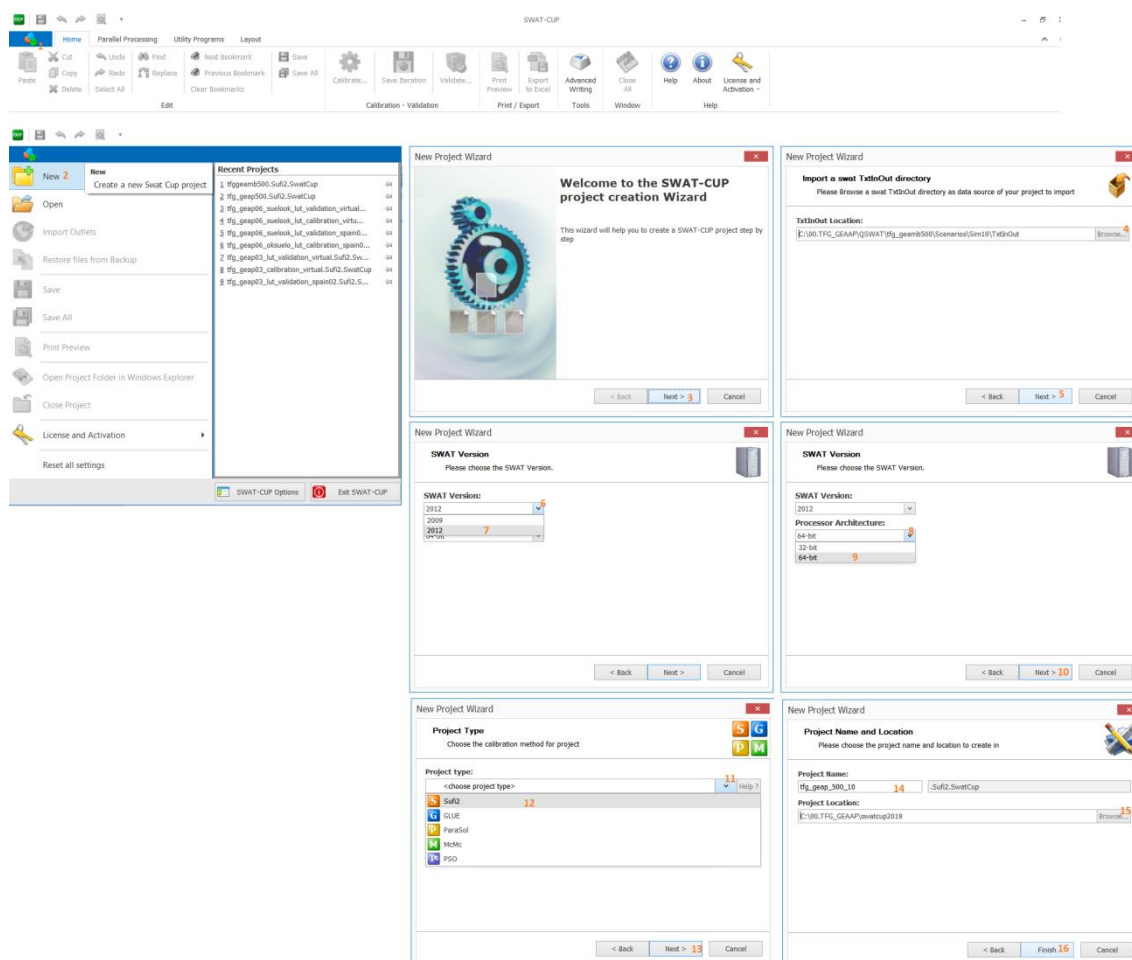


Figura 2-1 Ventanas de SWAT-CUP para crear nuevo proyecto.

## 2.2. Configurar la iteración

### 2.2.1. Configuración de los parámetros a modificar y del número de simulaciones

En la Figura 2-2 se puede ver cómo se procede para configurar los parámetros a modificar y el número de simulaciones a realizar:

1. Abrir el árbol del proyecto.
2. Abrir el árbol de configuración de la calibración “Calibration Inputs”.
3. Abrir “Par\_inf.txt”
4. Indicar el número de parámetros a modificar. 4.1 y 4.2 Opcionalmente, si los parámetros fueran erróneos, clicar con botón derecho del ratón sobre el parámetros y apretar eliminar “Delete” (si se utiliza la versión “Form\_view”) o borrar la línea del parámetro directamente (si se utiliza la versión “Text\_view”).
5. Indicar el número de simulaciones a realizar.

6. 7. 8. 9. 10. Cambiar a la versión "Form View" si no se estaba en ella, y apretar en añadir nuevo parámetro "Add a new parameter" si faltara algún parámetro. Buscar el parámetro en la barra de búsqueda "Parameter Name" del "Parameter Browser", seleccionarlo y aceptar.
11. Modificar el tipo de variación de cada parámetro, eligiendo entre relativo ("Relative" o "r", que consiste en multiplicar el valor inicial del parámetro por 1 más el valor probado en la simulación correspondiente, reemplazo ("Replace" o "v", que consiste en substituir el valor inicial del parámetro otro número dentro del rango de variación o suma ("Absolute" o "a", que consiste en sumarle al valor inicial del parámetro el valor probado en la simulación correspondiente).
12. Modificar el umbral inferior del rango de variación de cada parámetro.
13. Modificar el umbral superior del rango de variación de cada parámetro.
14. Guardar las modificaciones realizadas.
15. Abrir "Sufi2\_swEdit.def"
16. Comprobar que el valor de la simulación final coincida con el número de simulaciones configurado anteriormente en "Par\_inf.txt", y en caso contrario, modificarlo.
17. 17bis. 18. Si se van a realizar 20 o menos simulaciones, es interesante activar el proceso en paralelo "Parallel processing" (solo permite 20 simulaciones si no se ha comprado el paquete correspondiente) ya que se produce un ahorro bastante importante de tiempo. Se puede modificar el número de procesadores que van a trabajar.
19. Guardar las modificaciones realizadas.

En el caso de querer hacer una simulación con el modelo sin calibrar, se configura un solo parámetro, con una variación relativa, un umbral inferior de variación de 0 y un umbral superior de 0, de modo que no habrá modificación real del parámetro, al multiplicarse este por 1.

