

Trabajo Fin de Máster

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO  
ECO-HIDROLÓGICO PARA LA  
GESTIÓN FORESTAL EN LA  
CUENCA DEL CARRAIXET  
(VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE  
CAMBIO CLIMÁTICO.**

**Intensificación: *RECURSOS HÍDRICOS***

**Autor:**

*FERNANDO RIVAS ALVARADO*

**Tutor:**

*DR. FÉLIX RAMÓN FRANCÉS GARCÍA*

**Cotutor/es:**

*DRA. ALICIA GARCÍA ARIAS*

*DR. CARLOS ECHEVERRÍA MARTÍNEZ*

**NOVIEMBRE, 2020**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ECO-HIDROLÓGICO PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL CARRAIXET (VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.

**Título del TFM en inglés:** IMPLEMENTATION OF AN ECO-HYDROLOGICAL MODEL FOR FOREST MANAGEMENT AT CARRAIXET (VALÈNCIA) BASIN WITH CLIMATE CHANGE SCENARIOS.

**Título del TFM en Valenciano:** IMPLEMENTACIÓ D'UN MODEL ECO-HIDROLÒGIC PER A LA GESTIÓ FORESTAL EN LA CONCA DEL CARRAIXET (VALÈNCIA) EN ESCENARIS DE CANVI CLIMÀTIC.

**Alumno:** FERNANDO RIVAS ALVARADO

**Tutor:** DR. FÉLIX RAMÓN FRANCÉS GARCÍA

**Cotutor/es:**

DRA. ALICIA GARCÍA ARIAS

DR. CARLOS ECHEVERRÍA MARTÍNEZ

**Director experimental:**

**Fecha de Lectura:** NOVIEMBRE, 2020

### Resumen

#### Español

En los últimos años la Ecohidrología ha cubierto la necesidad de comprender como los procesos ecológicos regulan e interactúan dentro del ciclo hidrológico, permitiendo adoptar alternativas de gestión más variadas y versátiles con el fin de mejorar la sostenibilidad ambiental. Nuestra área de estudio se ubica en la cuenca del Carraixet en donde se ha calibrado el modelo ecohidrológico TETIS, primero se han estimado los mapas de parámetros que fueron calculados a partir del modelo de elevación digital, usos de suelo, edafología, geomorfología y litología de la cuenca. Asimismo, para la estimación inicial de los parámetros efectivos de vegetación se tomaron como referencia los valores obtenidos en la investigación de **Sanchis et al. (2019)** llamada *"Managing low productive forests at catchment scale: Considering water, biomass and fire risk to achieve economic feasibility"*. Luego se realizó la calibración del modelo TETIS mediante cuatro configuraciones: a) Monobjetivo Temporal, b) Multiobjetivo temporal, c) Monobjetivo espacio - temporal y d) Multiobjetivo espacio - Temporal, en las calibraciones monobjetivo se empleó el algoritmo de SCE-UA para optimización del modelo. Sin embargo, en la calibración multiobjetivo se utilizó el algoritmo de MOSCEM-UA y la metodología de las funciones empíricas ortogonales para la optimización del modelo. Finalmente, se encontró que la calibración multiobjetivo espacio - temporal (variables de estado: caudal y humedad del suelo) es la que representaba adecuadamente el comportamiento de los caudales y dinámica de la vegetación en la cuenca.

En el análisis de escenarios de gestión forestal se realizó sobre 4 usos forestales que abarcaban gran parte del área de la cuenca. Asimismo, se estableció un escenario de control en donde el factor de cobertura fue igual 0.85 (85% de la densidad de cubierta) y se asumió talas de 20%, 30%, 40% y 50%. Los resultados mostraron que el Índice de área foliar (LAI), la humedad del suelo en la capa profunda y la evaporación directa aumentaban a medida que se intensificaba la tala en la gestión forestal. Sin embargo, las variables

como transpiración y humedad del suelo en la capa superficial mostraban mayores descensos a medida que la tala era más intensa. En el caso de la evapotranspiración no se encontraron cambios significativos ya que un descenso de la transpiración ocasionado por el aumento de la tala también generaba un aumento de la evaporación directa manteniendo el balance de la evapotranspiración sin cambios significativos.

Los escenarios de cambio climático analizaron las proyecciones de 14 modelos de circulación regional (RCM). Fue necesario el ajuste de sesgo de las series proyectadas de precipitación. Dicha corrección se realizó mediante el enfoque de mapeo de cuantiles (**Quantile Mapping, QM**), habiéndose eliminado previamente la lluvia espuria con la finalidad de que la precipitación proyectada por los RCM tuviera el mismo porcentaje de días seco/húmedos de la precipitación observada. Los resultados mostraron un buen ajuste de las variables climáticas. La elección del RCM más apropiado para el análisis de escenarios se basó en el análisis de tendencias y del RSME (raíz del error medio cuadrático). El modelo MPI\_CSC\_REMO2009\_v1 presentó el mejor ajuste en la estimación de la precipitación observada una vez realizada la corrección de sesgo. Las series de temperatura presentaron un comportamiento no estacionario que no se lograba reproducir correctamente al realizar ajuste de sesgo. Por tanto, se decidió emplear para nuestro análisis las series de temperatura con los datos originales ya que presenta un comportamiento muy cercano al valor observado sin realizar correcciones.

El análisis de escenarios de cambio climático y gestión forestal se centró en examinar los impactos en los mismos 4 usos forestales mencionados previamente. De los resultados obtenidos se concluyó:

- El **LAI** tiene una tendencia a incrementarse a medida que aumenta la intensidad de tala en la gestión forestal. Los efectos de cambio climático modifican las tendencias presentando diferentes resultados en función al escenario. por ejemplo, para el escenario pesimista (RCP 8.5), el valor del LAI muestra una tendencia constante hasta un futuro a medio plazo, luego el valor tiende a descender hasta finales del centenario.
- La **transpiración** tiende a decrecer a medida que se intensifican tanto la tala como la intensidad de las variaciones climáticas (especialmente al final del centenario).
- La tala y el cambio climático extremo favorecen las pérdidas hidrológicas por **evaporación** desde el suelo desnudo.
- La **humedad del suelo en la capa superficial** tiende a disminuir a medida que aumentamos la superficie de gestión forestal, siendo este efecto más marcado en los escenarios de cambio climático más pesimistas a finales del centenario.
- La **humedad del suelo en la capa profunda** muestra una tendencia creciente a medida que se intensifica el escenario de gestión forestal. Tiene un efecto contrario la intensificación de los

impactos climáticos, proyectándose descensos considerables en el escenario pesimista a finales del centenario.

- La **percolación** presenta una tendencia creciente a medida que aumenta la superficie talada y la magnitud de sus valores extremos se incrementará en los diferentes escenarios de cambio climático.

Mediante este trabajo ha quedado nuevamente y más ampliamente demostrado lo que ya avanzaban Sanchís *et al* (2019). Por una parte, que el modelo TETIS es una herramienta ideal para el análisis de las variables ecohidrológicas ante diferentes alternativas de gestión y en un marco de clima futuro cambiante. En segundo lugar, que la gestión forestal produce otros beneficios además de la disponibilidad de agua, lo cual tiene una importancia destacable en clima semiárido como es el caso de la cuenca del Carraixet; también incrementan el LAI como consecuencia de un incremento de la biomasa vegetal.

### Valenciano

En els últims anys l'Ecohidrologia ha cobert la necessitat de comprendre com els processos ecològics regulen i interactuen dins del cicle hidrològic, permetent adoptar alternatives de gestió més variades i versàtils a fi de millorar la sostenibilitat ambiental. La nostra àrea d'estudi s'ubica en la conca del Carraixet on s'ha calibrat el model ecohidrològic TETIS, primer s'han estimat els mapes de paràmetres que van ser calculats a partir del model d'elevació digital, usos de sòl, edafologia, geomorfologia i litologia de la conca. Així mateix, per a l'estimació inicial dels paràmetres efectius de vegetació es van prendre com a referència els valors obtinguts en la investigació de Sanchis t'al. (2019) crida "Managing low productive forests at catchment scale: Considering water, biomass and fire risk to achieve economic feasibility". Després es va realitzar la calibratge del model TETIS per mitjà de quatre configuracions: a) Monobjetivo Temporal, b) Multiobjetivo temporal, c) Monobjetivo espai - temporal i d) Multiobjetivo espai - Temporal, en les calibratges monobjetivo es va emprar l'algoritme de SCE-UA per a optimització del model. No obstant això, en la calibratge multiobjetivo es va utilitzar l'algoritme de MOSCEM-UA i la metodologia de les funcions empíriques ortogonals per a l'optimització del model. Finalment, es va trobar que la calibratge multiobjetivo espai - temporal (variables d'estat: cabal i humitat del sòl) és la que representava adequadament el comportament dels cabals i dinàmica de la vegetació en la conca.

Els escenaris de canvi climàtic van analitzar les projeccions de 14 models de circulació regional (RCM) . Va ser necessari l'ajust de caire de les sèries projectades de precipitació. La dita correcció es va realitzar per mitjà de l'enfocament de mapeo de cuantiles (Quantile Mapping, QM) , havent-se eliminat prèviament la pluja espúria amb la finalitat que la precipitació projectada pels RCM tinguera el mateix percentatge de dies seco/húmedos de la precipitació observada. Els resultats van mostrar un bon ajust de les variables climàtiques. L'elecció del RCM més apropiat per a l'anàlisi d'escenaris es va basar en l'anàlisi de tendències i del RSME (arrel de l'error mitjà quadràtic) . El model MPI\_CSC\_REMO2009\_v1 va presentar el millor ajust en l'estimació de la precipitació observada una vegada realitzada la correcció de caire. Les sèries de temperatura van presentar un comportament no estacionari que no s'aconseguia reproduir correctament al realitzar ajust de caire. Per tant, es va decidir emprar per a la nostra anàlisi les sèries de temperatura

amb les dades originals ja que presenta un comportament molt pròxim al valor observat sense realitzar correccions.

L'anàlisi d'escenaris de canvi climàtic i gestió forestal es va centrar a examinar els impactes en els mateixos 4 usos forestals mencionats prèviament. dels resultats obtinguts es va concloure:

- El **LAI** té una tendència a incrementar-se a mesura que augmenta la intensitat de tala en la gestió forestal. Els efectes de canvi climàtic modifiquen les tendències presentant diferents resultats en funció a l'escenari. per exemple, per a l'escenari pessimista (RCP 8.5) , el valor del LAI mostra una tendència constant fins a un futur a mitjà termini, després el valor tendix a descendir fins a finals del centenari.
- La **transpiració** tendix a decreïxer a mesura que s'intensifiquen tant la tala com la intensitat de les variacions climàtiques (especialment al final del centenari).
- La tala i el canvi climàtic extrem afavorixen les pèrdues hidrològiques per **evaporació** des del sòl nu.
- La **humitat del sòl en la capa superficial** tendix a disminuir a mesura que augmentem la superfície de gestió forestal, sent este efecte més marcat en els escenaris de canvi climàtic més pessimistes a finals del centenari.
- La **humitat del sòl en la capa profunda** mostra una tendència creixent a mesura que s'intensifica l'escenari de gestió forestal. Té un efecte contrari la intensificació dels impactes climàtics, projectant-se descensos considerables en l'escenari pessimista a finals del centenari.
- La **percolación** presenta una tendència creixent a mesura que augmenta la superfície talada i la magnitud dels seus valors extrems s'incrementarà en els diferents escenaris de canvi climàtic.

Per mitjà d'este treball ha quedat novament i més àmpliament demostrat el que ja avançaven Sanchis t'al (2019). D'una banda, que el model TETIS és una ferramenta ideal per a l'anàlisi de les variables ecohidrológicas davant de diferents alternatives de gestió i en un marc de clima futur canviant. En segon lloc, que la gestió forestal produïx altres beneficis a més de la disponibilitat d'aigua, la qual cosa té una importància destacable en clima semiàrido com és el cas de la conca del Carraixet; també incrementen el LAI com a conseqüència d'un increment de la biomassa vegetal.

## Inglés

In recent years Ecohydrology has covered the need to understand how ecological processes regulate and interact within the hydrological cycle, allowing the adoption of more varied and versatile management alternatives to improve environmental sustainability. Our area of study is in the Carraixet basin where the TETIS eco-hydrological model has been calibrated. First, the parameter maps have been estimated from the digital elevation model, land use, pedology, geomorphology and lithology of the basin. Likewise, for the initial estimation of the effective vegetation parameters, the values obtained in the research of **Sanchis et al. (2019)** called "*Managing low productive forests at catchment scale: Considering water, biomass and fire risk to achieve economic feasibility*" were taken as reference. Then, the calibration of the TETIS model was

carried out using four configurations: a) Mono-objective Temporal, b) Multi-objective Temporal, c) Mono-objective Space-Time and d) Multi-objective Space-Time. The SCE-UA algorithm was used in the mono-objective calibrations to optimize the model. However, in the multiobjective calibration the MOSCEM-UA algorithm and the methodology of the orthogonal empirical functions were used for the optimization of the model. Finally, it was found that the space-time multiobjective calibration (state variables: flow and soil moisture) is the one that adequately represented the behavior of the flows and dynamics of the vegetation in the basin.

The analysis of forest management scenarios was carried out on 4 forest uses that covered a large part of the area of the basin. Likewise, a control scenario was established where the coverage factor was equal to 0.85 (85% of the cover density) and assumed felling of 20%, 30%, 40% and 50%. The results showed that the Leaf Area Index (LAI), deep soil moisture and direct evaporation increased as logging in forest management intensified. However, variables such as transpiration and topsoil moisture showed greater declines as logging became more intense. In the case of evapotranspiration, no significant changes were found since a decrease in transpiration caused by increased logging also generated an increase in direct evaporation while maintaining the balance of evapotranspiration without significant changes.

The climate change scenarios analyzed the projections of 14 regional circulation models (RCM). Bias adjustment of the projected precipitation series was required. This correction was made through the approach of **Quantile Mapping (QM)**, having previously eliminated the spurious rain so that the precipitation projected by the RCM had the same percentage of dry/wet days of the observed precipitation. The results showed a good adjustment of the climatic variables. The choice of the most appropriate RCM for the scenario analysis was based on the analysis of tendencies and the RSME (root of the half square error). The model MPI\_CSC\_REMO2009\_v1 presented the best adjustment in the estimation of observed precipitation after bias correction. The temperature series presented a non-stationary behavior that was not able to be correctly reproduced when performing bias adjustment. Therefore, it was decided to use for our analysis the temperature series with the original data because it presents a behavior very close to the observed value without making corrections.

The analysis of climate change and forest management scenarios focused on examining the impacts on the same 4 forest uses mentioned above. From the results obtained it was concluded:

- The **LAI** tends to increase as logging intensity increases in forest management. For example, for the pessimistic scenario (RCP 8.5), the LAI value shows a constant trend until a medium-term future, then the value tends to decrease until the end of the century.
- **Transpiration** tends to decrease as both logging and the intensity of climate variations intensify (especially at the end of the century).
- Logging and extreme climate change favour hydrological losses through **evaporation** from bare soil.

- **Soil moisture in the surface layer** tends to decrease as we increase the area of forest management, this effect being more marked in the more pessimistic climate change scenarios at the end of the century.
- **Soil moisture in the deep layer** shows an increasing trend as the forest management scenario intensifies. The opposite effect is the intensification of climate impacts, with considerable decreases projected in the pessimistic scenario at the end of the century.
- **Percolation** shows an increasing trend as the area harvested increases and the magnitude of its extreme values will increase in the different climate change scenarios.

Through this work it has been demonstrated again and more widely what Sanchís et al (2019) were already advancing. On the one hand, that the TETIS model is an ideal tool for the analysis of the ecohydrological variables before different alternatives of management and in a framework of changing future climate. Secondly, that forest management produces other benefits besides the availability of water, which has a remarkable importance in semi-arid climate as is the case of the Carraixet basin; also increase the LAI as a result of an increase in plant biomass.

**Palabras clave español (máximo 5):** Modelo eco-hidrológico; algoritmos de optimización; información de satélite; TETIS; gestión forestal; cambio climático.

**Palabras clave valenciano (máximo 5):** Model eco-hidrològic; algoritmes d'optimització; informació de satèl·lit; TETIS; gestió forestal; canvi climàtic.

**Palabras clave inglés (máximo 5):** Eco-hydrological model; optimization algorithms; satellite information; TETIS; forest management; climate change.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer a mis tutores de máster, el Dr. Félix Ramón Francés García, por sus enseñanzas y gran apoyo en el desarrollo de la tesina; a mi tutora Dra. Alicia García Arias, por ser una amiga y guía en el proceso de esta investigación; al Dr. Carlos Echeverría Martínez por sus asesorías.

Agradecer mis padres y hermanos; por sus palabras de aliento y apoyo incondicional que he recibido de ellos.

Finalmente, a PRONABEC por financiar mis estudios de posgrado.