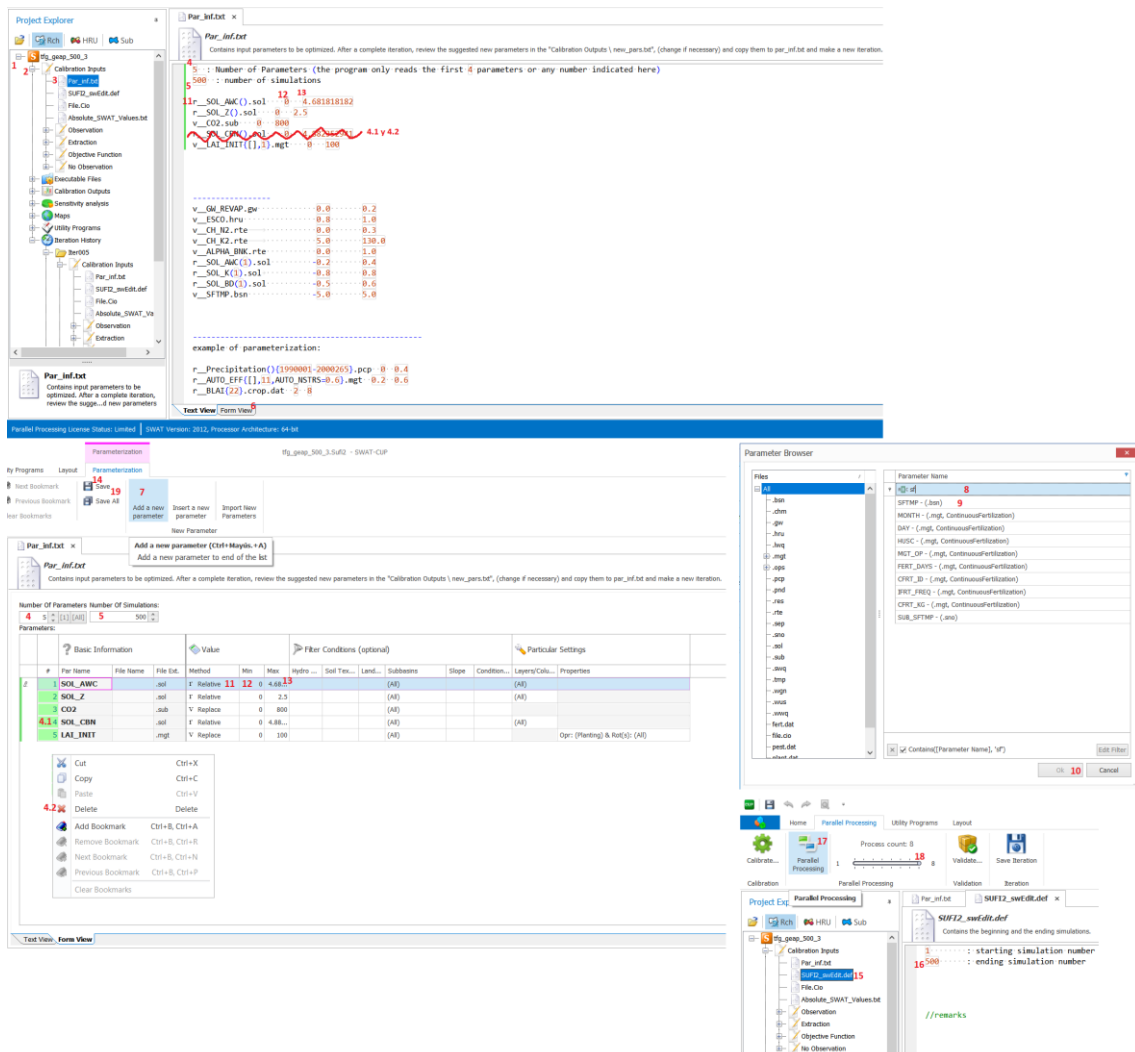


Figura 2-2 Ventanas de SWAT-CUP para configurar los parámetros y el número de simulaciones.

### 2.2.2. Comprobar que los datos sobre los periodos de calentamiento y de calibración o validación sean correctos

Para comprobar que los datos sobre los periodos de calentamiento y de calibración o validación sean correctos se tiene que observar el archivo “File.Cio” (ver Figura 2-3).



Figura 2-3 Localización del archivo File.Cio en SWAT-CUP 2019 5.2.1.



A continuación se muestra un ejemplo del contenido de este archivo y se indica marcándolo en color amarillo los valores en los que fijarse especialmente:

Master Watershed File: file.cio

Project Description:

General Input/Output section (file.cio):

2022-05-28 00:00:00 ARCGIS-SWAT interface AV

General Information/Watershed Configuration:

fig.fig

|             |       |  |   |
|-------------|-------|--|---|
|             | 24    |  | NBYR : Number of years simulated                        |
|             | 1976  |  | IYR : Beginning year of simulation                      |
|             | 1     |  | IDAF : Beginning julian day of simulation               |
|             | 365   |  | IDAL : Ending julian day of simulation                  |
| Climate:    |       |  |   |
|             | 0     |  | IGEN : Random number seed cycle code                    |
|             | 1     |  | PCPSIM : precipitation simulation code: 1=measured,     |
| 2=simulated |       |  |   |
|             | 0     |  | IDT : Rainfall data time step                           |
|             | 0     |  | IDIST : rainfall distribution code: 0 skewed, 1         |
| exponential |       |  |   |
|             | 1.300 |  | REXP : Exponent for IDIST=1                             |
|             | 1     |  | NRGAGE: number of pcp files used in simulation          |
|             | 27    |  | NRTOT: number of precip gage records used in simulation |
|             | 27    |  | NRGFIL: number of gage records in each pcp file         |
|             | 1     |  | TMPSIM: temperature simulation code: 1=measured,        |
| 2=simulated |       |  |   |
|             | 1     |  | NTGAGE: number of tmp files used in simulation          |
|             | 27    |  | NTTOT: number of temp gage records used in simulation   |
|             | 27    |  | NTGFIL: number of gage records in each tmp file         |
|             | 1     |  | SLRSIM : Solar radiation simulation Code: 1=measured,   |
| 2=simulated |       |  |   |
|             | 27    |  | NSTOT: number of solar radiation records in slr file    |
|             | 1     |  | RHSIM : relative humidity simulation code: 1=measured,  |
| 2=simulated |       |  |   |
|             | 27    |  | NHTOT: number of relative humidity records in hmd file  |
|             | 1     |  | WINDSIM : Windspeed simulation code: 1=measured,        |
| 2=simulated |       |  |   |
|             | 27    |  | NWTOT: number of wind speed records in wnd file         |
|             | 0     |  | FCSTYR: beginning year of forecast period               |
|             | 0     |  | FCSTDAY: beginning julian date of forecast period       |
|             | 0     |  | FCSTCYCLES: number of time to simulate forecast period  |

Precipitation Files:

pcp1.pcp

Temperature Files:

tmp1.tmp

slr.slr

| SLRFILE: name of solar radiation file

hmd.hmd

| RHFILE: name of relative humidity file

```

wnd.wnd          | WNDFILE: name of wind speed file
cst.cst          | FCSTFILE: name of forecast data file
Watershed Modeling Options:
basins.bsn       | BSNFILE: name of basin input file
Database Files:
plant.dat        | PLANTDB: name of plant growth database file
till.dat         | TILLDB: name of tillage database file
pest.dat         | PESTDB: name of pesticide database file
fert.dat         | FERTDB: name of fertilizer database file
urban.dat        | URBANDB: name of urban database file
Special Projects:
0               | ISPROJ: special project: 1=repeat simulation
0               | ICLB: auto-calibration option: 0=no, 1=yes
                | CALFILE: auto-calibration parameter file
Output Information:
0               | IPRINT: print code (month, day, year)
12              | NYSKIP: number of years to skip output
printing/summarization
0               | ILOG: streamflow print code: 1=print log of streamflow
0               | IPRP: print code for output.pst file: 1= print
pesticide output
Starting Output Variable Section
Reach output variables:
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0
Subbasin output variables:
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
HRU output variables:
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0
HRU data to be printed:
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0
ATMOSPHERIC DEPOSITION
ATMO.ATM
0               | IPHR: print code for hourly output 0=no 1=yes
(hourq.out)
0               | ISTO: print code for soil storage 0=no 1=yes
(output.swr)
0               | ISOL: Code for printing phosphorus/nitrogen in soil
profile (output.snu)
0               | I_SUBW: Code for routing headwaters
septwq.dat
0               | IA_B: Code for binary output of files (.rch, .sub, .hru
files only)
0               | IHUMUS: Print watqual.out file 0=no 1=yes (output.wql)
0               | ITEMP: 0=print no file(s) 1=print output.vel/output.dep
0               | ISNOW: 0=do not print snowband.out; 1=print output.snw
0               | IMGT: 0=do not print output.mtg; 1=print output.mgt
0               | IWTR: Code for printing output.pot and output.wtr files
0               | ICALEN: Code for printing out calendar or julian dates
to .rch, .sub and .hru files

```

### 2.2.3. Introducción de los valores observados

En la Figura 2-4 se puede ver cómo se procede para introducir los valores observados en SWAT-CUP:

1. 2. Abrir el apartado “Observation” del árbol de contenidos de SWAT-CUP y apretar sobre “Observation”.
3. Apretar sobre “Rch” para que se active “Observed\_rch.txt”.
4. Abrir “Observed\_rch.txt”.
5. Modificar el número de variables observadas al número correcto, en el presente estudio 1, el caudal. Si, por ejemplo, se mirara los sedimentos también, pues serían 2.
6. Modificar “FLOW\_OUT\_XX” con el número de la subcuenca a la que corresponde el caudal de salida introducido, en el presente estudio, la subcuenca de cierre de la cuenca de estudio es la 27, por lo tanto, sería “FLOW\_OUT\_27”.
7. Modificar con el número de datos observados de los que se dispone para el periodo a simular. En el presente proyecto, al tratarse de valores mensuales, y tener un periodo de calibración de 12 años y uno de validación de 10 años, este valor sería 144 o 120 respectivamente.
8. Introducir los datos observados con el formato: “Nº mes desde el inicio del periodo (sin contar el calentamiento)” “FLOW\_OUT\_mes\_año” “caudal en m<sup>3</sup>/s (media mensual)”.
9. Apretar Ctrl+Mayúscula+S para guardar las modificaciones.