## ÍNDICE

CAPITULO 1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS .....	1
1.1. INTRODUCCIÓN .....	2
1.2. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.1. Objetivos específicos.....	3
CAPITULO 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO TETIS .....	4
2.1. MODELO HIDROLÓGICO.....	5
2.2. MODELO ECO-HIDROLÓGICO TETIS .....	6
2.2.1. Generación de la información espacial.....	6
2.2.2. Producción de escurrimiento.....	6
2.2.3. Traslación de la escurrimiento.....	8
2.2.4. Sub – modelo ecohidrológico de interceptación y almacenamiento estático .....	9
2.2.5. Sub-modelo de vegetación: LUE-Model.....	11
2.2.6. Estructura de parámetros del modelo .....	13
2.2.7. Algoritmos de calibración automática .....	14
2.2.8. Funciones empíricas ortogonales.....	15
2.2.9. Función objetivo espacio temporal $STE = f(LAI)$ .....	16
2.2.10. Configuración de la calibración automática.....	17
2.3. PROCESOS KÁRSTICOS Y MANANTIALES .....	18
CAPITULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	19
3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA .....	20
3.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS GENERALES .....	21
3.3. TOPOGRAFÍA DE LA CUENCA.....	21
3.4. GEOLOGÍA .....	23
3.5. HIDROGEOLOGÍA.....	24
3.6. USOS DE SUELO .....	25
CAPITULO 4. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA .....	27
4.1. PRECIPITACIÓN.....	29
4.2. TEMPERATURA .....	30
4.3. RADIACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA .....	31
4.4. CAUDAL .....	32
CAPITULO 5. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS.....	34
5.1. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL Y MAPAS DE PARÁMETROS DERIVADOS .....	35
5.1.1. Modelo de elevación digital del terreno .....	35
5.1.2. Mapa de pendientes .....	37
5.1.3. Mapa de direcciones de drenaje .....	37

*IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ECO-HIDROLÓGICO PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL CARRAIXET (VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO*

---

5.1.4.	Mapa de celdas drenantes acumuladas.....	38
5.1.5.	Mapa de velocidad de flujo en ladera.....	39
5.2.	USOS DEL SUELO Y MAPAS DE PARÁMETROS DERIVADOS.....	40
5.2.1.	Mapa de usos del suelo.....	40
5.2.2.	Mapa de factor de cobertura.....	41
5.2.3.	Mapa de almacenamiento estático del suelo.....	43
5.3.	MAPAS DE PARÁMETROS DERIVADOS DE LA EDAFOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y LA LITOLOGÍA DE LA CUENCA.....	53
5.3.1.	Mapa de capacidad de infiltración.....	53
5.3.2.	Mapa de conductividad hidráulica en Interflujo.....	54
5.3.3.	Mapa de capacidad de percolación.....	54
5.4.	PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS.....	57
5.5.	MAPA ZONAS KARSTICAS Y MANANTIALES.....	58
5.6.	PÉRDIDAS POR TRANSMISIÓN EN CAUCE.....	60
CAPITULO 6. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO TETIS.....		62
6.1.	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO ECOHIDROLÓGICO TETIS.....	63
6.1.1.	Monobjetivo temporal.....	63
6.1.2.	Multiobjetivo Temporal.....	66
6.1.3.	Monobjetivo espacio - temporal.....	69
6.1.4.	Multiobjetivo espacio - temporal.....	74
6.2.	IMPLEMENTACION DEL MODELO ECOHIDROLÓGICO TETIS.....	82
CAPITULO 7. ESCENARIOS DE GESTIÓN FORESTAL.....		83
7.1.	DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS DE GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL CARRAIXET	84
7.2.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL CARRAIXET.....	86
CAPITULO 8. CAMBIO CLIMÁTICO.....		96
8.1.	ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	97
8.2.	DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (CARRAIXET).....	98
8.3.	ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE CAMBIO GLOBAL MEDIANTE EL MODELO ECOHIDROLÓGICO TETIS.....	107
8.4.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE CAMBIO GLOBAL.....	108
CAPITULO 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		143
9.1.	CONCLUSIONES.....	144
9.2.	RECOMENDACIONES.....	146
CAPITULO 10. BIBLIOGRAFÍA.....		147

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de modelos útiles en hidrología .....	6
Figura 2. Esquema conceptual del ciclo del agua a nivel de celda del modelo TETIS.....	7
Figura 3. Esquema del movimiento horizontal del flujo en el modelo TETIS.....	8
Figura 4. Esquema del sub-modelo hidrológico (Extraído de Pasquato, 2013) .....	10
Figura 5. Descripción esquemática de un parámetro efectivo .....	13
Figura 6. Esquema simplificado de un sistema kárstico .....	18
Figura 7. Ubicación del área de estudio – Cuenca del Carraixet.....	20
Figura 8. Precipitación mensual – Cuenca del Carraixet .....	21
Figura 9. Temperaturas máximas y mínimas – Cuenca del Carraixet .....	21
Figura 10. Curva hipsométrica – Cuenca del Carraixet .....	22
Figura 11 . Tipologías de curvas hipsométricas, según STRAHLER (Fuente: Guerra and González., Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, figura 7) ..	22
Figura 12. Mapa geológico – Cuenca del Carraixet .....	23
Figura 13. Mapa hidrogeológico – Cuenca del Carraixet .....	24
Figura 14. Porcentaje usos de suelo en la cuenca del Carraixet, agrupando los usos forestales, agrícolas y urbanos.....	25
Figura 15. Ubicación espacial de las Estaciones meteorológicas e hidrológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet .....	28
Figura 16. Evolución temporal de la precipitación media diaria en las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet .....	29
Figura 17. Funciones de densidad de precipitación en la cuenca del Carraixet .....	29
Figura 18. Evolución temporal de la temperatura máxima diaria en las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet (izquierda) y matriz de correlación entre los datos de las diferentes estaciones (derecha) .....	30
Figura 19. Evolución temporal de la temperatura media diaria en las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet (izquierda) y matriz de correlación entre los datos de las diferentes estaciones (derecha) .....	30
Figura 20. Evolución temporal de la temperatura mínima diaria en las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet (izquierda) y matriz de correlación entre los datos de las diferentes estaciones (derecha) .....	30
Figura 21. Funciones de densidad de las temperaturas máximas (izquierda), medias (centro) y mínimas (derecha) en la cuenca del Carraixet.....	31
Figura 22. Evolución temporal de la evapotranspiración de referencia en las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet (izquierda) y matriz de correlación entre los datos de las diferentes estaciones (derecha) .....	31
Figura 23. Evolución temporal de radiación solar (MJ/m <sup>2</sup> ) en las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet (izquierda) y matriz de correlación entre los datos de las diferentes estaciones (derecha). .....	32
Figura 24. Funciones de densidad de las series de evapotranspiración de referencia (mm/d) (izquierda) y de radiación solar (MJ/m <sup>2</sup> ) (derecha).....	32
Figura 25. Evolución temporal de los caudales medios diarios en la estación de aforo Carraixet- Betera.....	33
Figura 26. Curva de duración de los caudales medios diarios en la estación de aforo Carraixet- Betera.....	33
Figura 27. Calibración del proceso de socavado de cauces en el modelo digital de elevaciones de la cuenca del Barranco del Carraixet. A la izquierda se muestra la red de cauces del modelo	

digital de elevaciones (azul) frente al mapa de líneas azules (negro) utilizando una profundidad de socavado de 3,5 m, a la derecha la comparación asignando una profundidad de socavado de 4 m.....	36
Figura 28. Modelo digital de terreno para cuenca del Carraixet .....	36
Figura 29. Mapa de pendientes en la cuenca del Carraixet .....	37
Figura 30. Direcciones de flujo según ARCGIS.....	38
Figura 31. Mapa de direcciones de flujo en la cuenca del Carraixet.....	38
Figura 32. Mapa de celdas drenantes acumuladas en la cuenca del Carraixet .....	39
Figura 33. Mapa de velocidades de flujo en ladera - Cuenca del Carraixet .....	40
Figura 34. Mapa de uso de suelo en la Cuenca del Carraixet .....	40
Figura 35. Mapas de fracción de cobertura de referencia para usos del suelo cuyo estrato dominante es arbóreo (izquierda) y para usos del suelo con estrato herbáceo dominante en la cuenca del Carraixet.....	41
Figura 36. Imagen Landsat de porcentaje de suelo desnudo Global bare soil Landsat 30m (año 2015) en la cuenca del Barranco del Carraixet. ....	42
Figura 37. Mapa de factor de cobertura en la Cuenca del Carraixet. ....	42
Figura 38. Mapa de almacenamiento en depresiones (mm) como consecuencia de la pendiente (izquierda) y de la cubierta vegetal (derecha) en la cuenca del Carraixet. ....	45
Figura 39. Mapa de almacenamiento superficial (mm) en la cuenca del Carraixet.....	45
Figura 40. Mapa de profundidades hasta la roca madre en la cuenca del Carraixet.....	46
Figura 41. Profundidades de raíces en la cuenca del Carraixet. El límite máximo (izquierda) y las profundidades efectivas (derecha) una vez comprobada la profundidad de la roca madre.....	48
Figura 42. Mapa de almacenamiento capilar (mm) en la cuenca del Carraixet.....	49
Figura 43. Mapa de almacenamiento estático del suelo (mm) en la cuenca del Carraixet. ....	50
Figura 44. Mapas de almacenamiento estático a capacidad de campo, capa superior (izquierda) e inferior del suelo (derecha) en la cuenca del Carraixet. ....	51
Figura 45. Mapas de almacenamiento estático en el punto óptimo de humedad, capa superior (izquierda) e inferior del suelo (derecha) en la cuenca del Carraixet. ....	52
Figura 46. Mapas de almacenamiento estático en el punto de marchitamiento permanente, capa superior (izquierda) e inferior del suelo (derecha) en la cuenca del Carraixet. ....	52
Figura 47. Mapas de capacidad de infiltración en la cuenca del Carraixet. ....	53
Figura 48. Mapas de conductividad hidráulica en interflujo en la cuenca del Carraixet. ....	54
Figura 49. Mapa de permeabilidad de España (1:200.000) del Instituto Geológico y Minero Español en la cuenca del Carraixet.....	55
Figura 50. Mapa hidrogeológico de la cuenca del Carraixet. ....	56
Figura 51. Mapa de capacidad de percolación en la cuenca del Carraixet. ....	57
Figura 52. Mapa de zonas kársticas en la cuenca del Carraixet. ....	59
Figura 53. Mapa de zona karst y manantiales que se han considerado en la simulación hidrológica para la cuenca del Carraixet. ....	59
Figura 54. Ubicación espacial de las pérdidas por transmisión en la cuenca del Carraixet.....	61
Figura 55. Evolución del índice NSE en el proceso de calibración automática .....	63
Figura 56. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración monobjetivo temporal.....	64
Figura 57. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración monobjetivo temporal.....	64
Figura 58. Soluciones candidatas y frontera de Pareto al final del proceso de optimización con configuración multiobjetivo temporal. ....	66

Figura 59. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración multiobjetivo temporal. ....	67
Figura 60. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración temporal – multiobjetivo. ....	67
Figura 61. Evolución del STE(SM) en el proceso de calibración automática.....	69
Figura 62. Evolución del índice STE(LAI) en el proceso de calibración automática .....	69
Figura 63. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración monobjetivo espacio - temporal, escenario 1.....	70
Figura 64. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración monobjetivo espacio - temporal. Escenario 1. ....	70
Figura 65. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración monobjetivo espacio - temporal, escenario 2.....	70
Figura 66. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración monobjetivo espacio - temporal. Escenario 2. ....	70
Figura 67. Soluciones candidatas y frontera de Pareto al final del proceso de optimización con configuración multiobjetivo espacio - temporal – Escenario 1.....	74
Figura 68. Soluciones candidatas y frontera de Pareto al final del proceso de optimización con configuración multiobjetivo espacio - temporal – Escenario 2.....	75
Figura 69. Soluciones candidatas y frontera de Pareto al final del proceso de optimización con configuración multiobjetivo espacio - temporal – Escenario 3.....	75
Figura 70. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración multiobjetivo espacio - temporal, escenario 1.....	76
Figura 71. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración multiobjetivo espacio – temporal, Escenario 1. ....	77
Figura 72. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración multiobjetivo espacio – temporal, escenario 2. ....	77
Figura 73. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración multiobjetivo espacio – temporal, Escenario 2. ....	77
Figura 74. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración multiobjetivo espacio – temporal, escenario 3. ....	77
Figura 75. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración multiobjetivo espacio – temporal. Escenario 3. ....	78
Figura 76. Ubicación de la parcela experimental (ZONA 1) seleccionada como primera zona para el análisis de impactos de los escenarios propuestos.....	84
Figura 77. Zonas definidas por uso de suelo específico para el análisis de .....	85
Figura 78. Boxplots de transpiración (mm/día) para los diferentes escenarios de gestión forestal - Parcela de experimental.....	86
Figura 79. Series de transpiración (mm/día) en los diferentes escenarios.....	86
Figura 80. Series de LAI (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ) en los diferentes escenarios de gestión.....	87
Figura 81. Boxplots de LAI (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ) en los escenarios de gestión.....	87
Figura 82. Boxplots de evapotranspiración (mm/día) en los escenarios de .....	88
Figura 83. Series de evapotranspiración (mm/día) en los diferentes escenarios de gestión forestal – Parcela de experimental. ....	88
Figura 84. Boxplots de humedad del suelo de la capa profunda (%) en los diferentes escenarios de gestión forestal – Parcela de experimental.....	89
Figura 85. Series de humedad en la capa profunda del suelo (%) en los diferentes escenarios de gestión forestal – Parcela de experimental.....	89

Figura 86. Boxplots de humedad del suelo de la capa superficial (/%) en los escenarios de gestión sobre la parcela de tratamiento. ....	90
Figura 87. Series de humedad en la capa superficial del suelo (%) en los diferentes escenarios de gestión forestal – Parcela de experimental.....	90
Figura 88. Series de percolación (mm/h) en los diferentes escenarios de gestión forestal – Parcela de experimental. ....	90
Figura 89. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de LAI ( $m^2/m^2$ ) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de pino carrasco. ....	91
Figura 90. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de LAI ( $m^2/m^2$ ) en los escenarios de gestión forestal para rodales de pinos carrasco muy jóvenes.....	91
Figura 91. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de LAI ( $m^2/m^2$ ) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas. ....	91
Figura 92. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de transpiración (mm/día) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de pino carrasco. ....	92
Figura 93. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de transpiración (mm/día) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.....	92
Figura 94. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de transpiración (mm/día) en los escenarios de gestión forestal para rodales de pinos carrasco muy jóvenes. ....	92
Figura 95. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de evapotranspiración (mm/día) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de pino carrasco. ....	92
Figura 96. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de evapotranspiración (mm/día) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas. ....	93
Figura 97. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de evapotranspiración (mm/día) en los escenarios de gestión forestal para rodales de pinos carrasco muy jóvenes. ....	93
Figura 98. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de humedad del suelo de la capa superficial (%) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de pino carrasco. .	93
Figura 99. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de humedad del suelo de la capa superficial (%) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.....	94
Figura 100. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de humedad del suelo de la capa superficial (%) en los escenarios de gestión forestal para rodales de pinos carrasco muy jóvenes .....	94
Figura 101. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de humedad del suelo de la capa profunda (%) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de pino carrasco. .	94
Figura 102. Series (izquierda) y boxplots (derecha) humedad del suelo de la capa profunda (%) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.....	94
Figura 103. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de humedad del suelo de la capa profunda (%) en los escenarios de gestión forestal para rodales de pinos carrasco muy jóvenes .....	95
Figura 104. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de percolación (mm/h) en los escenarios de gestión forestal, rodales de exclusión de pies de pino carrasco.....	95
Figura 105. Series (izquierda) y boxplots (derecha) percolación (mm/h) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.....	95
Figura 106. Series (izquierda) y boxplots (derecha) percolación (mm/h) en los escenarios de gestión forestal, Rodales muy jóvenes de pino carrasco. ....	95
Figura 107. Precipitación media mensual (izquierda) y porcentaje de días secos (derecha) de los modelos climáticos regionales respecto a los registrados en la cuenca del Carraixet.....	99
Figura 108. Temperatura promedio mensual máxima (izquierda) y mínima (derecha) de los modelos climáticos regionales respecto a los registrados en la cuenca del Carraixet .....	100

Figura 109. Temperatura media mensual de los modelos climáticos regionales respecto a los registrados en la cuenca del Carraixet (línea continua).....	100
Figura 110. Distribución de la precipitación y porcentajes de días secos tras la eliminación de lluvia espuria y ajuste de sesgo en los modelos climáticos regionales, variable climática observada (línea continua).....	102
Figura 111. Función de distribución acumulada de precipitación observada y proyectada por los modelos climáticos regionales sin ajuste de sesgo (izquierda) y con ajuste de sesgo (derecha) .....	103
Figura 112. Cuantiles de precipitación observada y proyectada por los modelos climáticos regionales sin ajuste de sesgo (izquierda) y con ajuste de sesgo (derecha).....	103
Figura 113. Series de temperatura media (°C) observadas en el periodo histórico tomado como referencia, años 1950-2005 (negro) y proyectadas por el modelo MPI-CSC-REMO2009-v1, desde el año 2006 hasta finalizar el centenario en los escenarios RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (verde) y RCP 8.5 (rojo).....	104
Figura 114. Series de temperatura media (°C) observadas en el periodo histórico tomado como referencia, años 1950-2005 (negro) y proyectadas con ajuste de sesgo por el modelo MPI-CSC-REMO2009-v1, desde el año 2006 hasta finalizar el centenario en los escenarios RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (verde) y RCP 8.5 (rojo). .....	105
Figura 115. Series de temperatura máxima (°C) observadas en el periodo histórico tomado como referencia, años 1950-2005 (negro) y proyectadas por el modelo MPI-CSC-REMO2009-v1, desde el año 2006 hasta finalizar el centenario en los escenarios RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (verde) y RCP 8.5 (rojo). .....	105
Figura 116. Series de temperatura máxima (°C) observadas en el periodo histórico tomado como referencia, años 1950-2005 (negro) y proyectadas con ajuste de sesgo por el modelo MPI-CSC-REMO2009-v1, desde el año 2006 hasta finalizar el centenario en los escenarios RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (verde) y RCP 8.5 (rojo). .....	105
Figura 117. Series de temperatura mínima (°C) observadas en el periodo histórico tomado como referencia, años 1950-2005 (negro) y proyectadas por el modelo MPI-CSC-REMO2009-v1, desde el año 2006 hasta finalizar el centenario en los escenarios RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (verde) y RCP 8.5 (rojo). .....	106
Figura 118. Series de temperatura mínima (°C) observadas en el periodo histórico tomado como referencia, años 1950-2005 (negro) y proyectadas con ajuste de sesgo por el modelo MPI-CSC-REMO2009-v1, desde el año 2006 hasta finalizar el centenario en los escenarios RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (verde) y RCP 8.5 (rojo). .....	106
Figura 119. Zonas para el análisis de impactos mediante la modelación de escenarios de cambio global con el modelo ecohidrológico TETIS.....	107
Figura 120. Cambios en el índice de área foliar (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados. ....	110
Figura 121. Cambios en la transpiración (mm/d) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados .....	112
Figura 122. Cambios en la evaporación desde el suelo desnudo (mm/d) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados. ....	113