Todas las demás líneas se borran. Podría haber un punto intermedio de aforo con datos de caudal que se quisiera aprovechar para calibrar el modelo, en tal caso se introduciría otro paquete de datos encabezados por “FLOW\_OUT\_subcuenca que correspondiera” de la misma manera.



Figura 2-4 Ventanas de SWAT-CUP para introducir los valores observados.

A continuación se expone una muestra del contenido del archivo “Observed\_rch.txt” marcando con color amarillo los valores modificados:

1 : number of observed variables

FLOW\_OUT\_27 : this is the name of the variable and the subbasin number to be included in the objective function

144 : number of data points for this variable as it follows below. First column is a sequential number from beginning

: of the simulation, second column is variable name and date (format arbitrary), third column is variable value.

|     |                  |             |
|-----|------------------|-------------|
| 1   | FLOW_OUT_1_1988  | 11.21880645 |
| 2   | FLOW_OUT_2_1988  | 4.572206897 |
| 3   | FLOW_OUT_3_1988  | 3.17116129  |
| ... |                  |             |
| ... |                  |             |
| ... |                  |             |
| 142 | FLOW_OUT_10_1999 | 7.53        |
| 143 | FLOW_OUT_11_1999 | 12.9694     |
| 144 | FLOW_OUT_12_1999 | 4.926935484 |

#### 2.2.4. Configuración de la extracción de datos de las simulaciones

En la Figura 2-5 se puede ver cómo se procede para configurar los datos a extraer de las simulaciones:

2. Abrir el apartado “Extraction” del árbol de contenidos de SWAT-CUP y apretar sobre “Var\_file\_rch.txt”.
3. Modificar “FLOW\_OUT\_xx” con el número de la subcuenca que corresponda al caudal de salida observado para poder comparar los valores observados y simulados, en el caso de estudio, la subcuenca 27, por lo tanto, “FLOW\_OUT\_27”. Si hubiera más de un archivo nombrado, eliminarlos, dejando solo “FLOW\_OUT\_27”.
4. Abrir “SUF12\_extract\_rch\_def”.
5. Comprobar que el archivo de salida sea output.rch, borrar todos los demás.
6. Modificar el número de variables a extraer, en el caso de estudio, 1 variable, el caudal, por lo tanto 1.
7. Dejar únicamente el número de la columna correspondiente al caudal (“FLOW\_OUTcms”) en el archivo output.rch, 7.
8. Modificar con la cantidad total de subcuencas en la cuenca de estudio, 27.
9. Modificar con la cantidad de puntos en los que se observa el caudal, 1.
10. Modificar con el número de la subcuenca en la que se observa el caudal a su salida, 27.
11. Modificar con el año de inicio de la simulación (sin tener en cuenta el periodo de calentamiento).

12. Modificar con el año final de la simulación.
13. Comprobar que esté indicado correctamente que los valores son mensuales (2).

El resto de líneas se borraría y se apretaría Ctrl+Mayúscula+S para guardar las modificaciones realizadas. A continuación se muestra el contenido resultante de este archivo para el periodo de calibración marcando los valores modificados o a comprobar:

```

output.rch      : swat output file name
1              : number of variables to get
7              : variable column number(s) in the swat output file (as many as
the above number)

27             : total number of reaches (subbasins) in the project

1              : number of reaches (subbasins) to get for the first variable
27            : reach (subbasin) numbers for the first variable

1988           : beginning year of simulation not including the warm up
period
1999           : end year of simulation

2              : time step (1=daily, 2=monthly, 3=yearly)

```

The top screenshot shows the Project Explorer with the 'Var\_file\_rch.txt' file selected. The text editor displays the following content:

```

FLOW_OUT 27.txt
3

```

The bottom screenshot shows the Project Explorer with the 'SUF12\_extract\_rch.def' file selected. The text editor displays the following content:

```

5 output.rch ..... : swat output file name
6 1 .....          : number of variables to get
7 7 .....          : variable column number(s) in the swat output file (as many as the above number)
8 27 .....         : total number of reaches (subbasins) in the project
9 1 .....          : number of reaches (subbasins) to get for the first variable
10 27 .....        : reach (subbasin) numbers for the first variable
11 1988 .....      : beginning year of simulation not including the warm up period
12 1999 .....      : end year of simulation
13 2 .....         : time step (1=daily, 2=monthly, 3=yearly)

// Remarks

```

Figura 2-5 Ventanas de SWAT-CUP para configurar la extracción de datos de las simulaciones.

### 2.2.5. Configuración de la función objetivo de la calibración

En la Figura 2-6 se puede ver cómo se procede para configurar la función objetivo de la calibración:

2. Abrir el apartado “Objective Function” del árbol de contenidos de SWAT-CUP y apretar sobre “Observed.txt”.
3. Modificar para que el número de variables observadas sea correcto, 1, el caudal.
4. En este estudio se deja el valor 5 por defecto, correspondiente a NS (Nash-Sutcliffe Efficiency), ya que es el estadístico descriptivo más utilizado en los estudios consultados en el meta-análisis realizado sobre los estadísticos descriptivos utilizados para evaluar el comportamiento de modelos (ver Tabla 3-7 de la memoria), y además, según Servat and Dezzetter [2] se trata del estadístico que mejor refleja la adaptación general y, por otro lado, es uno de los estadísticos con PEC asociado entre los definidos por Moriasi et al. [3]
5. Modificar “FLOW\_OUT\_XX” con el número de la subcuenca a la que corresponde el caudal de salida introducido, en el presente estudio, la subcuenca de cierre de la cuenca de estudio es la 27, por lo tanto, sería “FLOW\_OUT\_27”.
6. Modificar con el número de datos observados de los que se dispone para el periodo a simular. En el presente proyecto, al tratarse de valores mensuales, y tener un periodo de calibración de 12 años y uno de validación de 10 años, este valor sería 144 o 120 respectivamente.
7. Introducir los datos observados con el formato: “Nº mes desde el inicio del periodo (sin contar el calentamiento)” “FLOW\_OUT\_mes\_año” “caudal en m<sup>3</sup>/s (media mensual)”.
8. Abrir “Var\_file\_name.txt”.
9. Modificar “FLOW\_OUT\_XX” con el número de la subcuenca que corresponda al caudal de salida observado para poder comparar los valores observados y simulados, en el caso de estudio, la subcuenca 27, por lo tanto, “FLOW\_OUT\_27”. Eliminar el resto de archivos nombrados, dejando solo “FLOW\_OUT\_27”.
10. Apretar Ctrl+Mayúscula+S para guardar las modificaciones.

A continuación se expone una muestra del contenido del archivo “Observed.txt” marcando con color amarillo los valores modificados o a tener especialmente en cuenta:

```
1      : number of observed variables
5      : Objective function type,
1=mult,2=sum,3=r2,4=chi2,5=NS,6=br2,7=ssqr,8=PBIAS,9=KGE,10=RSR,11=MNS
0.5    : min value of objective function threshold for the behavioral
solutions
1      : if objective function is 11=MNS (modified NS), indicate the power, p.
```

FLOW\_OUT\_27 : this is the name of the variable and the subbasin number to be included in the objective function

1 : weight of the variable in the objective function

-1 : Dynamic flow separation. Not considered if -1. If 1, then values should be added in the forth column below after observations

-1 : constant flow separation, threshold value. (not considered if -1)

1 : if separation of signal is considered, this is weight of the smaller values in the objective function

1 : if separation of signal is considered, this is weight of the larger values in the objective function

10 : percentage of measurement error

144 : number of data points for this variable as it follows below. First column is a sequential number from beginning

: of the simulation, second column is variable name and date (format arbitrary), third column is variable value.

|     |                  |             |
|-----|------------------|-------------|
| 1   | FLOW_OUT_1_1988  | 11.21880645 |
| 2   | FLOW_OUT_2_1988  | 4.572206897 |
| 3   | FLOW_OUT_3_1988  | 3.17116129  |
| ... |                  |             |
| ... |                  |             |
| ... |                  |             |
| 142 | FLOW_OUT_10_1999 | 7.53        |
| 143 | FLOW_OUT_11_1999 | 12.9694     |
| 144 | FLOW_OUT_12_1999 | 4.926935484 |

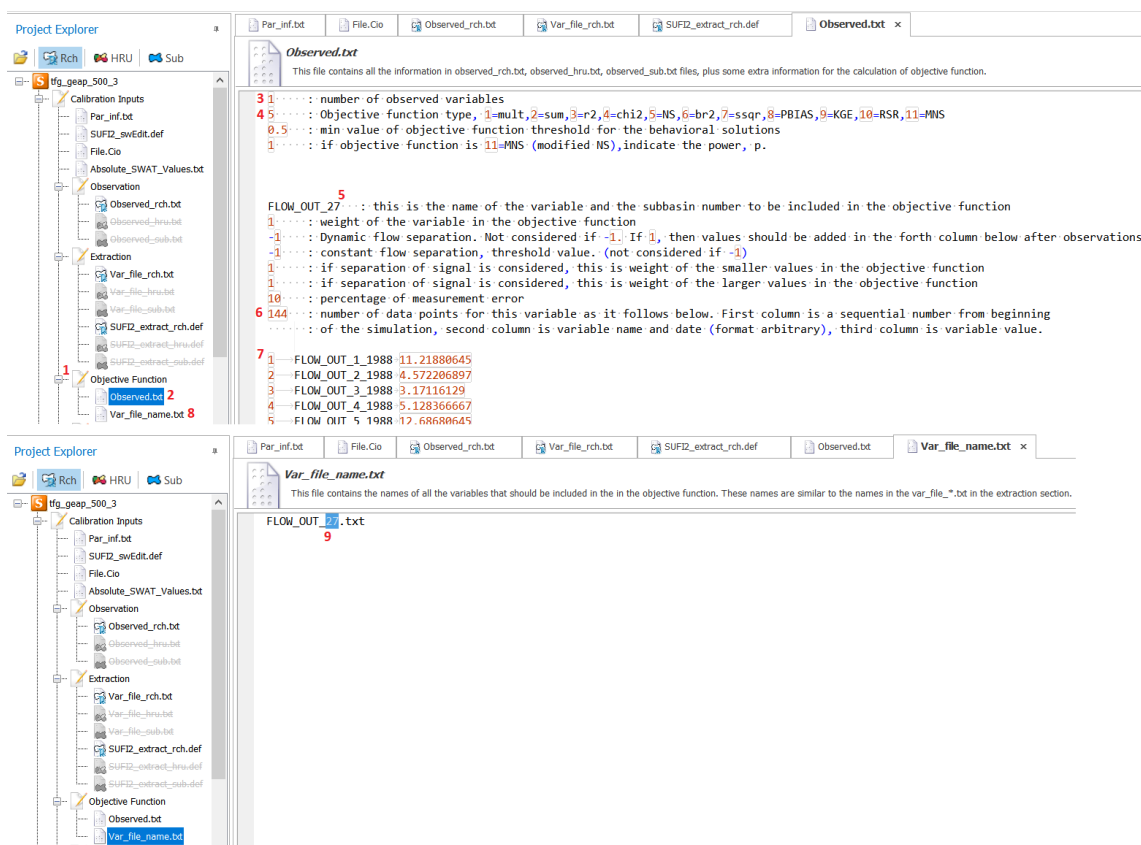


Figura 2-6 Ventanas de SWAT-CUP para configurar la función objetivo de la calibración.

## 2.3. Correr la iteración

Una vez configurada la iteración, esta se corre. En la Figura 2-7 se puede ver cómo se procede:

1. 2. Se aprieta en Home/Calibrate (F5), y se aprieta en ejecutar todo ("Execute all").
3. Se escribe "s" y se aprieta Enter.
4. 5. 6. 7. Se aceptan las ventanas emergentes.
8. Se acepta guardar la iteración.
9. 10. Se le da un nombre a la iteración y se acepta.