Figura 123. Cambios en la evapotranspiración (mm/d) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados. ....	114
Figura 124. Cambios en la humedad del suelo en la capa superficial (%) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo que los tres periodos futuros seleccionados. ....	116
Figura 125. Cambios en la humedad del suelo en la capa profunda (%) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados. ....	117
Figura 126. Cambios en la percolación (mm/h) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados. ....	119
Figura 127. Cambios en el índice de área foliar ( $m^2/m^2$ ) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.....	122
Figura 128. Cambios el índice de área foliar ( $m^2/m^2$ ) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.....	123
Figura 129. Cambios en el índice de área foliar ( $m^2/m^2$ ) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.....	124
Figura 130. Cambios en la transpiración (mm/d) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados .....	125
Figura 131. Cambios en la transpiración (mm/d) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.....	126
Figura 132. Cambios en la transpiración (mm/d) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados .....	127
Figura 133. Cambios en la evaporación desde el suelo desnudo (mm/d) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizado a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.....	128
Figura 134. Cambios en la evaporación desde el suelo desnudo (mm/d) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados. ....	129

Figura 135. Cambios en la evaporación desde el suelo desnudo (mm/d) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo que los tres periodos futuros seleccionados. ....	130
Figura 136. Cambios en la evapotranspiración (mm/d) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.....	131
Figura 137. Cambios en la evapotranspiración (mm/d) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.....	132
Figura 138. Cambios en la evapotranspiración (mm/d) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados. ....	133
Figura 139. Cambios en la humedad del suelo en la capa superficial (%) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.....	134
Figura 140. Cambios en la humedad del suelo en la capa superficial (%) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados. ....	135
Figura 141. Cambios en la humedad del suelo en la capa superficial (%) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.....	136
Figura 142. Cambios en la humedad del suelo en la capa profunda (%) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizado a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.....	137
Figura 143. Cambios en la humedad del suelo en la capa profunda (%) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados. ....	138
Figura 144. Cambios en la humedad del suelo en la capa profunda (%) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.....	139
Figura 145. Cambios en la percolación (mm/h) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados. ....	140
Figura 146. Cambios en la percolación (mm/h) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.....	141

Figura 147. Cambios en la percolación (mm/h) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados. .... 142

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del modelo hidrológico TETIS .....	7
Tabla 2. Parámetros del sub-modelo de vegetación dinámica - TETIS .....	12
Tabla 3. Parámetros y factores correctores del sub-modelo hidrológico - TETIS .....	14
Tabla 4. Usos de suelo en la cuenca del Carraixet .....	26
Tabla 5. Estaciones meteorológicas e hidrológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet ..	28
Tabla 6. Caudales superiores a 1m <sup>3</sup> /s en la estación de aforo Carraixet – Bétera (2000-2020)	33
Tabla 7. Almacenamiento en cubierta vegetal por tipo de suelo .....	44
Tabla 8. Profundidades de raíces por tipo de suelo .....	47
Tabla 9. Valores de permeabilidad en función a la categoría .....	55
Tabla 10. Valores de permeabilidad en función a las categorías del mapa hidrogeológico .....	56
Tabla 11. Valores de los parámetros geomorfológicos de referencia determinados para la cuenca del Río Tajo (DIHMA, 2001).....	57
Tabla 12. Parámetros geomorfológicos utilizados en la modelación con TETIS en la cuenca del Carraixet. ....	58
Tabla 13. Denominación y situación geográfica de los manantiales considerados en la cuenca del Carraixet. ....	60
Tabla 14. Factores correctores iniciales y finales del submodelo hidrológico para una calibración monobjetivo temporal.....	64
Tabla 15. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS, referencia Sanchis, M et al. (2019). ....	65
Tabla 16. Factores correctores iniciales y finales del submodelo hidrológico para una calibración temporal multiobjetivo.....	67
Tabla 17. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS para una calibración multiobjetivo temporal.....	68
Tabla 18. Factores correctores iniciales y finales del submodelo hidrológico para una calibración monobjetivo espacio - temporal.....	71
Tabla 19. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS para una calibración monobjetivo espacio - temporal – Escenario 1. ....	72
Tabla 20. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS para una calibración monobjetivo espacio - temporal – Escenario 2. ....	73
Tabla 21. Índices de eficiencia para el periodo calibración y validación multiobjetivo espacio - temporal, escenarios 1,2 y 3. ....	75
Tabla 22. Factores correctores iniciales y finales del submodelo hidrológico para una calibración multiobjetivo espacio - temporal. ....	76
Tabla 23. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS para una calibración multiobjetivo espacio - temporal – Escenario 1. ....	79
Tabla 24. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS para una calibración multiobjetivo espacio - temporal – Escenario 2. ....	80
Tabla 25. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS para una calibración multiobjetivo espacio - temporal – Escenario 3. ....	81

Tabla 26. Consolidado de los diferentes índices de eficiencia en la etapa de calibración del modelo ecohidrológico TETIS .....	82
Tabla 27. Consolidado de los diferentes índices de eficiencia en la etapa de validación del modelo ecohidrológico TETIS .....	82
Tabla 28. Escenarios de gestión forestal en la cuenca del Carraixet .....	85
Tabla 29. Modelos CORDEX EUR 11° (2018) considerados para la obtención de las proyecciones de los modelos climáticos regionales (RCM) asimilables a la cuenca del Carraixet, en el marco de diferentes modelos de circulación global (GCM). .....	98
Tabla 30. Umbrales mensuales para la eliminación de lluvia espuria en las proyecciones de cambio climático de los diferentes modelos de circulación regional. ....	101
Tabla 31. Error entre la precipitación observada y la proyectada por los modelos de circulación regional, después de aplicarse el ajuste de sesgo.....	104
Tabla 32. Definición de escenarios de cambio global (global change, GC) en diferentes escenarios de gestión forestal (Forest management, FM) y de cambio climático (Climate change, CC) en la cuenca del Carraixet. ....	108
Tabla 33. Tendencia del LAI y de las variables hidrológicas ante escenarios de gestión forestal y cambio climático .....	120

---

## **CAPITULO 1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS**

---

## 1.1. INTRODUCCIÓN

La hidrología de una cuenca está estrechamente vinculada a la dinámica de la vegetación que encontramos en las mismas. En consecuencia, a lo largo de los últimos años la Ecohidrología ha cubierto la necesidad de comprender como los procesos ecológicos regulan e interactúan dentro del ciclo hidrológico. Este valor añadido en el conocimiento de los procesos físicos permite adoptar alternativas de gestión más variadas y versátiles con el fin de mejorar la sostenibilidad ambiental (Zalewski, M.2010).

Se conoce que la vegetación juega un papel importante en el ciclo hidrológico, debido a que la evapotranspiración real puede llegar a representar hasta un el 95% de la precipitación en una cuenca (Pilgrim *et al.*, 1988). Muchos modelos hidrológicos representan muy bien los caudales observados en una cuenca hidrográfica, pero, generalmente, estos consideran la vegetación como un parámetro estático descuidando de esta forma su interacción con el agua y su dinámica en el tiempo (Snyder *et al.*,2000)

Realizar una proyección hidrológica es una tarea muy compleja y difícil de representar, debido a que los fenómenos que se presentan en la naturaleza son complejos. Sin embargo, los modelos hidrológicos permiten representar de forma simplificada cada una de las partes del sistema hidrológico (Chow, Maidment and Mays,1994). Asimismo, los modelos distribuidos como TETIS permiten representar la variabilidad espacial de los fenómenos involucrados dentro del ciclo hidrológico a partir de sus inputs y parámetros. Además, permiten obtener resultados en cualquier lugar de la cuenca sin necesidad de emplear metodologías de interpolación.

La calibración de un modelo hidrológico es una etapa muy importante para encontrar los parámetros efectivos que permitirán caracterizar el comportamiento hidrológico en la cuenca (Duan, Q *et al.*, 1998). Tradicionalmente la función objetivo en la calibración de un modelo hidrológico compara los caudales simulados con los caudales observados en una o varias estaciones de aforo. Sin embargo, si no se tiene la experiencia necesaria para evaluar los resultados obtenidos podemos caer en un error de equifinalidad, en donde podemos encontrar diferentes conjuntos de parámetros óptimos que representan hidrologías diferentes (Beven and Freer, 2001).

La existencia de imágenes de satélite desde los años setenta ha permitido que en la actualidad se disponga de una gran base de datos adecuada para los estudios ecohidrológicos. Destacan dentro de éstas la evapotranspiración real (Herman, M *et al.*, 2018) temperatura superficial (Vlassova L., 2016), humedad del suelo (Drusch *et al.*, 2001) y el índice de área foliar (Morais, D *et al.*, 2014), no siendo los únicos recursos disponibles. Además, debido a la importancia de la humedad del suelo en la dinámica de la vegetación y en los procesos hidrológicos se ha optado por incluirla como variable de estado en la etapa de calibración del modelo ecohidrológico TETIS.

Por otro lado, el análisis del clima a nivel mundial nos muestra una tendencia al calentamiento (IPCC, 2013), lo que dará lugar a que se modifique la distribución y crecimiento de las especies vegetales. Algunos estudios mencionan que para evaluar la vulnerabilidad del crecimiento de la vegetación ante los efectos del cambio climático se podría analizar la sensibilidad del crecimiento de los árboles y su capacidad de adaptación (Lindner, M *et al.* 2010). Particularmente en zonas altas de la cuenca un aumento de la temperatura extenderá la temporada de crecimiento arbóreo y por ende la fotosíntesis (Wullschleger *et al.* 2002).

Asimismo, en Europa el aumento del periodo de crecimiento de los bosques templados durante el siglo XX está relacionado con el calentamiento (Peñuelas y Filella 2001). Sin embargo, en lugares donde la disponibilidad de agua es un factor limitante de la productividad, se espera que el crecimiento de los bosques disminuya debido a las sequías, especialmente si el régimen de precipitación disminuye (Loustau *et al.* 2005).

## **1.2. OBJETIVO GENERAL**

Calibrar un modelo ecohidrológico en la cuenca de Carraixet para evaluar el comportamiento de las variables hidrológicas y la dinámica de la vegetación ante escenarios de gestión forestal en el marco de diferentes proyecciones de los escenarios de cambio climático más probables.

### **1.2.1. Objetivos específicos.**

- i. Calibrar y validar el modelo ecohidrológico TETIS mediante un enfoque mono objetivo, utilizando como variables de estado el caudal en la estación de aforo Bétera, el índice de área foliar y la humedad del suelo obtenida por teledetección para la estimación de caudales en cuencas no aforadas.
- ii. Realizar la calibración y validación del modelo ecohidrológico TETIS mediante un enfoque multiobjetivo, empleando las siguientes combinaciones: caudal – error en volumen, caudal – humedad del suelo, caudal – índice de área foliar y, por último, humedad del suelo – índice de área foliar.
- iii. Analizar el comportamiento de las variables hidrológicas de la cuenca ante escenarios de gestión forestal.
- iv. Analizar el comportamiento de las variables hidrológicas de la cuenca ante escenarios de gestión forestal y cambio climático.

---

## **CAPITULO 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO TETIS**

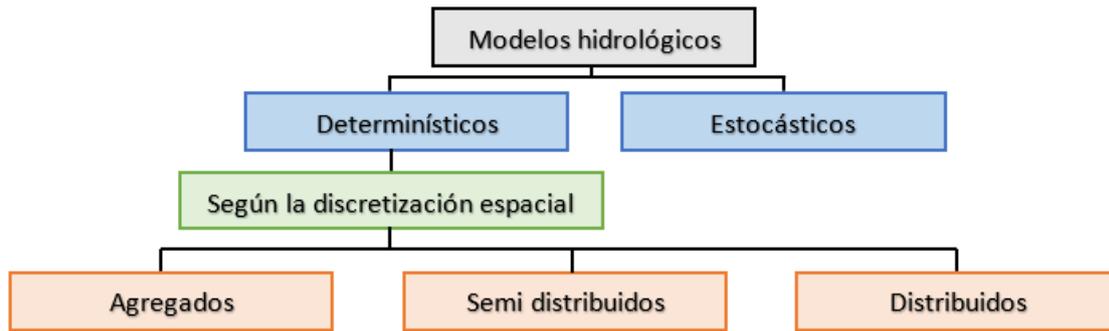
---

## 2.1. MODELO HIDROLÓGICO

Los modelos hidrológicos son una caracterización simplificada de la realidad. Además, permite al modelador tener una mayor comprensión de los procesos hidrológicos que gobiernan un sistema en el mundo real. Las aplicaciones de los modelos hidrológicos dependen en gran medida de los objetivos para los que se va a utilizar. En muchas ocasiones son una gran herramienta para toma de decisiones enfocadas a la operación y planificación tal como: predicción y advertencia de inundaciones en tiempo real, evaluación de impacto del cambio climático, evolución de la vegetación, gestión integrada de cuencas hidrográficas, etc. (Sorooshian *et al.* 2002).

Para hacer una representación del sistema que se desea simular, el hidrólogo normalmente hace uso de modelos específicos y dada su concepción podrán ser clasificados como estocásticos o determinísticos (Campos, A. 1998). Los modelos estocásticos no poseen una base física y sus resultados son procesos aleatorios controlados por leyes de probabilidad (Kaczmarek, 1976) en cambio los modelos determinísticos describen, a partir de expresiones analíticas, las interacciones físicas de los diferentes componentes del ciclo hidrológico (Singh, 1986). En estos modelos las variables de entrada tal como la precipitación, contenido de humedad y otros, tratan de combinarse para producir como datos de salida la escorrentía, variación del contenido de humedad, nivel freático, etc.

De acuerdo con la discretización espacial, los modelos hidrológicos pueden ser clasificados como agregados, semi distribuidos o distribuidos. Los modelos hidrológicos agregados no consideran la variabilidad espacial y representan al sistema hidrológico como una unidad siendo sus parámetros valores medios para toda la cuenca (Segura, M.2017). Además, a medida que el tamaño de la cuenca se incrementa, estos modelos van perdiendo representatividad debido a que las características del suelo, variables meteorológicas y otros varían a lo largo y ancho de la cuenca. En consecuencia, en grandes superficies es preferible emplear modelos semi distribuidos en los que se desagrega la cuenca en zonas de similar comportamiento hidrológico, analizando cada una de ellas de manera independiente, para después combinar sus efectos (Crooks, S.M. y Naden, P.S.,2007). Sin embargo, a pesar de que un modelo semi distribuido llega a representar mejor las variaciones de la pendiente, características del suelo entre otros, sigue siendo una simplificación frecuentemente insuficiente. Por lo tanto, para lograr una mayor representatividad, la cuenca se debe dividir en áreas mucho más pequeñas. Surge por consiguiente la necesidad de aplicar modelos distribuidos, los cuales trabajan a tamaño de celda o píxel realizando en cada una de ellas un balance hidrológico donde su efecto se va transmitiendo a cada píxel adyacente (Ocio, *et al.*, 2019). La figura 1 muestra de forma esquematizada la clasificación descrita líneas arriba.



**Figura 1 Clasificación de modelos útiles en hidrología**

## 2.2. MODELO ECO-HIDROLÓGICO TETIS

TETIS es un modelo de simulación hidrológica distribuida, desarrollado por la Universitat Politècnica de València (UPV) y por el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA). TETIS posee diferentes tipos de sub-modelos que permiten simular el comportamiento hidrológico en una cuenca, el efecto de embalses, el riego agrícola, la dinámica de la vegetación y por último la evolución del ciclo del fósforo y nitrógeno (Echevarría, 2020). Para el presente trabajo, se han utilizado los sub - modelos hidrológico y de vegetación dinámica. Además, por ser un modelo distribuido TETIS incorpora convenientemente la variabilidad espacial del ciclo hidrológico, por ende, necesita como información de partida datos observados que permitan su calibración.

### 2.2.1. Generación de la información espacial.

Debido a que frecuentemente la densidad de la red meteorológica dentro de la cuenca es baja y dispersa, TETIS utiliza el método de la inversa de la distancia al cuadrado para la generación de la distribución espacial de las variables meteorológicas (teniendo en cuenta las diferencias de altitud en caso de considerarse necesario). No obstante, un problema común que afecta a este tipo de información es la interferencia que se ocasiona cuando se dispone de un número elevado de estaciones. Por tanto, para evitar este tipo de problemas, TETIS realiza la interpolación hasta un número determinado de estaciones más cercanas al punto de interés acelerando el funcionamiento del modelo. Asimismo, se sugiere emplear un máximo de seis estaciones. Las variables meteorológicas interpoladas en este estudio son: Precipitación, temperatura, evapotranspiración y radiación solar.

### 2.2.2. Producción de escorrentía.

TETIS es un modelo conceptual que realiza la producción de escorrentía a escala de celda. En la esquematización del modelo el flujo vertical se reparte a través de seis niveles representados por tanques en donde la producción de escorrentía y las variables de estado se obtiene mediante un equilibrio hidrológico (Orozco *et al.*, 2019). Lo anteriormente mencionado se puede observar en la figura 2. Si lo que se desea representar es un modelo de evento, el intervalo de tiempo debe estar entre 10 minutos y 1 hora. De lo contrario en cualquier otra escala espacio- temporal los valores de los parámetros presentados en la tabla 1 sufrirán los efectos de escala. Si se desea trabajar en una modelación continua con un periodo largo de tiempo el intervalo puede ser hasta 1 día como máximo.