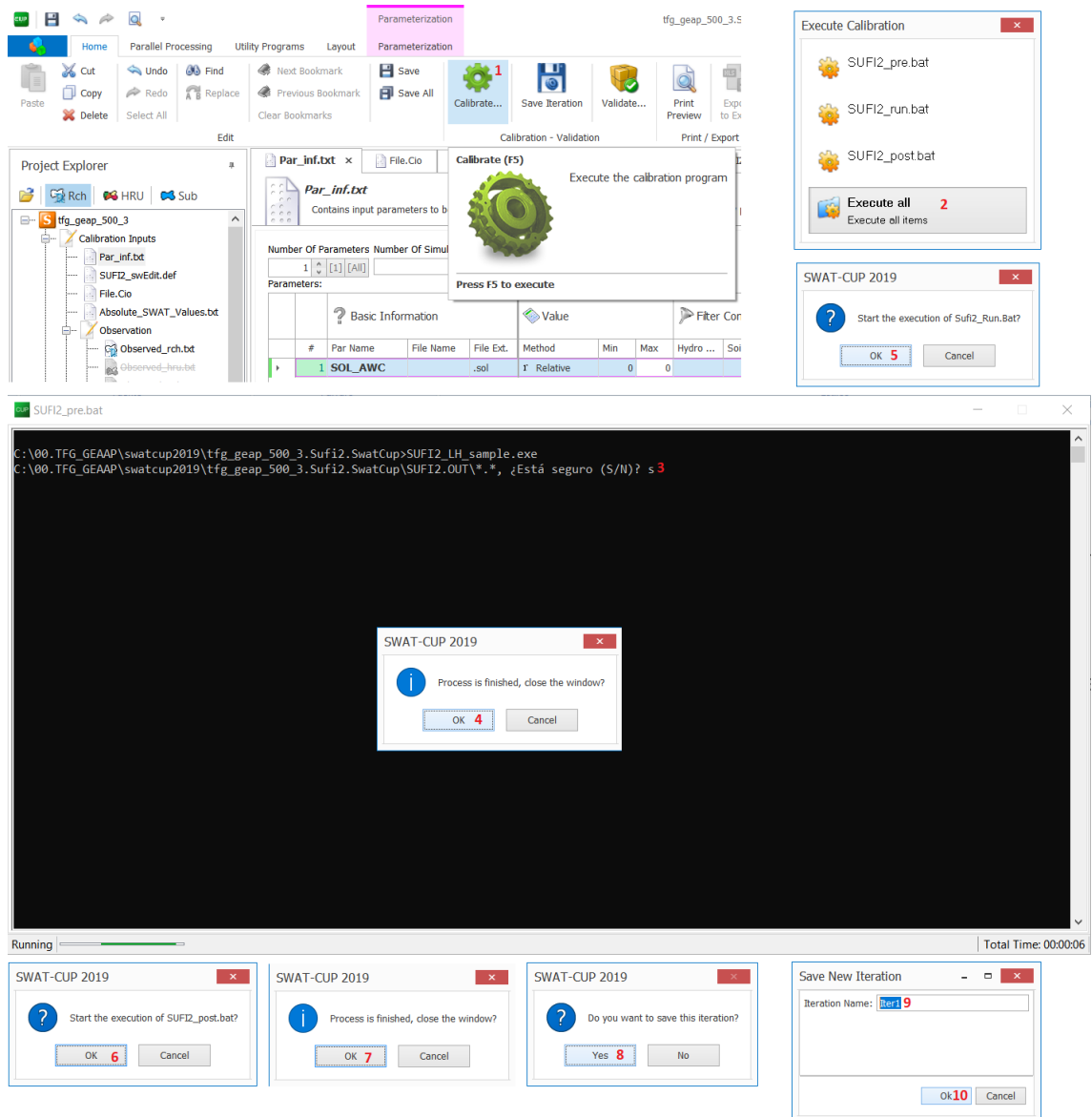


Figura 2-7 Ventanas de SWAT-CUP para correr y guardar la iteración.

### 3. Consulta de los datos

#### 3.1. Rango de valores aceptables para los diferentes parámetros

Como se ha visto en la memoria, se necesita conocer el rango de valores posibles de los parámetros para poder definir correctamente el rango de variación en las simulaciones de calibración. SWAT-CUP tiene recopilados estos rangos en el archivo Absolute\_SWAT\_Values.txt presente en apartado “Calibration Inputs” de SWAT-CUP (ver Figura 3-1). Como se mencionó, aún así, se tiene que verificar que el rango sea lógico, ya que, por ejemplo, para uno de los parámetros correspondientes al coeficiente de rugosidad de Manning (OV\_N) era desproporcionado, de 0.01 a 30, mientras que para el otro parámetro (CH\_N2) iba de -0.01 a 0.3, cuando lo lógico sería que fuera para los dos de 0.01 a 0.3.

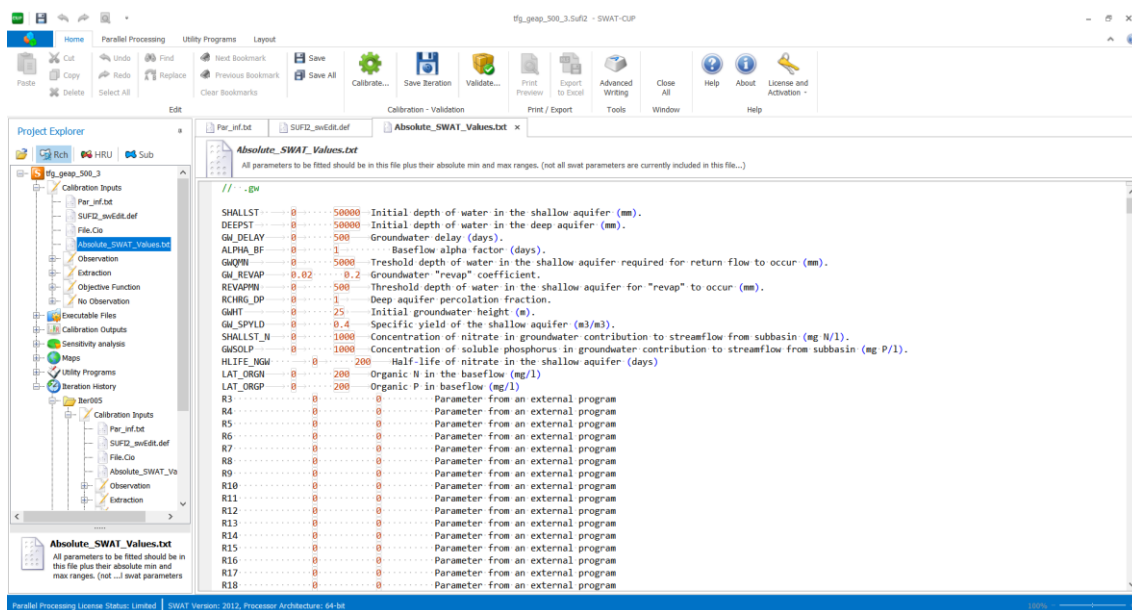


Figura 3-1 Localización del compendio “Absolute\_SWAT\_Values.txt” con los rangos de valores posibles de diferentes parámetros de SWAT en SWAT-CUP 2019 5.2.1.

## 3.2. Outputs de las iteraciones

### 3.2.1. 95PPU plot - Gráfica comparativa de las series temporales de caudales observados, caudales simulados por la mejor simulación y representación gráfica del intervalo de confianza “95PPU” de la iteración.

Con esta gráfica a la que se accede desde “Calibration outputs/95PPU plot”, se puede comprobar el ajuste a lo largo del tiempo entre caudales observados y caudales simulados con la mejor simulación sin perder información sobre la magnitud de los caudales que se están dando en cada momento. Además, en las iteraciones con más de una simulación, incorpora la representación gráfica del intervalo de confianza 95PPU. Como se ha comentado en la memoria, el algoritmo SUFI-2 de SWAT-CUP tiene un enfoque estocástico y bayesiano, por lo que considera la existencia de errores e incertidumbre en las simulaciones del modelo. Por ello, el objetivo de este algoritmo es que la mayor parte de los caudales encontrados se encuentre dentro de la envolvente del intervalo de confianza 95PPU, que representa los valores abarcados por el 95% de la distribución de probabilidad de las variables de salida[1], y hacerlo sin que este intervalo se muy ancho. Este gráfico sería la manera visual de comprobar estos hechos. Ver Figura 3-2.

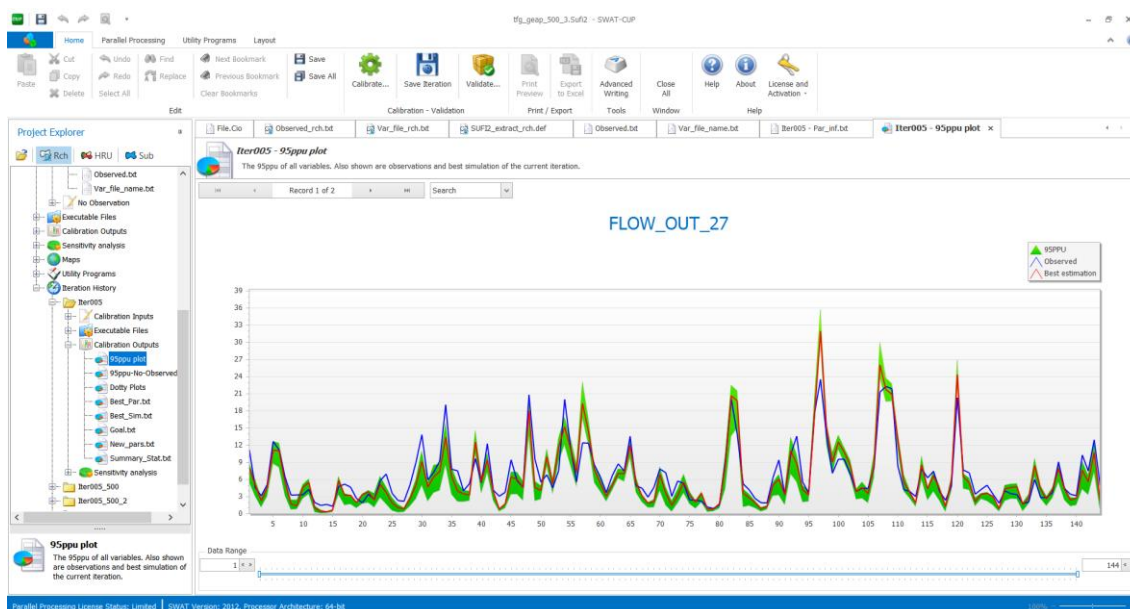


Figura 3-2 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“95ppu plot”).