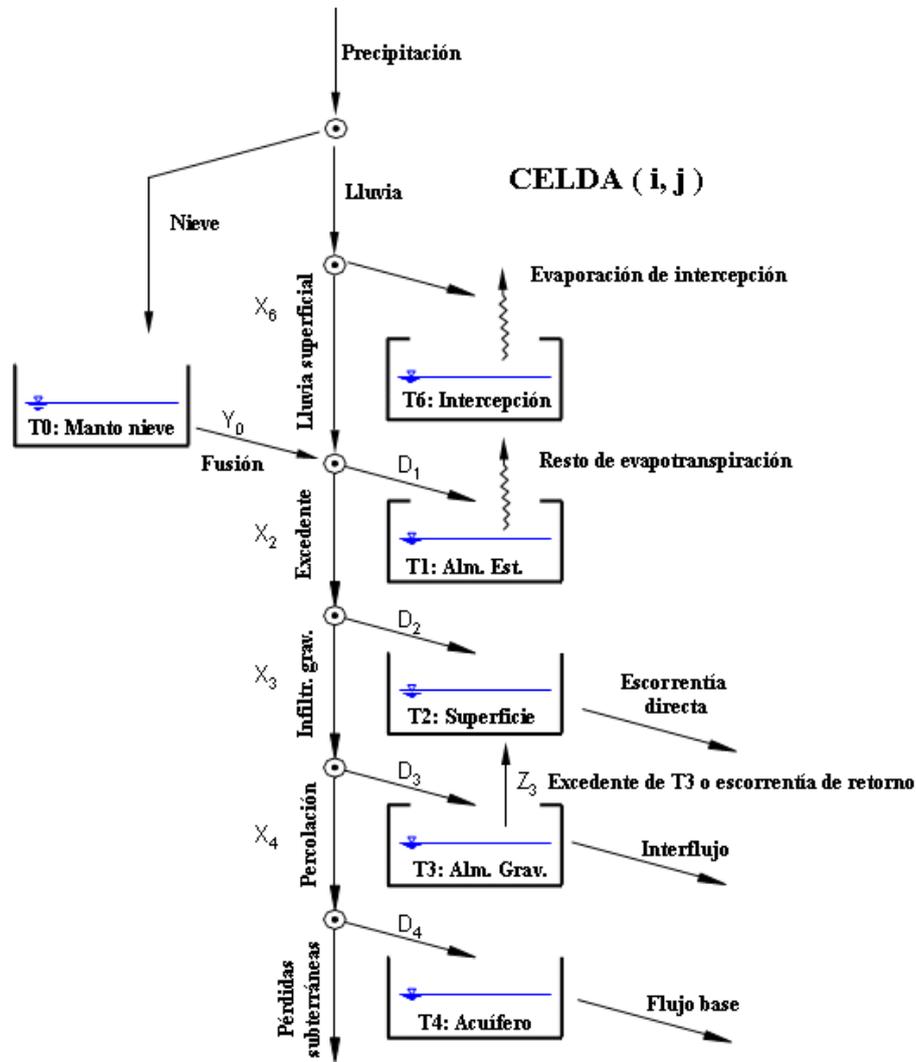


Figura 2. Esquema conceptual del ciclo del agua a nivel de celda del modelo TETIS

Tabla 1. Parámetros del modelo hidrológico TETIS

Parámetro	Unidad
Almacenamiento estático máximo	mm
Evapotranspiración	mm/día
Infiltración	mm/h
Escorrentía directa	mm
Percolación	mm/h
Interflujo	mm/h
Percolación profunda	mm/h
Flujo base	mm/h
Velocidad en red fluvial	m/s

En la figura 3 se observa el comportamiento del flujo horizontal en el modelo TETIS. El mapa de direcciones de flujo estimado por el modelo de elevación digital indica la trayectoria de la escorrentía directa, interflujo y flujo base. Asimismo, estas aguas son drenadas hasta alcanzar la

red de drenaje conformada por barrancos y cauces. La máxima longitud en la interconexión de cada tanque es establecida por el usuario, para el flujo subsuperficial y la escorrentía la longitud se estimada mediante el tamaño de las laderas. Sin embargo, cuando esta longitud es estimada para el flujo base se debe tener en cuenta el punto de origen del flujo permanente en el río (Velez, 2003).

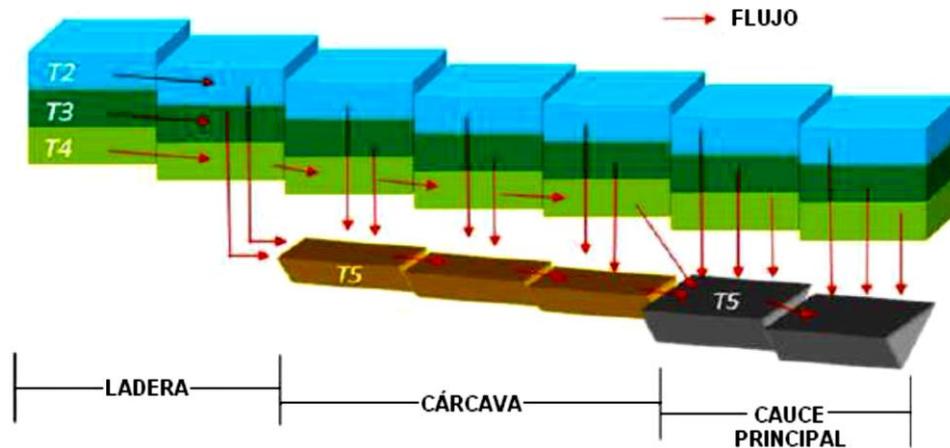


Figura 3. Esquema del movimiento horizontal del flujo en el modelo TETIS

### 2.2.3. Traslación de la escorrentía.

Para realizar la traslación de escorrentía, TETIS emplea elementos de geometría hidráulica. De esta manera realiza un análisis hidráulico de transferencia entre celdas evitando recurrir a simplificaciones excesivas a escala de cuenca. Por otro lado, este tipo de análisis evita trabajar con grandes volúmenes de información lo cual puede ser bastante costoso. Por tanto, con esta metodología se busca aprovechar al máximo la información disponible.

La traslación de la escorrentía considera que el agua no abstraída se mueve a través de las laderas hasta encontrar algún canal perteneciente a la red de drenaje de la cuenca. Este cálculo se puede realizar aplicando las leyes de la hidráulica en cauces naturales o mediante simplificaciones conceptuales. TETIS emplea el método de la Onda Cinemática Geomorfológica (OCG) que no es más que una simplificación de la ecuación de Saint-Venant al despreciar los términos inerciales y de presión en la ecuación de conservación de la energía (Velez *et al.*, 2009).

Por último, la metodología de la OCG, permite obtener las características hidráulicas de los cauces mediante los parámetros propios de la cuenca que son extraídos de la información geomorfológica de la cuenca.

Las relaciones geomorfológicas que emplea TETIS para el movimiento del agua en cárcavas y cauce contienen 9 parámetros, tal como se detalla a continuación:

#### ❖ Caudal – Sección llena

$$Q_b = k * \Lambda^\varphi \quad (2.1)$$

Donde:

$Q_b$  = Caudal a seccion llena, en  $m^3/s$

$\Lambda$  = Área acumulada de la cuenca, en  $Km^2$

$k$  y  $\varphi$  = Constantes, adimensional.

❖ **Ancho de la sección transversal a sección llena – Caudal a sección llena**

$$w_b = c_1 * Q_b^{\varepsilon_1} \quad (2.2)$$

Donde:

$w_b$  = Ancho de la sección transversal a sección llena, en m.

$Q_b$  = Caudal a sección llena, en  $m^3/s$ .

$c_1$  y  $\varepsilon_1$  = Constantes, adimensional.

❖ **Ancho de la sección transversal – Caudal**

$$w_t = c_2 * Q_t^{\varepsilon_2} \quad (2.3)$$

Donde:

$w_t$  = Ancho de la sección transversal, en m.

$Q_t$  = Caudal, en  $m^3/s$ .

$c_2$  y  $\varepsilon_2$  = Constantes, adimensional.

❖ **Diámetro del sedimento – Pendiente - Calado**

$$d = c_d * (y * S_o)^\theta \quad (2.4)$$

Donde:

$d$  = Diámetro característico del sedimento, en mm.

$y$  = Calado, en m.

$S_o$  = Pendiente, adimensional.

$c_d$  y  $\theta$  = Constantes, adimensional.

❖ **Coefficiente de rugosidad - Diámetro del sedimento**

$$n = c_n * d^\xi \quad (2.5)$$

Donde:

$n$  = Coeficiente de rugosidad, adimensional.

$d$  = Diámetro característico del sedimento, en mm.

$c_n$  y  $\xi$  = Constantes, adimensional.

**2.2.4. Sub – modelo ecohidrológico de intercepción y almacenamiento estático**

Con respecto a la esquematización clásica de TETIS la incorporación del submodelo de vegetación dinámica modifica los tanques de intercepción y almacenamiento estático. En el primer tanque se simula el agua retenida por la vegetación y su salida por evaporación directa (Ruiz-Pérez, 2016). El balance es representado por las ecuaciones (2.6), (2.7) y (2.8) que se muestran a continuación:

$$I_t^* = I_{t-1} + \min(Ppt * \Delta t, I_{max} * f_c - I_{t-1}) \quad (2.6)$$

$$EI_t * \Delta t = \min(ET_{0,t} * \Delta t, I_t) \quad (2.7)$$

$$I_t = I_t^* - EI_t * \Delta t \quad (2.8)$$

Donde:

$I$  = Intercepción ( $I^*$  es un paso intermedio), en mm.

$t$  = Tiempo, en días.

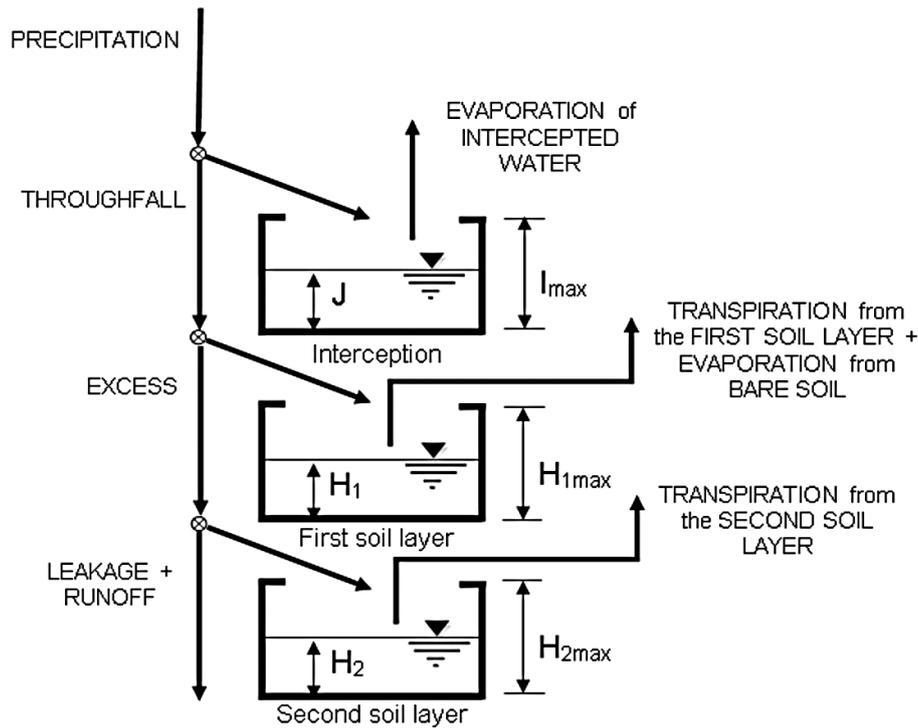
$P_{pt}$  = Precipitación, en mm/día.

$I_{max}$  = Intercepción máxima, en mm.

$f_c$  = Fracción de cobertura, adimensional.

$EI$  = Evaporación desde la intercepción, mm/día.

$ET_0$  = Evapotranspiración de referencia, mm/día.



**Figura 4.** Esquema del sub-modelo hidrológico (Extraído de Pasquato, 2013)

El tanque de almacenamiento estático (zona efectiva de raíces) es dividido en 2 capas. La primera permite simular la transpiración de las raíces más superficiales y los procesos de evaporación del suelo desnudo. La segunda capa representa la transpiración por parte de las raíces más profundas, ver figura 4. Para ambos casos la transpiración es calculada siguiendo las recomendaciones la FAO. Las ecuaciones de balance en las zonas de raíces son las siguientes:

$$H_{1,t}^* = H_{1,t-1} + \min(Thr * \Delta t, H_{1,max} - H_{1,t-1}) \quad (2.9)$$

$$E_{bs,t} * \Delta t = \min((ET_{0,t} - EI_t) * \Delta t * (1 - f_c) * \beta(H_1)_{bs,t}, H_{1,t}^*) \quad (2.10)$$

$$T_{1,t} * \Delta t = \min((ET_{0,t} - EI_t) * \Delta t * f_c * \beta(H_1)_t * \min(1, LAI) * Z_1, H_{1,t}^*) \quad (2.11)$$

$$H_{1,t} = H_{1,t}^* - E_{bs,t} * \Delta t - T_{1,t} * \Delta t \quad (2.12)$$

$$H_{2,t}^* = H_{2,t-1} + \min(Excess * \Delta t, H_{2,max} - H_{2,t-1}) \quad (2.13)$$

$$T_{2,t} * \Delta t = \min((ET_{0,t} - EI_t) * \Delta t * f_c * \beta(H_2)_t * \min(1, LAI) * Z_2, H_{2,t}^*) \quad (2.14)$$

$$H_{2,t} = H_{2,t}^* - T_{2,t} * \Delta t \quad (2.15)$$

Donde:

Los subíndices 1 y 2 representan la capa superficial y profunda del suelo.

$H_1$  = Almacenamiento estático de la capa de suelo  $i$ , en mm.

$H_{max}$  = Almacenamiento estático máximo de la capa de suelo  $i$ , en mm.

$Thr$  = Trascolución, mm/día.

$E_{bs}$  = Evaporación desde suelo desnudo, en mm/día.

$\beta(H_i)$  = Factor de estrés hídrico, adimensional.

$LAI$  = Índice de área foliar, ( $m^2/m^2$ ).

$Z_i$  = Proporción de raíces presente en la capa de suelo  $i$ , adimensional.

$Excess$  = Flujo vertical entre la primera y segunda capa de suelo  $i$ , en mm/día.

$T_i$  = Transpiración en la capa de suelo  $i$ , en mm/día.

### 2.2.5. Sub-modelo de vegetación: LUE-Model

El comportamiento temporal de la biomasa en la vegetación es simulado empleando un balance de masas basado en los procesos fotosintéticos (Arora, 2002; Polley *et al.*, 2011). Éstos son simulados a partir de *Radiación absorbida fotosintéticamente activa* (APAR por sus siglas en inglés) y el *índice de eficiencia de uso de luz* (LUE por sus siglas en inglés).

Muchas investigaciones emplean el índice LUE para la estimación de biomasa, que no es más que la proporción entre la producción de biomasa de la planta y la APAR en condiciones óptimas. No obstante, las condiciones de estrés en la planta pueden llegar a afectar esta eficiencia, siendo los factores claves de esta variación: la temperatura del aire, la humedad del suelo y los niveles de nutrientes. La biomasa foliar es simulada mediante el LUE-Model con la ecuación (2.16) mostrada a continuación (Pasquato, M *et al.*, 2015):

$$\frac{dB_l}{dt} = (LUE * \varepsilon * PAR * fPAR - (Re * 10^{-3})) * \varphi(B_l) - k_l * B_l \quad (2.16)$$

Donde:

$B_l$  = Biomasa foliar, en  $kg/m^2$ .

$LUE$  = Eficiencia de uso de luz, en  $kg/Mj$ .

$\varepsilon$  = Reducción del LUE debido a las fuentes de estrés, adimensional.

$PAR$  = Radiación fotosintética activa, en  $Mj/(m^2 \cdot día)$ .

$fPAR$  = Fracción de la radiación fotosintética activa absorbida, adimensional.

$Re$  = Respiración, en  $gC/(m^2 \cdot día)$ .

$\varphi(B_l)$  = Factor de distribución de biomasa, adimensional.

$k_l$  = Constante natural de senescencia, adimensional.

La ecuación (2.17) de la constante de distribución de la biomasa es determinada considerando el máximo LAI sostenible en el sistema.

$$\varphi_l = 1 - \frac{LAI}{LAI_{max}} \quad (2.17)$$

Asimismo, para calcular la respiración TETIS se basa en la relación carbono(C): nitrógeno (N), fenología y temperatura del aire (Sitch *et al.*, 2003). El modelo emplea la ecuación (2.18) como una variante de la ecuación de Arrhenius con el fin de incluir la temperatura en la estimación de

la respiración, usando una relación fija C: N igual a 29. Para calcular la biomasa el modelo emplea la siguiente proporción: 1gC es igual a 2.2g de biomasa seca (Montaldo *et al.*, 2005).

$$R_e = \frac{rRes * B_l}{2.2 * 29} * e^{308.56 * \left[ \frac{1}{56.02} - \frac{1}{T+46.02} \right]} \quad (2.18)$$

Donde:

$R_e$  = Respiración, en gC/(m<sup>2</sup>. día).

$rRes$  = ratio de respiración, en gC/gN

$T$  = Temperatura media diaria, en °C en grados centígrados

Para el cálculo de la fPAR se emplea la ley de Beer-Lambert tal como se muestra en la ecuación (2.19):

$$fPAR = 0.95 * (1 - e^{-k*LAI}) \quad (2.19)$$

Donde:

$k$  = Coeficiente de extinción luminica, adimensional.

No obstante, el LAI es simulado mediante la ecuación (2.20) tal como se muestra a continuación:

$$LAI = B_l * SLA * f_c \quad (2.20)$$

Donde:

$SLA$  = Área foliar específica, en m<sup>2</sup>/kg

$f_c$  = Fracción de cobertura, adimensional.

Por último, la tabla 2 muestra los parámetros a calibrar en el submodelo de vegetación dinámica.

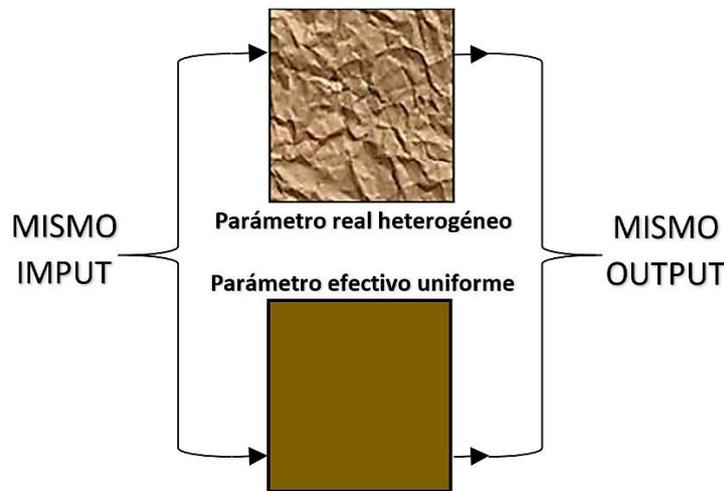
**Tabla 2. Parámetros del sub-modelo de vegetación dinámica - TETIS**

Símbolo TETIS	Nombre	Unidad
ExpFDisp	Coeficiente de disponibilidad de agua	Adimensional
ExpFestres	Coeficiente de reducción del LUE debido a fuentes de estrés	Adimensional
Alm max	Almacenamiento máximo foliar	mm
% Raíces	Distribución de raíces	[0-1]
Kdecay	Constante natural de senescencia	Adimensional
T° opt	Temperatura media óptima	°C
LUE	Eficiencia de uso de luz	Kg/Mj
rResp	Ratio de respiración C:N	gC/gN día
Kmuerte	Coeficiente de extinción de la luz	Adimensional
SLA	Área foliar específica	m <sup>2</sup> /kg
LAI max	Índice de área foliar máximo	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
f <sub>c</sub>	Factor de cobertura	[0-1]

### 2.2.6. Estructura de parámetros del modelo

Los parámetros de un modelo permiten representar el sistema a modelar y pueden ser dinámicos o invariables en el tiempo. No obstante, los parámetros relacionados al medio físico tal como los suelos y litología son frecuentemente considerados como constantes en el tiempo (Puricelli, 2003). Debido a que TETIS trabaja sobre una malla con celdas de dimensiones regulares, la caracterización de cada celda es representada con un valor homogéneo del parámetro.

Para que las salidas del modelo se asemejen a los valores observados, se tiene que realizar un ajuste de los parámetros. Sin embargo, al realizar este proceso estamos obteniendo parámetros efectivos, ver figura 5, donde el significado físico del parámetro se pierde ya que no estaríamos representando el valor del punto, sino algo equivalente a un valor promedio para la celda (Grayson and Blöschl, 2001).



**Figura 5. Descripción esquemática de un parámetro efectivo  
(Extraído de Grayson y Blöschl, 2001)**

Los parámetros efectivos permiten corregir los problemas conceptuales vinculados al valor puntual de un parámetro. Además, reproducen el comportamiento de un área o volumen finito. Por tanto, no pueden medirse puntualmente y tampoco relacionarse con mediciones puntuales (Bussi, 2014).

En TETIS la calibración no se realiza directamente mediante la modificación del valor del parámetro, sino gracias a un factor corrector que multiplicara a dicho parámetro, siendo este factor corrector el mismo para todas celdas del parámetro que se desea calibrar. Los factores correctores ayudan a corregir los errores provenientes de la cantidad y calidad de los datos, el error del modelo, etc. La ecuación (2.21) muestra la estructura separada del parámetro efectivo.

$$P_{i,j}^* = FC_i * P_{i,j} \quad (2.21)$$

Donde:

$i = 1, 2, \dots, n$

$n = \text{Número total de parámetros por celda}$

$j = 1, 2, \dots, m$

$m$  = Número de total celdas

$P_{i,j}^*$  = Parámetro efectivo  $i$  – énesimo para la celda  $j$

$FC_i$  = Factor corrector del parámetro  $i$ , común para todas la celdas

$P_{i,j}$  = Parámetro estimado para la celda  $j$

La tabla 3, muestra los parámetros y factores correctores del sub-modelo hidrológico en TETIS.

**Tabla 3. Parámetros y factores correctores del sub-modelo hidrológico - TETIS**

Factor Corrector	Parámetro	Parámetro efectivo
FC <sub>1</sub>	Almacenamiento estático del suelo	$H_u^* = FC_1 * H_u$
FC <sub>2</sub>	Evapotranspiración	$fc^* = FC_2 * fc$
FC <sub>3</sub>	Capacidad de infiltración	$K_s^* = FC_3 * K_s$
FC <sub>4</sub>	Velocidad de ladera	$v_t^* = FC_4 * v_t$
FC <sub>5</sub>	Capacidad de percolación	$k_p^* = FC_5 * k_p$
FC <sub>6</sub>	Conductividad hidráulica del interflujo	$k_{ss}^* = FC_6 * k_{ss}$
FC <sub>7</sub>	Capacidad de flujo subterráneo profundo	$k_{ps}^* = FC_7 * k_{ps}$
FC <sub>8</sub>	Conductividad hidráulica del flujo base	$k_{sa}^* = FC_8 * k_{sa}$
FC <sub>9</sub>	Velocidad de flujo en cauce	$v_{(t)}^* = FC_9 * v_{(t)}$

## 2.2.7. Algoritmos de calibración automática

### 2.2.7.1. Algoritmo de calibración automática SCE-UA.

El algoritmo de calibración Shuffled Complex Evolution - University of Arizona (SCE-UA) fue descrito por Duan, *et al* (1992) en la aplicación de modelo hidrológicos. Constataron que debido a la existencia de muchos óptimos locales, las metodologías de calibración automática tal como el método Simplex de Nelder y Mead o Rosenbrock (Rosenbrock, 1960), no eran capaces de ubicar el óptimo global. Sin embargo, el método de SCE-UA fue capaz de encontrar consistentemente el óptimo global, llegando a la conclusión que el algoritmo de SCE-UA es capaz de resolver eficiente y efectivamente los problemas de optimización de los modelos conceptuales lluvia – escorrentía.

El modelo TETIS integra en su método de calibración automática el algoritmo de SCE-UA para determinar del conjunto de factores correctores óptimos en el modelo, de esta manera con la estimación de los factores correctores no se pierde la variabilidad espacial de la característica hidrológicas (Francés *et al.*, 2007).

Las funciones objetivo que emplea TETIS para la calibración de los parámetros son: El error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en ingles), error en volumen (VE por sus siglas en ingles) y el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE por sus siglas en inglés) tal como se muestra en las ecuaciones (2.22), (2.23) y (2.24) respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{t,obs} - Q_{t,sim})^2}{n}} \quad (2.22)$$

$$VE = \frac{V_0 - V_p}{V_0} * 100\% \quad (2.23)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{t,sim} - Q_{t,obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{t,obs} - \bar{Q})^2} \quad (2.24)$$

Siendo:

$V_0$  = Volumen total observado, en  $Hm^3$ .

$V_p$  = Volumen total simulado, en  $Hm^3$ .

$n$  = Periodo de duracion de la calibración, días.

$Q_{t,obs}$  = Caudales observados en el tiempo  $t$ , en  $m^3/s$ .

$Q_{t,sim}$  = Caudales simulados en el tiempo  $t$ , en  $m^3/s$ .

$\bar{Q}$  = Valor medio del caudal observado, en  $m^3/s$ .

### 2.2.7.2. Algoritmo de calibración automática MOSCEM-UA.

El algoritmo de calibración MOSCEM-UA fue desarrollado en conjunto entre la universidad Arizona y la universidad de Ámsterdam. El criterio de optimización evolutiva que utiliza el algoritmo de MOSCEM-UA es muy semejante a la del SCE-UA; sin embargo; este se basa en una optimización multiobjetivo (Martin, M.J., *et al.*, 2009).

MOSCEM-UA utiliza el concepto de dominancia de Pareto para evolucionar la población inicial de puntos hacia un conjunto de soluciones que derivan de una distribución estable. El algoritmo se puede resumir en tres pasos: Primero, el vector multiobjetivo  $F(\mathbf{U})$  se calcula para cada punto utilizando una población inicial distribuida uniformemente (de conjuntos de parámetros) de tamaño  $S$ . Después de clasificar la población por valor de aptitud, se divide en un número predefinido de complejos y dentro de cada complejo se inicializa una cadena de Markov (secuencia). Posteriormente, en el segundo paso, estas secuencias evolucionan utilizando su ubicación actual y la covarianza inducida entre los distintos individuos del complejo. El tercer paso comprende la reorganización de los complejos. Finalmente, los miembros de los complejos se combinan en la población "nueva" y se clasifican en orden de valor de aptitud decreciente. Si se satisface el criterio de convergencia, el algoritmo se detiene; de lo contrario, vuelve al segundo paso (Thomas, W., *et al.*, 2008).

### 2.2.8. Funciones empíricas ortogonales

Las EOF (Empirical Orthogonal Functions) o PCA (Principal Component Analysis) nos permite analizar la variabilidad espacial y temporal de una o más variables sobre superficies extensas. Asimismo, diversos estudios han demostrado con éxito, que el empleo que las EOF es muy útil para analizar los patrones espacio – temporales del suelo, vegetación y atmósfera (Fang, Z., *et al.*, 2015). Ruiz-Pérez *et al.* (2017) utilizó la EOF para la calibración del modelo TETIS empleando la asociación entre el LAI y el NDVI para la determinación de los patrones espaciales.

La metodología de las EOF se basa en resolver un sistema de ecuaciones diferenciales lineales, las mismas que están sujetas a unas condiciones de contorno. A continuación, se detalla la metodología empleada:

a) Creación de una matriz R

$$R = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \dots & R_{1,t} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & \dots & R_{2,t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{s,1} & R_{s,2} & \dots & R_{s,t} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Donde:

s= Número de filas, representa al mapa en el paso de tiempo t

t = Numero de columnas, representa la variación temporal de los datos en los pixeles.

b) Cálculo de la matriz M, que representa los valores medio de cada mapa en el paso en el tiempo t.

$$M = [M_1 \ M_2 \ M_3 \ \dots \ M_t] \quad (2.26)$$

c) Creación y cálculo de la matriz de anomalías W, para su construcción se debe restar a cada valor de la matriz R su respectivo valor medio proporcionado por la matriz M.

$$W = \begin{bmatrix} W_{1,1} = R_{1,1} - M_1 & W_{1,2} = R_{1,2} - M_2 & \dots & W_{1,t} = R_{1,t} - M_t \\ W_{2,1} = R_{2,1} - M_1 & W_{2,2} = R_{2,2} - M_2 & \dots & W_{2,t} = R_{2,t} - M_t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{s,1} = R_{s,1} - M_1 & W_{s,2} = R_{s,2} - M_2 & \dots & W_{s,t} = R_{s,t} - M_t \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

d) Determinación de los autovalores y calculo de matriz de covarianza

$$CO = W^T * W \quad (2.28)$$

$$CO * A = A * D \quad (2.29)$$

Donde:

CO = Matriz de correlación.

A = Matriz de autovectores.

D = Matriz diagonal que contiene los autovalores de la matriz de correlación CO.

e) Cuando analizamos los autovectores podemos observar que estos se encuentran ordenados en función a sus autovalores. Asimismo, el primer autovector OEF<sub>1</sub> es quien posee la mayor parte de varianza explicada. Generalmente se eligen n autovalores con sus correspondientes autovalores para explicar la mayor parte de la varianza, siendo n mucho menor al número de columnas t de la matriz R.

Es necesario mencionar que la metodología de las EOF será aplicada en la presente investigación para el apartado de calibración del modelo, mediante una configuración monoobjetivo y multiobjetivo. Asimismo, el número de componentes principales que se emplearán; será una cantidad que expliquen al menos el 95 % de la varianza.

### 2.2.9. Función objetivo espacio temporal STE = f(LAI)

Si tomamos como referencia para nuestra calibración el índice de área foliar (LAI), el algoritmo de optimización que se empleará será el SCE-UA, en este tipo de algoritmo el criterio de parada

se dará, cuando la diferencia entre el valor de la función objetivo (FO) de la última y penúltima iteración sea igual o menor que 0.001.

El índice de eficiencia espacio – temporal (STE, Space-Time Efficiency Index) empleado como función objetivo para la presente investigación se muestra en la ecuación (2.30). Así mismo, el STE varía entre  $-\infty$  y 1.

$$STE = \sum_{i=1}^{pc} [w_i * NSE(load_i)] \quad (2.30)$$

Donde:

- $STE$  = Índice de eficiencia espacio – temporal.  
 $w_i$  = varianza explicada en la componente principal  $i$ .  
 $NSE(load_i)$  = Índice de eficiencia de nash y sutcliffe de los loading observados y simulados obtenidos por la metodología de la EOF.  
 $pc$  = Número de componentes principales.

#### 2.2.10. Configuración de la calibración automática

Se realizaron cuatro tipos calibración automática con los siguientes enfoques:

##### 2.2.10.1. Calibración monoobjetivo temporal

En este tipo de calibración se ha tomado al caudal como variable de estado, siendo la función objetivo  $FO = NSE(Q)$ , el algoritmo de optimización utilizado fue el SCE-UA y su criterio de convergencia se basó en que la diferencia entre el valor de la FO de la última y la penúltima iteración sea igual o menor que 0.001.

##### 2.2.10.2. Calibración multiobjetivo temporal

En este tipo de calibración multiobjetivo temporal; se ha empleado el algoritmo de MOSCEM-UA en donde las funciones objetivo a minimizar son:  $FO1=1-NSE(Q)$  y  $FO2=|VE(Q)|$ , y su configuración en el proceso de búsqueda del óptimo es la siguiente:

- Población inicial:  $s = 1000$
- Número de complejos:  $q = 50$
- Número de individuos por complejo:  $m = s/q = 20$
- Número de nuevos candidatos por complejo:  $L = \min(\text{parámetros}, m/4) = 5$
- Número de iteraciones:  $itera = 5000$
- Factor de escala:  $\beta = 0.5$

En el proceso de optimización el algoritmo determina las soluciones candidatas que conforman la frontera de Pareto, siendo estas las posibles soluciones óptimas a escoger en la calibración de nuestro modelo.

### 2.2.10.3. Calibración multiobjetivo espacio temporal

Con el mismo algoritmo y configuración descrita en la calibración anterior, se ha optimizado el modelo con las siguientes combinaciones :

- Caudal (Q) – Humedad del suelo (SM), siendo las funciones objetivo a minimizar:  $FO_1 = 1 - NSE(Q)$  y  $FO_2 = 1 - STE(SM)$ .
- Caudal (Q) – Índice de área foliar (LAI), siendo las funciones objetivo a minimizar:  $FO_1 = 1 - NSE(Q)$  y  $FO_2 = 1 - STE(LAI)$ .
- Humedad del suelo (SM) – Índice de área foliar (LAI), siendo las funciones objetivo a minimizar:  $FO_1 = 1 - STE(SM)$  y  $FO_2 = 1 - STE(LAI)$ .

La búsqueda de la solución óptima también es idéntica a la mencionada en el apartado anterior, esto quiere decir que cada solución obtenida en cada iteración buscara aproximarse a la frente de Pareto, y finalmente se elegirá la más óptima en nuestro proceso de calibración.

### 2.2.10.4. Calibración Monobjetivo espacio - temporal

En este tipo de calibración monobjetivo espacio - temporal se a utilizado el algoritmo de SCE-UA para minimizar la FO. Asimismo, se ha realizado 2 calibraciones; en la primera se ha tomado a la SM como variable de estado siendo la  $FO = 1 - STE(SM)$ . En la segunda, se empleó al LAI como variable de estado siendo su  $FO = 1 - STE(LAI)$ . Por último, el criterio de convergencia se estableció cuando la FO de la última y penúltima iteración tenga una diferencia menor o igual a 0.001.

## 2.3. PROCESOS KÁRSTICOS Y MANANTIALES

Los procesos karsticos se generan por la disolución del agua en las rocas carbonatadas solubles, principalmente en las piedra caliza, marmol, dolomita y yeso (Malago *et al.*, 2016). Estos procesos de disolución originan las formaciones de manantiales, sumideros y cuevas que son característicos de un sistema kárstico. En un acuífero kárstico (ver figura 6) el flujo de agua subterránea se forma a partir del movimiento del agua a través de fisuras interconectadas que van concentrándose hacia tuberías más grandes, sistemas de cuevas y cavidades interconectadas (Alarcon, 2018).



Figura 6. Esquema simplificado de un sistema kárstico

---

## **CAPITULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

---

### 3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca del Carraixet tiene una extensión de 235.03 Km<sup>2</sup> y su delimitación parte desde la intercepción de su río principal y el puente de la autovía A7. La cuenca se encuentra en la Demarcación Hidrográfica del Júcar, en la provincia de Valencia, y su recorrido comienza en el municipio de Gátova en donde va recogiendo el agua de la vertiente sur de Sierra Calderona. Desemboca en el mar mediterráneo cuando el río llega a la localidad de Alboraya (Camarasa,1991). En la figura 7 se muestra la ubicación espacial de la cuenca del Carraixet.

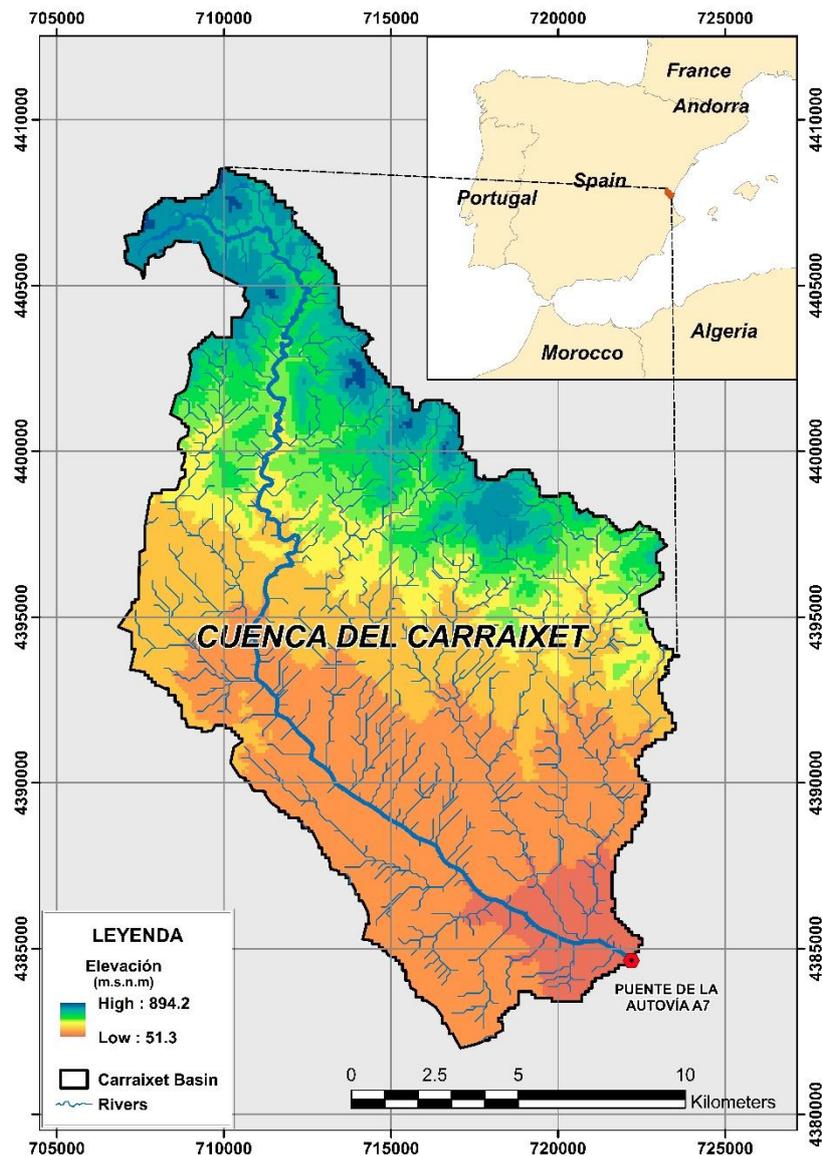


Figura 7. Ubicación del área de estudio – Cuenca del Carraixet

### 3.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS GENERALES

La cuenca del Carraixet cuenta con un clima mediterráneo, las precipitaciones medias mensuales se encuentran comprendidas entre 10.6 mm y 51.7 mm, siendo los meses de julio y octubre los meses menor y mayor régimen de precipitación, respectivamente. Además, la precipitación media anual en la cuenca es de 370.4 mm siendo los meses más lluviosos septiembre y octubre, periodos donde se presentan eventos de gran intensidad y corta duración llamados “gota fría”, ver figura 8.