### 3.2.2. Dotty Plots –Gráficos con la respuesta en la función objetivo de los parámetros modificados a las modificaciones realizadas en su valor.

Este resultado gráfico (“Calibration Outputs/Dotty Plots”, ver ventana 3-3) muestra los valores de variación de cada uno de los parámetros que se han modificado en la iteración (eje de abscisas) así como el impacto que han tenido estas modificaciones en la función objetivo (eje de ordenadas), con ello el gráfico muestra la distribución de las modificaciones dentro del rango de variación así como una idea de su sensibilidad. Si el gráfico de un parámetro muestra una variación gradual, en la que los cambios se estabilizan en torno a un valor máximo de la función objetivo y no hay mucha dispersión, esta será la región de valores de modificación en el que probablemente se encuentre el valor adecuado para ese parámetro. Por otro lado, si la distribución es muy errática el modelo será poco sensible a los cambios de este parámetro y no será fácil detectar visualmente la región en la que se encuentra su valor adecuado.

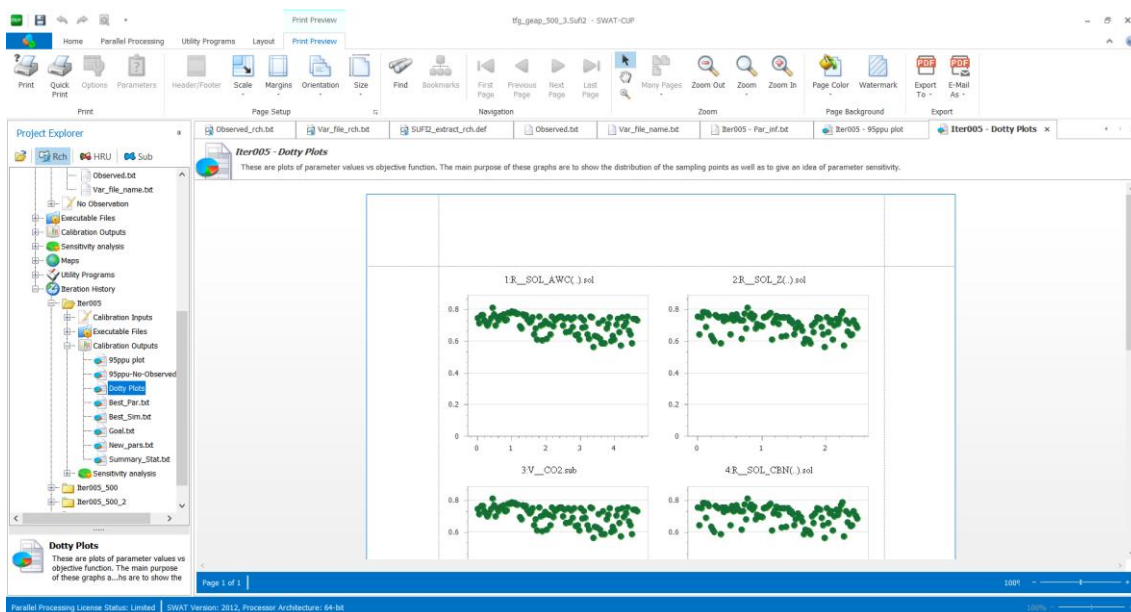


Figura 3-3 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Dotty Plots”).

### 3.2.3. Best\_Par.txt – valores de modificación de los parámetros con el mejor comportamiento en base a la función objetivo.

En esta ventana (“Calibration Outputs/Best\_Par.txt”) se muestran los valores de modificación de los parámetros con el mejor comportamiento en base a la función objetivo definida. Además, también se muestra cuál fue el valor del estadístico que evalúa la función objetivo (“Best\_goal”), así como el número de la simulación en la que se implementaron estos valores de modificación (“Best\_sim\_no”). Por otra parte, también se muestra el valor mínimo (“Min\_value”) y máximo (“Max\_value”) que se ha modificado el parámetro a lo largo de la iteración. Ver Figura 3-4.

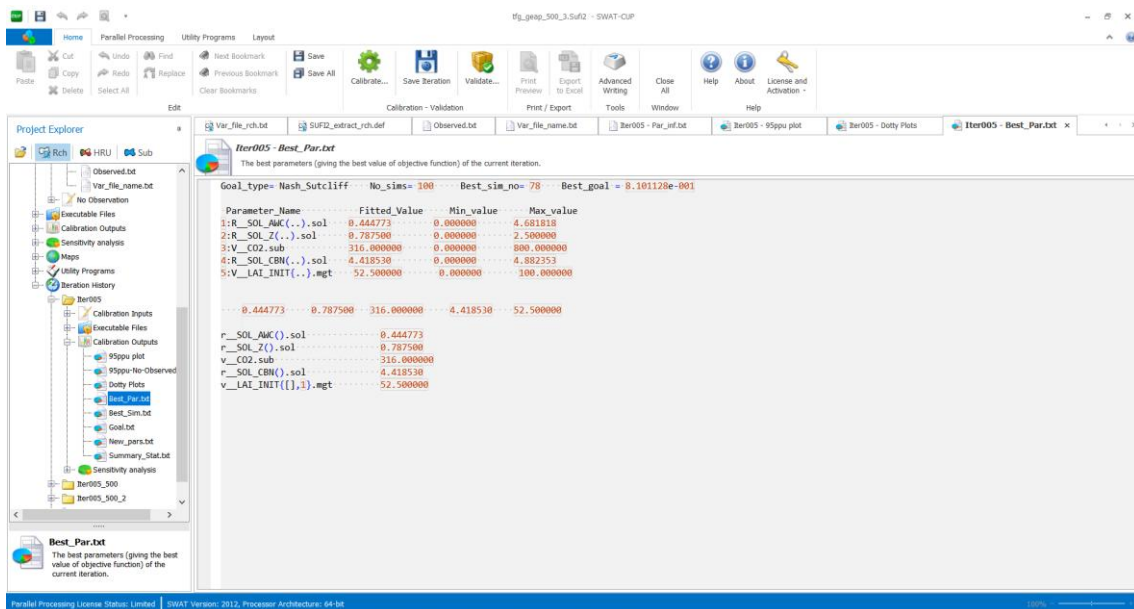


Figura 3-4 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Best\_Pat.txt”).

### 3.2.4. Best\_Sim.txt – Valores observados y valores de salida para la mejor simulación de la iteración

En esta ventana (“Calibration Outputs/Best\_Sim.txt”) se muestran los valores observados y valores de salida simulados con la mejor simulación de la iteración. Están ordenados en base al momento temporal en el que se produjeron. Ver Figura 3-5.

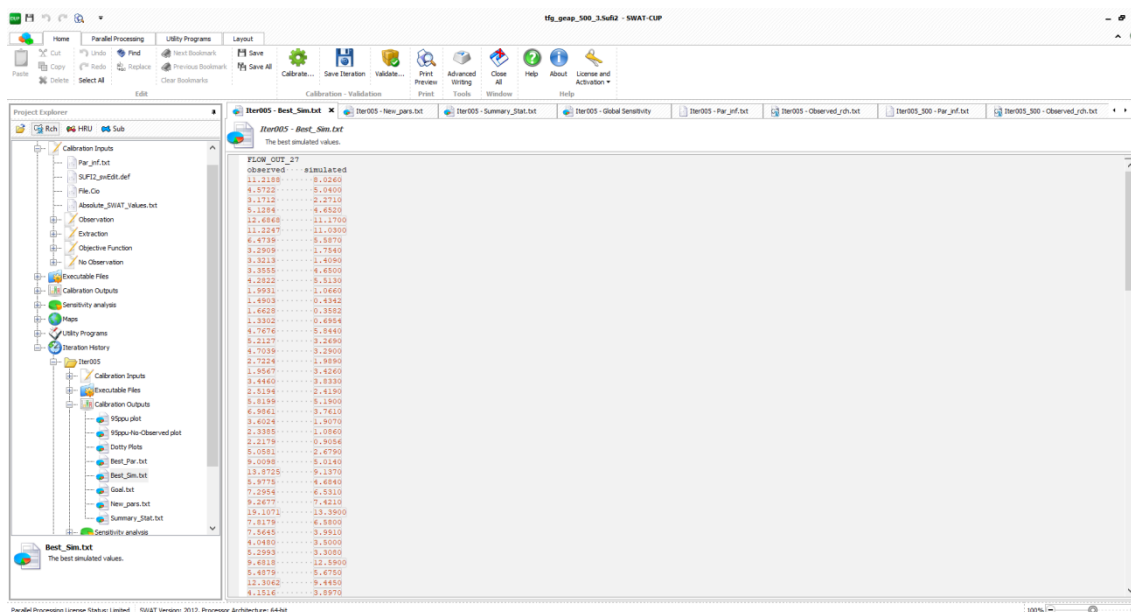


Figura 3-5 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Best\_Sim.txt”).

### 3.2.5. Rango de valores aceptables para los diferentes parámetros

En esta ventana (“Calibration Outputs/New\_pars.txt”) se muestran los valores umbral sugeridos por SWAT-CUP del rango de variación para cada uno de los parámetros modificados en esta iteración. Estos valores serían los que SWAT-CUP sugiere que se tendrían que implementar como rangos de variación en una siguiente iteración. Al ir realizando sucesivas iteraciones, estos rangos se irán estrechando. Ver Figura 3-6.

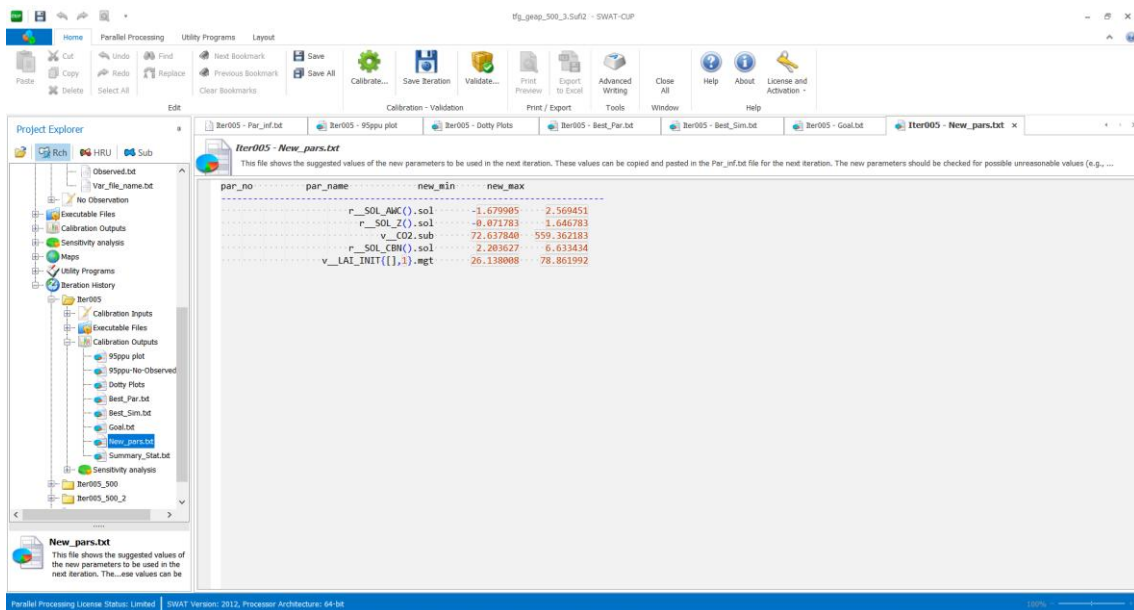


Figura 3-6 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“New\_pars.txt”).

### 3.2.6. Summary\_Stat.txt – Compendio de estadísticos descriptivos del comportamiento del modelo para la mejor simulación de la iteración.

En esta ventana (“Calibration Outputs/Summary\_Stats.txt”, ver Figura 3-7) se muestran los valores de los estadísticos descriptivos del comportamiento del modelo (p-factor, r-factor, R2, NS, bR2, MSE, SSQR, PBIAS, KGE, RSR, MNS, VOL\_FR), Mean\_sim(Mean\_obs) y StdDev\_sim(StdDev\_obs) para la mejor simulación de la iteración. p-factor y r-factor son estadísticos calculados por Abbaspour [1] para caracterizar la cantidad de valores observados localizados dentro de la envolvente de 95PPU (“95% Uncertainty Prediction”), y la anchura de esta envolvente, y siendo deseables valores >0.7 y en el entorno de 1 respectivamente, respectivamente, para simulaciones de caudales. VOL\_FR muestra la fracción del balance hídrico que se predice, siendo deseable un valor próximo a 1. Mean\_sim(Mean\_obs) y StdDev\_sim(StdDev\_sim), muestran la media y la desviación estándar respectivamente de las variables de salida (caudal en este caso) simuladas (“\_sim”) y observadas (“\_obs”). Los otros estadísticos se explican detalladamente en el apartado 3.1.3.1 de la memoria. Esta información se puede ampliar en la guía de SWAT-CUP [1].

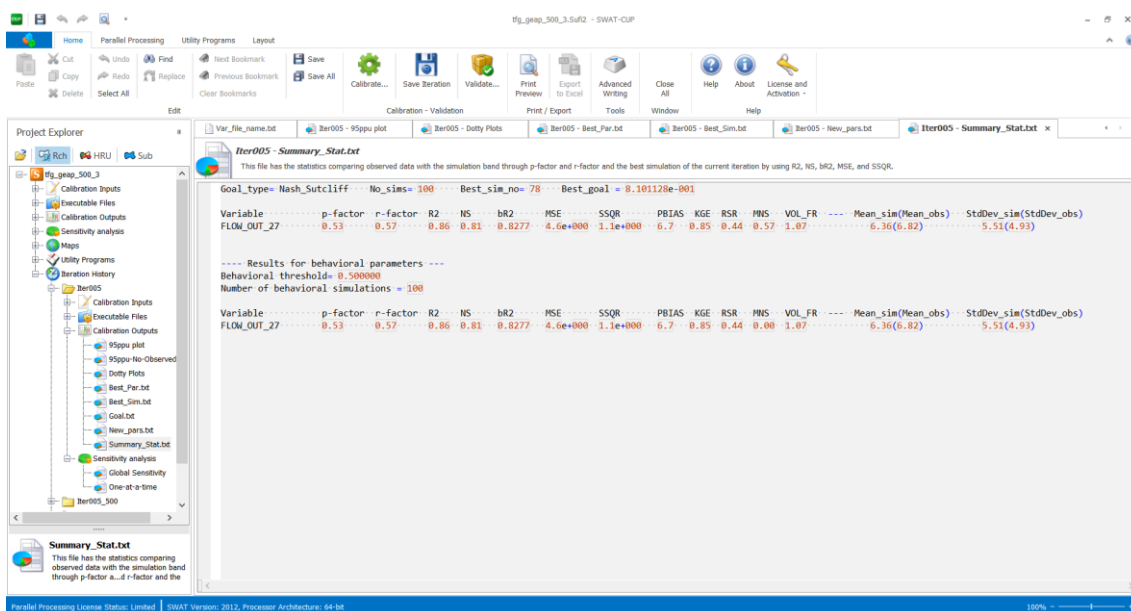


Figura 3-7 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Summary\_Stat”).