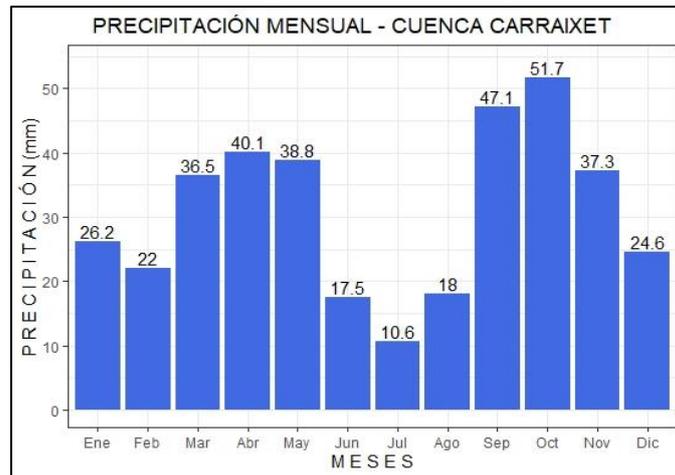


Figura 8. Precipitación mensual – Cuenca del Carraixet

Las temperaturas máximas se presentan en los meses de julio y agosto con valores medios de 31.2°C y 31.3°C respectivamente. Por otro lado, las temperaturas mínimas ocurren entre los meses de diciembre y febrero con valores medios que oscilan entre 3.1°C y 3.9°C, ver figura 9.

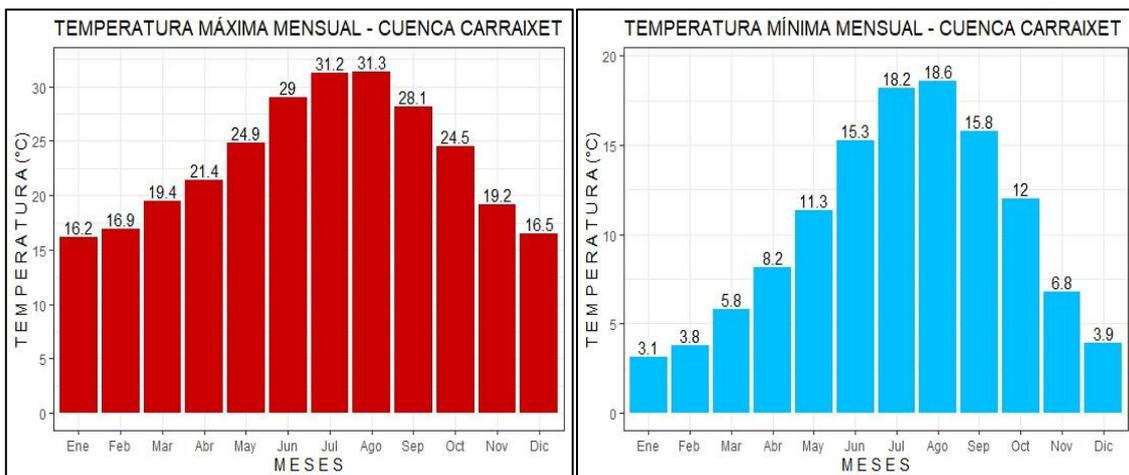


Figura 9. Temperaturas máximas y mínimas – Cuenca del Carraixet

### 3.3. TOPOGRAFÍA DE LA CUENCA

Para la caracterización topográfica de la cuenca del Carraixet se ha empleado un DEM (Modelo de elevación digital) de resolución 100m x 100m proporcionado por el Instituto Cartográfico Valenciano. Esta información nos permite determinar que nuestra área de estudio se encuentra comprendida entre las cotas 56 y 891 m.s.n.m. Asimismo, el 50% de su superficie se encuentra por debajo de la cota 246.3 m, ver figura 10.

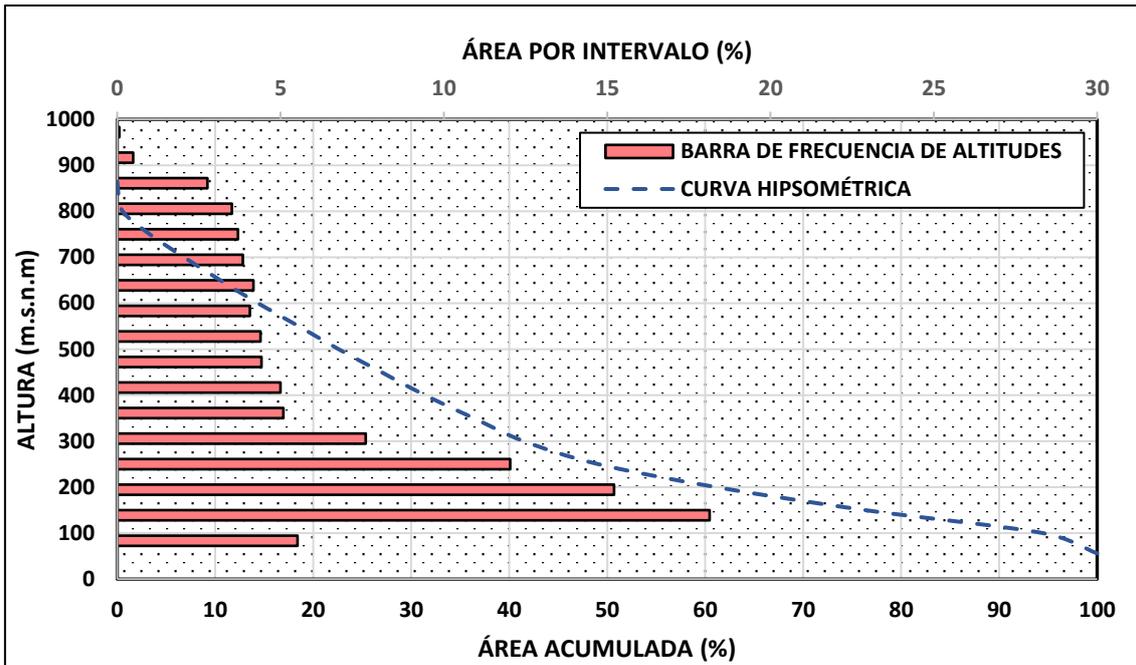


Figura 10. Curva hipsométrica – Cuenca del Carraixet

En la figura 11 podemos observar tres tipos de curvas hipsométricas que reflejan el potencial evolutivo de una cuenca. Por tanto, de acuerdo con la forma de estas podemos identificar que nuestra área de estudio corresponde a una cuenca de madura a sedimentaria (fase de vejez) debido a que se asemeja a las curvas tipo B y C del gráfico.

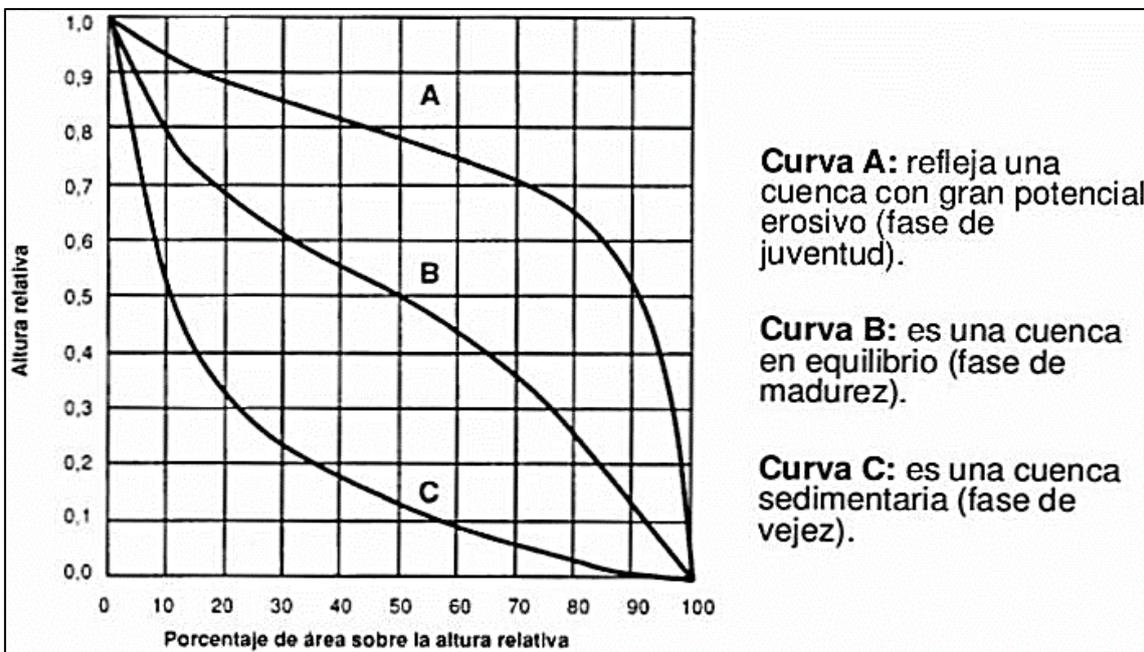


Figura 11. Tipologías de curvas hipsométricas, según STRAHLER (Fuente: Guerra and González., Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, figura 7)

### 3.4. GEOLOGÍA

La parte alta de la cuenca del Carraixet está conformada por facies germánica que son típicos del Sistema Ibérico, y en su parte baja se encuentra formada por el cuaternario. No obstante, “a la dirección norte de Bétera el roquedo dominante se encuentra conformado por arcillas, areniscas y dolomitas, de las facies Keuper, Buntsandstein y Muschelkalk respectivamente” (Pascual Aguilar, 2002).

EL Buntsandstein, predomina ampliamente en la cuenca en forma arcillas rojas, areniscas rojas y amarillentas. La zona de montaña de la cuenca se encuentra domina por Suprakeuper y Muschelklk. Asimismo, al este de Olocau y oeste de Manines el Keuper constituye una pequeña zona en estos sectores, (Buendia, 1972).

Por otro lado, el Jurásico se encuentra escasamente representado en la cuenca; sin embargo, su constitución principal está conformada por facies carbonatadas (Gómez & Goy, 1979). Además, al norte de Bétera, los materiales que afloran del Jurásico inferior y medio son las dolomías y calizas.

El cuaternario, se encuentra conformado por sedimentos tal como arcillas, arenas, cantos rodados y margas. Por otra parte, con menos extensión se encuentran las brechas y conglomerados más o menos cementados, que pertenecen al pleistoceno, (Buendia, 1972).

En la figura 12, se observa el mapa geológico del instituto Geológico y Minero de España (IGME).

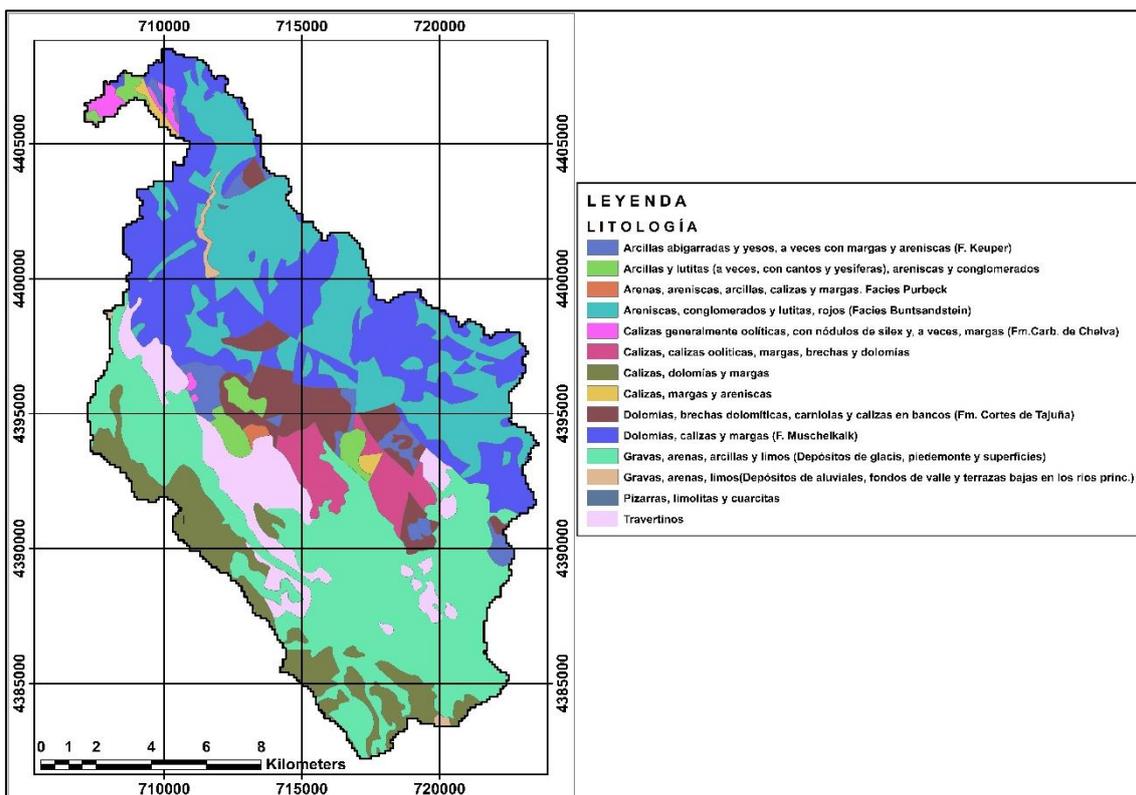


Figura 12. Mapa geológico – Cuenca del Carraixet

### 3.5. HIDROGEOLOGÍA

TETIS contempla la permeabilidad como parámetro del modelo, por tal motivo es necesario conocer la distribución espacial de este parámetro a lo largo de la cuenca. EL IGME posee un mapa de permeabilidad a escala 1:200.000 y su permeabilidad esta caracterizado en 5 tipos: Muy alta, Alta, Media, Baja y Muy Baja, precisando cada una de ellas a los 7 grandes grupos de rocas: ígneas, detríticas, detríticas del cuaternario, carbonatadas, volcánicas, evaporíticas y metadetríticas, (Tejada Espinoza, H. E., 2016).

La cuenca del Carraixet se encuentra situada en 2 unidades hidrogeológicas, en la dirección sureste de la zona de valle se encuentra situada la unidad 080 - 130 Liria Casinos, mientras que en la zona noroeste correspondiente a la parte alta de la cuenca se encuentra ubicada la unidad 080 – 131 Medio Palancia.

En la figura 13, se observa el mapa hidrogeológico del instituto Geológico y Minero de España (IGME).

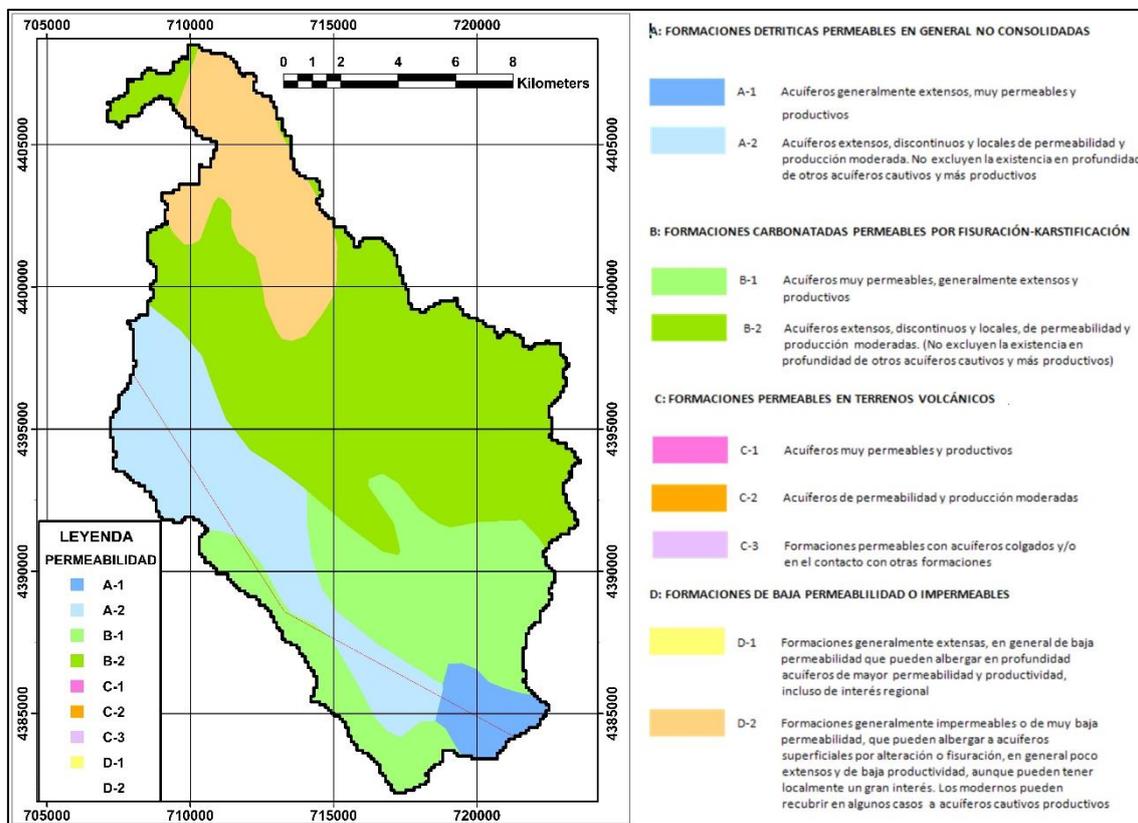


Figura 13. Mapa hidrogeológico – Cuenca del Carraixet

El acuífero de Liria-Casinos, posee una superficie de 812,77 km<sup>2</sup>, gran parte de su área se encuentra dentro de la provincia de valencia. Su extensión parte desde la margen izquierda del río Turia, a la altura de las localidades de Ribarroja y Pedralba, hasta algo más allá del límite de la provincia de Castellón, y en dirección Oeste-Este entre Higuera y la línea que marca su contacto con la llanura aluvial de la Plana de Valencia. Los centros poblados que se encuentran en la zona son: Poble de Vallbona, Casino, Liria, Marines y Benaguacil, los cuales poseen como actividad económica la agricultura e industria, (Ballestaros *et al.*, 2007).