### 3.2.7. Global sensitivity – Sensibilidad del modelo respecto a la modificación de cada uno de los parámetros modificados en la iteración

En las ventanas “Graph View” (ver Figura 3-8) y “Grid View” (ver Figura 3-9) y localizadas en “Sensitivity analysis/Global Sensivity” se muestra gráficamente y tabuladamente, respectivamente, la sensibilidad del modelo frente a la modificación de cada uno de los parámetros (modificados en la iteración) estudiando los cambios medios en la función objetivo a partir de los cambios en el parámetro concreto mientras los otros parámetros también cambian. Mientras mayor sea t-stat y menor sea p-value, más sensible será el modelo a la variación de este parámetro. Un valor de p-value inferior a 0.05 suele asegurar que el modelo es sensible a la modificación de este parámetro.

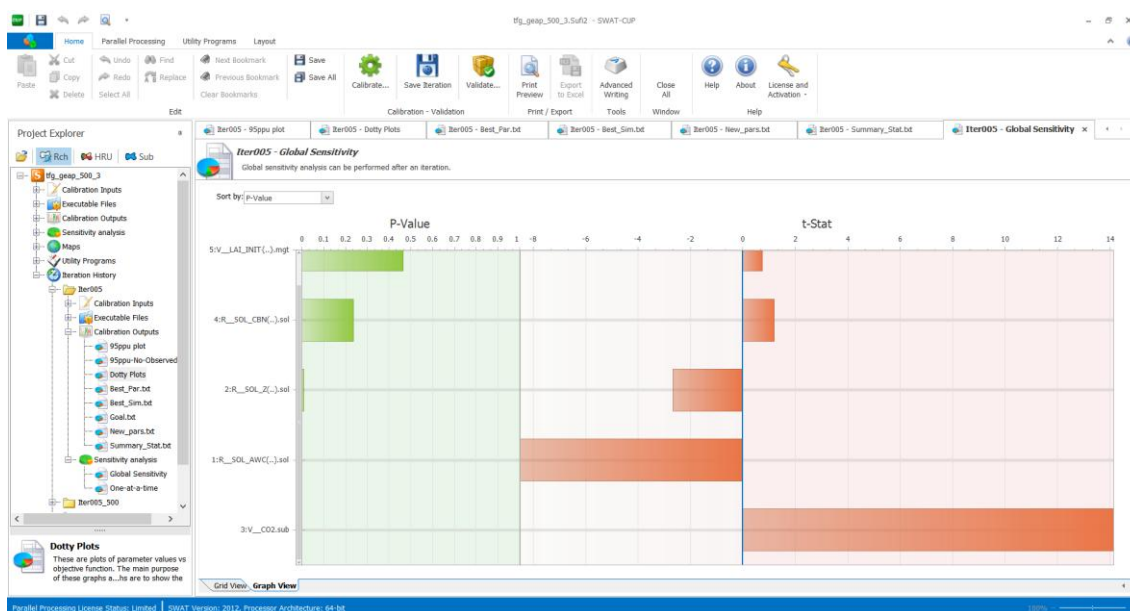


Figura 3-8 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Global Sensivity – Graph View”).

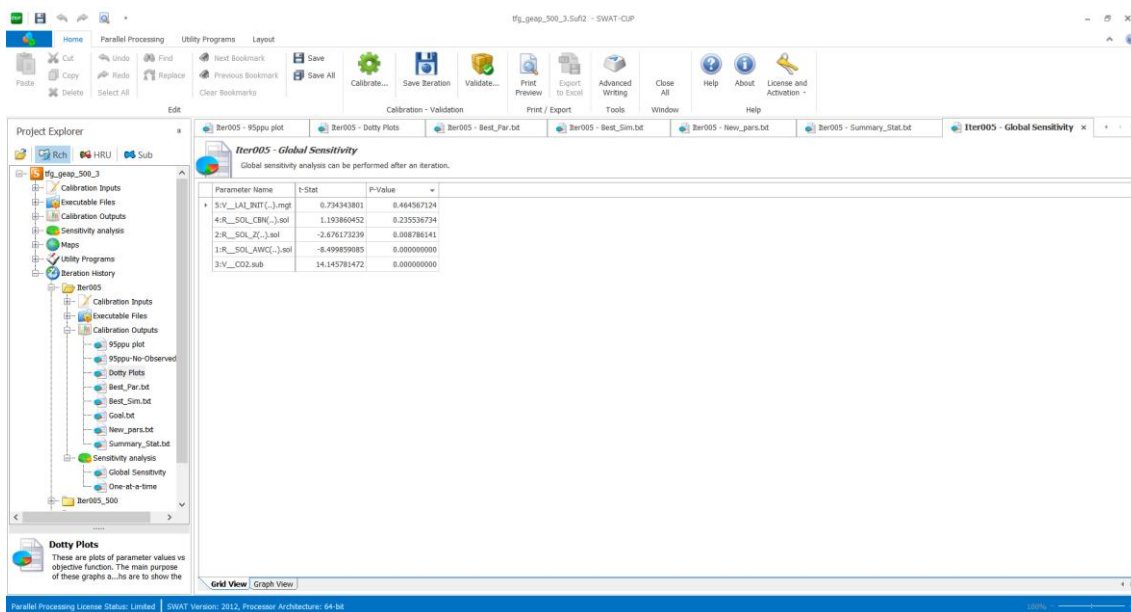


Figura 3-9 Ventanas QSWAT para observar los resultados más visualmente (“Global Sensivity – Grid View”).

### 3.2.8. Otros.

Además de las ventanas comentadas, existen otras como:

- “Calibration Outputs/95PPU-No-Observed plot”: similar a 95ppu plot, pero para los casos en los que no se dispone de valores observados
- “Calibration Outputs/Goal.txt”: muestra los valores de modificación de cada parámetro así como el valor de la función objetivo para cada una de las simulaciones de la iteración.
- “Sensitivity analysis/One-at-a-time”: muestra la sensibilidad del modelo respecto a la variación de los valores de un parámetro sin modificar el resto. Tiene la problemática de que se está modificando con unos valores fijos de los otros parámetros que se desconoce si son los adecuados, y que si fueran unos valores diferentes, quizás la sensibilidad a este parámetro encontrada sería diferente.

Por otra parte, SWAT-CUP genera estos archivos de texto (.txt) con resultados en la carpeta Sufi2.out, por lo que también se podrían consultar abriendo el archivo directamente desde el explorador de archivos.

## Bibliografía

### Referencias bibliográficas

- [1] K. C. Abbaspour, *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual*, 2015.
- [2] E. Servat y A. Dezetter, «Selection of Calibration Objective Functions in the Context of Rainfall-Runoff Modeling in a Sudanese Savannah Area,» *Hydrological Sciences Journal*, vol. 36, pp. 307-330, 8 1991.
- [3] D. Moriasi, M. Gitau, N. Pai y P. Daggupati, «Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria,» *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, vol. 58, pp. 1763-1785, 12 2015.
- [4] 2W2E GmbH - Water Weather Energy Ecosystem, «SWAT-CUP,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.2w2e.com/home/SwatCup>. [Último acceso: 05 Abril 2022].
- [5] D. Nguyen Khoi y V. Thi Thom, «Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in a river catchment of Vietnam,» *Global Ecology and Conservation*, nº 4, pp. 538-548, 13 Octubre 2015.
- [6] F. Zhao, Y. Wu, L. Qiu, Y. Sun, L. Sun, Q. Li, J. Niu y G. Wang, «Parameter Uncertainty Analysis of the SWAT Model in a Mountain-Loess Transitional Watershed on the Chinese Loess Plateau,» *Water*, vol. 10, nº 6, p. 690, 25 Mayo 2018.