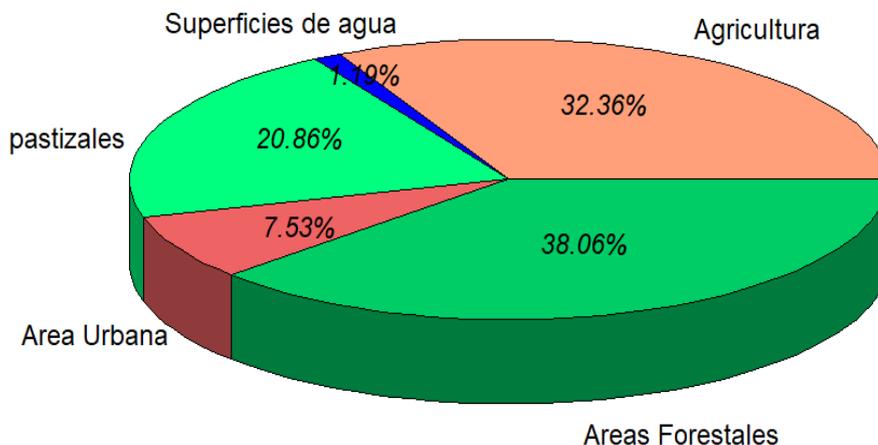
El acuífero de Medio Palancia posee una superficie de 480 km<sup>2</sup> y la mayor parte de su superficie se encuentra en la cuenca del río Palancia. La recarga del acuífero por infiltración de la lluvia y el cauce es alrededor de 70Hm<sup>3</sup>. La recarga lateral es alimentada principalmente por la unidad hidrogeológica N°14 (Alto Palancia) la cual asciende a 30Hm<sup>3</sup>. No obstante, la descarga del acuífero se origina por extracciones mediante bombeos (40Hm<sup>3</sup>), salidas por emergencias (25 Hm<sup>3</sup>) siendo las más significativas en los manantiales de Almenara, San José, Cuart y la Llosa, y transferencia lateral (40 Hm<sup>3</sup>) a las unidades N° 21, Plana de Sagunto, y N° 12, Plana de Castellón, (Alva, H.D., 2017).

### 3.6. USOS DE SUELO

En nuestro sector de estudio las áreas forestales se encuentran ubicadas en la parte alta y media de la cuenca ocupando un área de aproximadamente 89.56km<sup>2</sup>. La importancia de estas zonas forestales en la cuenca se debe a que permite el mantenimiento del ciclo hidrológico y asimismo la amortiguación de fenómenos meteorológicos extremos, mitigando los desastres naturales que se puedan ocasionar (Ekhuemelo *et al.*, 2016).

En la cuenca del Carraixet los cultivos de cítrico se encuentran ubicados en sectores altamente urbanizados. Sin embargo, los cultivos de huertas comúnmente los podemos encontrar en toda la llanura de inundación. Debido al crecimiento industrial y urbano en los últimos años el área agrícola de la cuenca ha disminuido, pero a pesar de ello los cultivos frutícolas tal como los cítricos han perdurado y aumentado significativamente en la cuenca, (Tejada Espinoza, 2016).

Para la discretización de los usos de suelo en la cuenca se han empleado diferentes fuentes de información tal como: información del proyecto Corine Land Cover 2018, el Inventario Forestal Nacional de España, ortofotos del PNAO (Plan Nacional de Ortofotografía Área) de España e imágenes de satélite del MODIS, toda esta información fue procesada obteniendo en la cuenca 32 usos de suelo tal como se muestra en el tabla 4. Asimismo, la figura 14 muestra la proporción de los diferentes usos del suelo definidos en la cuenca del Carraixet agrupando los diferentes usos forestales, agrícolas y urbanos.



**Figura 14. Porcentaje usos de suelo en la cuenca del Carraixet, agrupando los usos forestales, agrícolas y urbanos.**

**Tabla 4. Usos de suelo en la cuenca del Carraixet**

CÓDIGO	USO DE SUELO	Área (Km <sup>2</sup> )	PORCENTAJE (%)
1	Parcela de tratamiento	0.08	0.03
2	Urbano	14.72	6.26
3	Agua	2.79	1.19
4	Grass	49.03	20.86
5	Arbusto, Matorral	1.12	0.48
6	Pino carrasco disperso	4.41	1.88
7	Alcornoque mediterráneo	2.04	0.87
8	Algarrobo	0.52	0.22
9	Pino carrasco maduro disperso	2.86	1.22
10	Bosque de frondosas perennes	0.08	0.03
11	Pino Alepo Maduro	0.18	0.08
12	Rodales - Exclusión de tallos de pino carrasco	37.52	15.96
13	Pino rodeno maduro	1.63	0.69
14	Tallo - exclusión de conífera + madera dura	14.57	6.2
15	Bosque ribereño	0.74	0.31
16	Olivo	3.58	1.52
17	Rodales muy jóvenes de pino carrasco	0.74	0.31
18	Iniciación de encina	13.28	5.65
19	Iniciación de conífera + madera dura	0.15	0.06
20	Iniciación pino rodeno	1.5	0.64
21	Forestación de pino carrasco	0.07	0.03
22	Forestación coníferas + Madera dura	1.87	0.8
23	Bosque de coníferas	4.87	2.07
24	Vegetación esclerófila	1.21	0.51
25	Tierras de regadío permanente	0.21	0.09
26	Plantaciones de árboles frutales y bayas	53.11	22.6
27	Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural y semi natural	7.79	3.31
28	Mosaico de cultivos	11.37	4.84
29	Unidades industriales o comerciales	1.89	0.8
30	Redes de carreteras y ferrocarriles y terrenos asociados	0.01	0
31	Lugares de construcción	0.13	0.06
32	Instalaciones deportivas y de ocio	0.96	0.41
<b>TOTAL</b>		<b>235.03</b>	<b>100</b>

---

## **CAPITULO 4. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA**

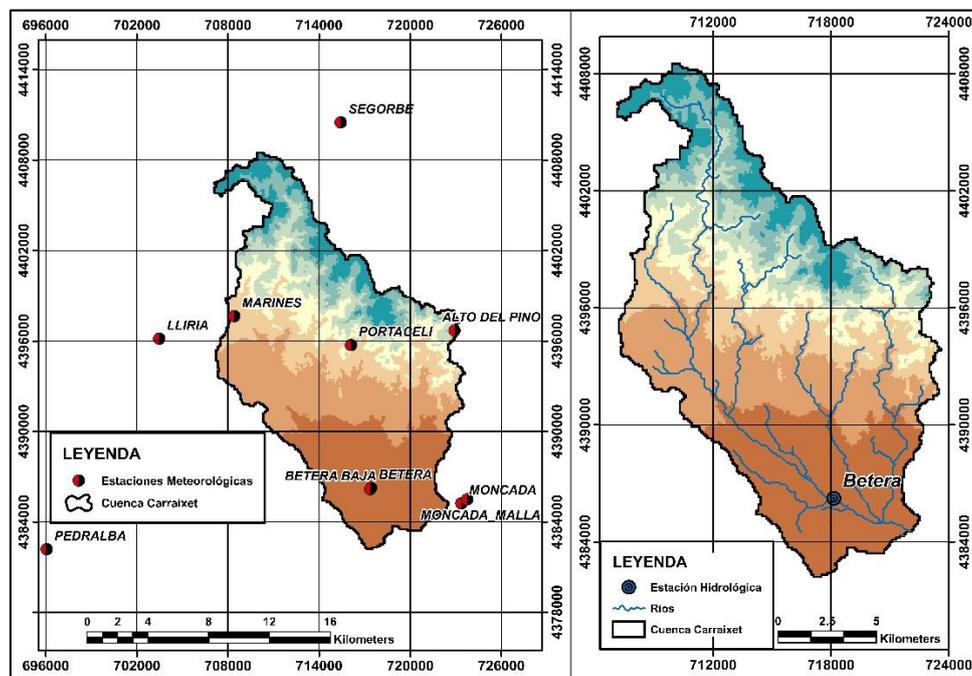
---

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ECO-HIDROLÓGICO PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL  
CARRAIXET (VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

Para la caracterización climática e hidrológica en la cuenca del Carraixet se ha empleado la información histórica de diferentes variables ambientales tal como precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, radiación y caudal, esta información fue obtenida de los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH) y del Servicio Integral de Asesoramiento al Regante (SIAR). Asimismo, los registros históricos son puntuales e incompletos desde el punto de vista temporal. Por tanto, para dar una representación espacial lo más completa posible se ha incluido estaciones cercanas a las diferentes redes con información accesible, ver tabla 5 y figura 15.

**Tabla 5. Estaciones meteorológicas e hidrológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet**

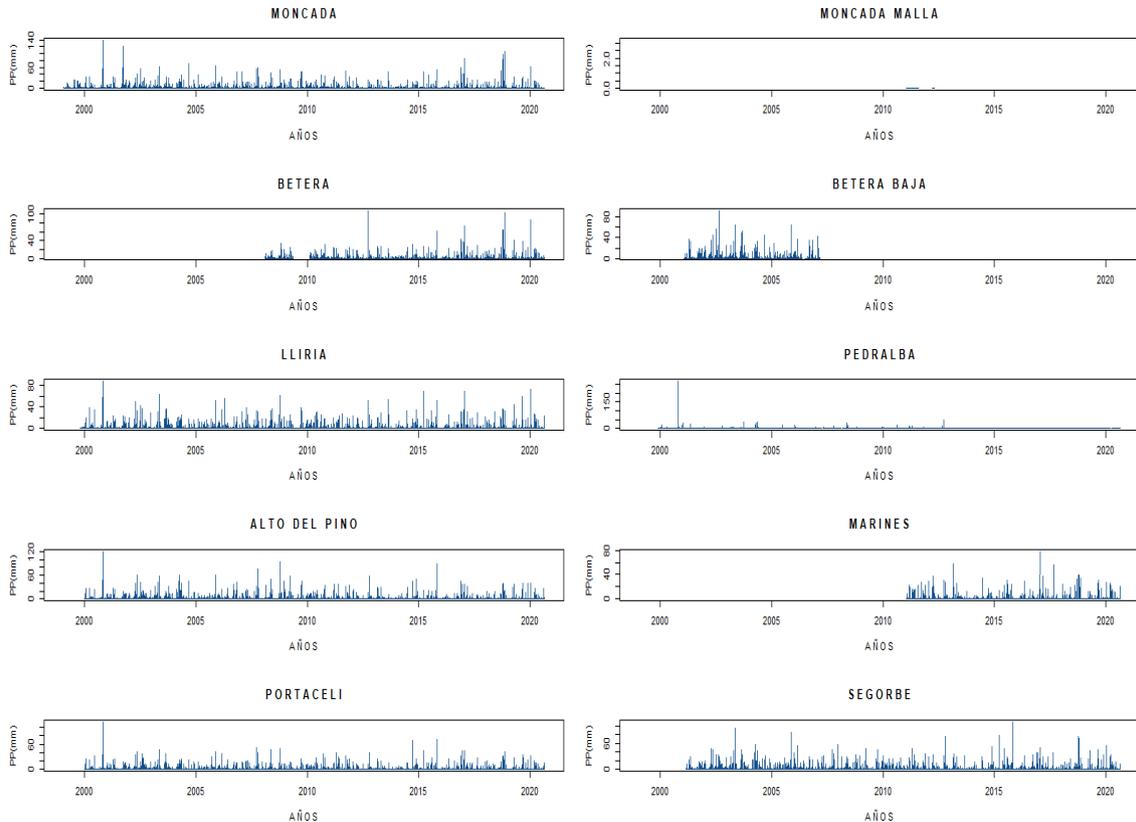
CÓDIGO	ESTACIÓN	DATOS	FUENTE	XETRS89 _30N	YETRS89 _30N	ELEVACIÓN (M.S.N.M)	INICIO	FIN
V101	MONCADA	P, Tmed, Tmin, Tmax, ET, RAD	SIAR	723368	4385233	61	20/01/1999	30/08/2020
V1010	MONCADA MALLA	P, Tmed, Tmin, Tmax, ET, RAD	SIAR	723762	4385501	65	30/03/1999	22/04/2012
V26	BETERA	P, Tmed, Tmin, Tmax, ET, RAD	SIAR	717423	4386260	97	12/02/2008	30/08/2020
V16	BETERA (BAJA)	P, Tmed, Tmin, Tmax, ET, RAD	SIAR	717362	4386170	96	23/01/2001	28/02/2007
V02	LLIRIA	P, Tmed, Tmin, Tmax, ET, RAD	SIAR	703474	4396160	231	21/10/1999	30/08/2020
V01	PEDRALBA	P, Tmed, Tmin, Tmax, ET, RAD	SIAR	696061	4382190	229	26/11/1999	30/08/2020
CS09	SEGORBE	P, Tmed, Tmin, Tmax, ET, RAD	SIAR	715427	4410510	346	27/02/2001	30/08/2020
OP08	ALTO DEL PINO	P	SAIH	722911	4396697	709	01/01/2000	30/08/2020
OA02	MARINES	P	SAIH	708415	4397656	284	01/01/2000	30/08/2020
OP02	PORTACELI	P	SAIH	716103	4395732	370	01/01/2000	30/08/2020
OO01	CARRAIXET-BÉTERA	Qd, Qi max	SAIH	718412	4386362	86	01/01/2000	30/08/2020



**Figura 15. Ubicación espacial de las Estaciones meteorológicas e hidrológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet**

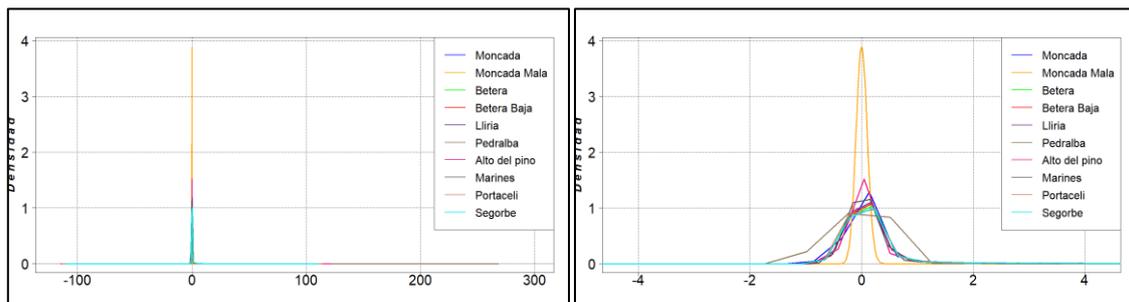
#### 4.1. PRECIPITACIÓN

La información pluviométrica de las estaciones meteorológicas consideradas para este estudio resultaron ser bastante completas y de muy buena calidad a excepción de la estación Moncada malla que actualmente se encuentra inactiva, ver figura 16.



**Figura 16. Evolución temporal de la precipitación media diaria en las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet**

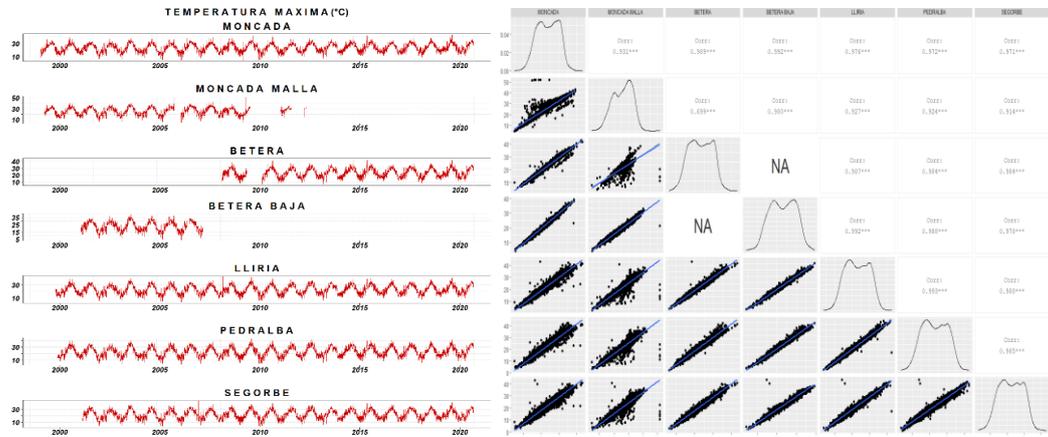
Al realizar las funciones de densidad (Kernel density estimation, smoothing bandwidth 0.2) se observó que la precipitación tiene un comportamiento similar en sus diferentes puntos de muestreo. Sin embargo, los datos pluviométricos registrados en la estación Moncada Malla presenta un comportamiento muy diferente a los registrados en las estaciones vecinas, esto se debe a la poca información registrada en este punto de muestreo. Por otro lado, la precipitación registrada en estación Pedralba posee un comportamiento ligeramente diferente al resto de estaciones, ver figura 17, esto se debe a que la estación se encuentra un poco alejado del área de estudio tal como se puede ver en la figura 15. Por tal motivo, la información meteorológica de las estaciones Moncada Malla y Pedralba no será tomada en cuenta en el análisis de este estudio.



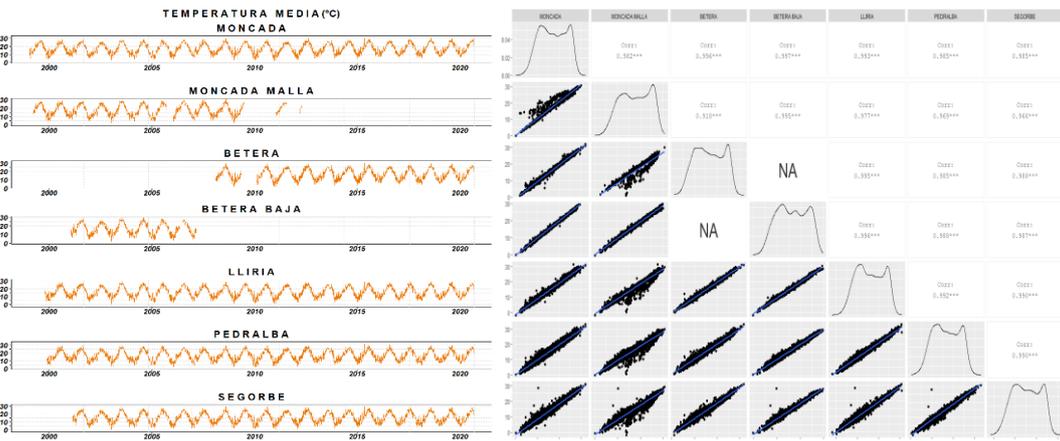
**Figura 17. Funciones de densidad de precipitación en la cuenca del Carraixet**

## 4.2. TEMPERATURA

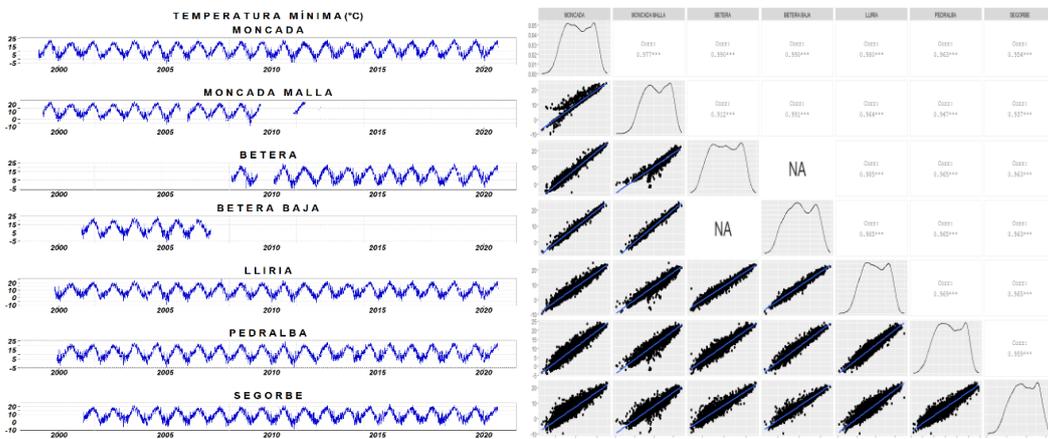
Las temperaturas en la cuenca del carraixet presentan una marcada estacionalidad y una fuerte correlación entre las diferentes mediciones espaciales, ver figura 18, 19 y 20.



**Figura 18.** Evolución temporal de la temperatura máxima diaria en las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet (izquierda) y matriz de correlación entre los datos de las diferentes estaciones (derecha)



**Figura 19.** Evolución temporal de la temperatura media diaria en las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet (izquierda) y matriz de correlación entre los datos de las diferentes estaciones (derecha)



**Figura 20.** Evolución temporal de la temperatura mínima diaria en las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet (izquierda) y matriz de correlación entre los datos de las diferentes estaciones (derecha)

Las funciones de densidad mostraron temperaturas máximas frecuentes entre 15 °C en invierno y 30 °C en verano, temperaturas medias típicas entre los 9 °C y los 26 °C y temperaturas mínimas entre 4 y 20 °C, ver figura 21.

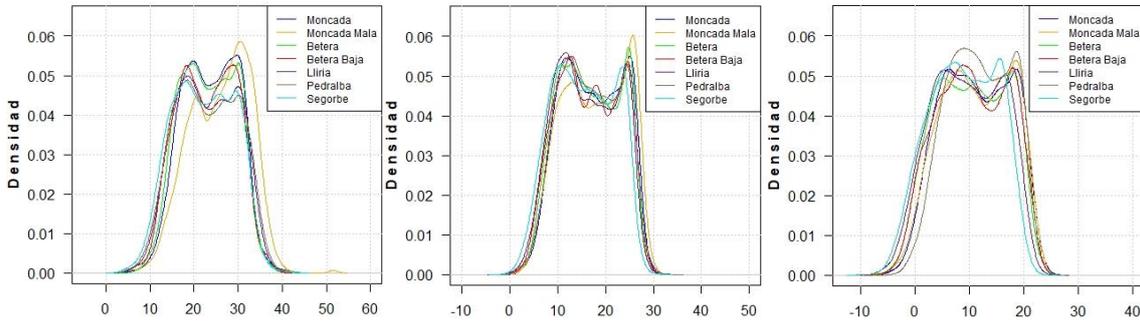


Figura 21. Funciones de densidad de las temperaturas máximas (izquierda), medias (centro) y mínimas (derecha) en la cuenca del Carraixet

### 4.3. RADIACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

La radiación y evapotranspiración de referencia presentan una estacionalidad muy marcada. Asimismo, la correlación de la información entre las diferentes estaciones es muy fuerte a excepción de la estación Moncada Malla en donde nuevamente se comprueba que no es recomendable emplear la información de esta estación en el análisis del presente estudio, ver figura 22 y 23.

En la figura 24, podemos observar que la evapotranspiración de referencia más recurrente en la cuenca del Carraixet varía entre 1 y 5 mm/día aproximadamente. Además, se comprobó nuevamente que no es recomendable emplear la estación Moncada Malla en la modelación hidrológica. El análisis de la radiación solar demostró que los valores más frecuentes oscilaban entre 9 y 27 MJ/m<sup>2</sup>.

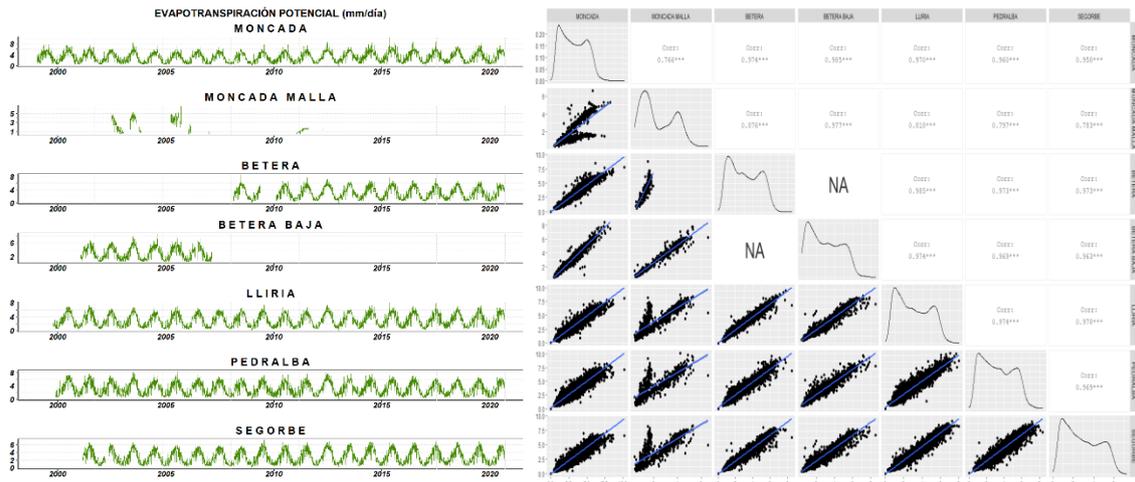
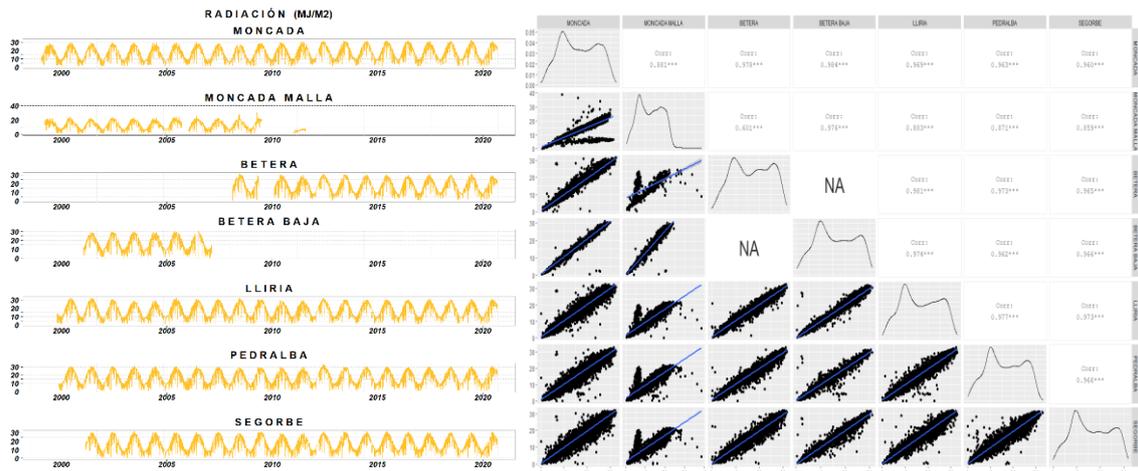
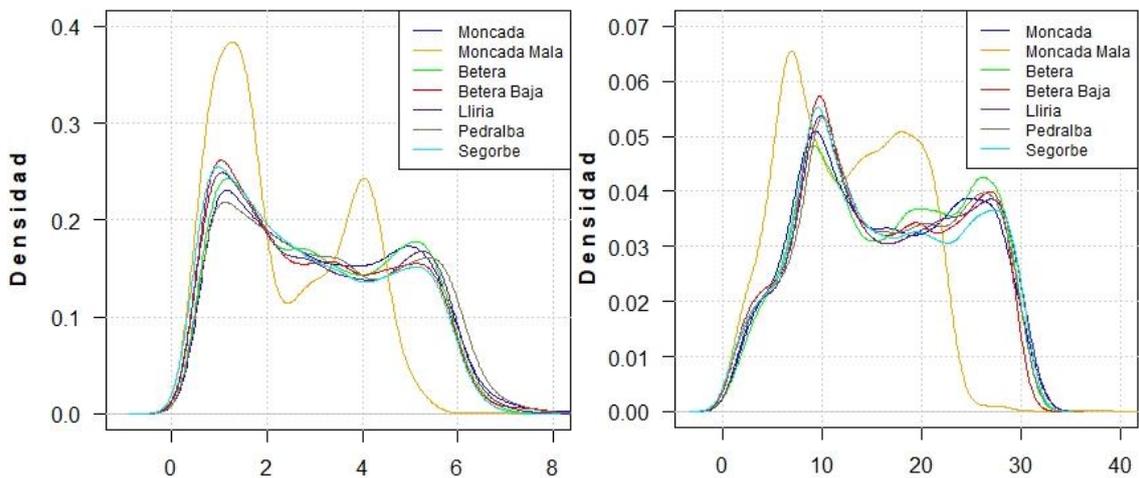


Figura 22. Evolución temporal de la evapotranspiración de referencia en las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet (izquierda) y matriz de correlación entre los datos de las diferentes estaciones (derecha)

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ECO-HIDROLÓGICO PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL CARRAIXET (VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**



**Figura 23. Evolución temporal de radiación solar (MJ/m2) en las estaciones meteorológicas dentro y fuera de la cuenca del Carraixet (izquierda) y matriz de correlación entre los datos de las diferentes estaciones (derecha).**



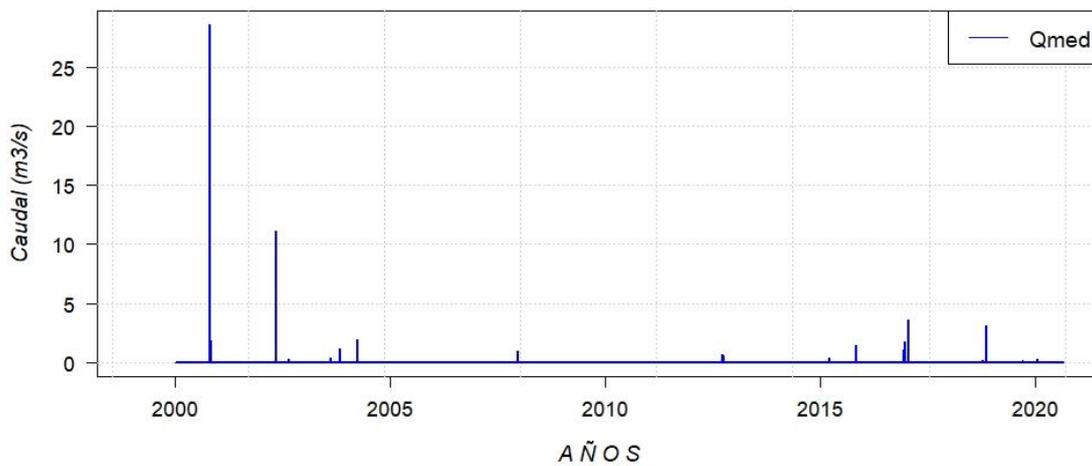
**Figura 24. Funciones de densidad de las series de evapotranspiración de referencia (mm/d) (izquierda) y de radiación solar (MJ/m2) (derecha)**

**4.4. CAUDAL**

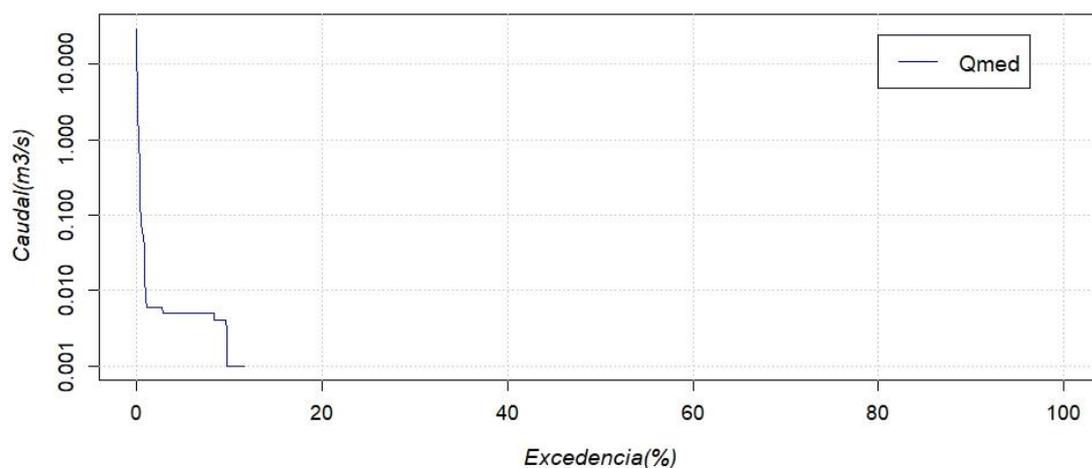
La estación hidrológica Carraixet- Bétera posee información hidrológica desde el 01/01/2000 al 30/08/2020, ver gráfico 25. Al analizar la serie histórica se observó que solo se registró caudal en el río un 15% del tiempo y con valores que rara vez superaban un caudal de 1 m<sup>3</sup>/s, esto implica que el río se encuentra seco el 85% de su tiempo, ver tabla 6. El caudal máximo diario y máximo instantáneo en toda la serie histórica se presentó el 24/10/2000 con valores de 28.6m<sup>3</sup>/s y 99.7m<sup>3</sup>/s respectivamente. En grafico 26 podemos observar la curva de duración en donde nos muestra el porcentaje de tiempo en el cual el caudal es superior a una cantidad dada.

**Tabla 6. Caudales superiores a 1m<sup>3</sup>/s en la estación de aforo Carraixet – Bétera (2000-2020)**

FECHA	Q <sub>med</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	FECHA	Q <sub>med</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)
23/10/2000	4.737	12.362	30/10/2003	1.17	2.486
24/10/2000	28.581	99.726	29/03/2004	1.942	16.308
25/10/2000	11.738	35.384	2/11/2015	1.467	11.497
26/10/2000	1.952	2.542	17/12/2016	1.046	6.284
27/10/2000	1.779	1.956	19/12/2016	1.782	4.574
28/10/2000	1.181	1.446	20/01/2017	3.575	8.364
29/10/2000	1.011	4.275	21/01/2017	2.463	7.328
8/05/2002	11.141	30.669	16/11/2018	3.074	18.234
9/05/2002	6.257	15.087			



**Figura 25. Evolución temporal de los caudales medios diarios en la estación de aforo Carraixet-Betera**



**Figura 26. Curva de duración de los caudales medios diarios en la estación de aforo Carraixet-Betera**

---

## **CAPITULO 5. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS**

---

Para realizar el modelamiento hidrológico con TETIS es necesario estimar un conjunto de parámetros que describan las características de la cuenca y a la vez su variabilidad en el espacio. Por tal motivo, es indispensable estimar los mapas de parámetros a partir de información disponible, tal como: cubierta vegetal, topografía, edafología y otras características del medio físico de la cuenca.

## 5.1. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL Y MAPAS DE PARÁMETROS DERIVADOS

### 5.1.1. Modelo de elevación digital del terreno

La información topográfica en la cuenca del Carraixet es representada por un modelo digital de terreno (MDT) el cual fue descargado de la página web del Instituto Cartográfico Valenciano (ICV). Este MDT posee una resolución de 100m x 100m y aunque existen otras fuente de información que nos proporcionan mapas a resolución más fina, tal como el Centro Nacional de Descargas y el *SRTM 90m Digital Elevation Data* la calidad del mapa del ICV es muy buena y su resolución del mapa es adecuada para las dimensiones de la cuenca, por lo que será empleada para todo el análisis hidrológico. Asimismo, al MDT del ICV se le ha realizado un recorte en la proyección EPSG:25830 - ETRS89 / UTM zona 30N con extensión: 602597.5, 4174577.5; 831797.5, 4534877.5 (2292x3603 celdas). Para ello fueron necesarias las hojas 640, 667, 668, 669, 695, 696, 721 y 722 de su base de datos.

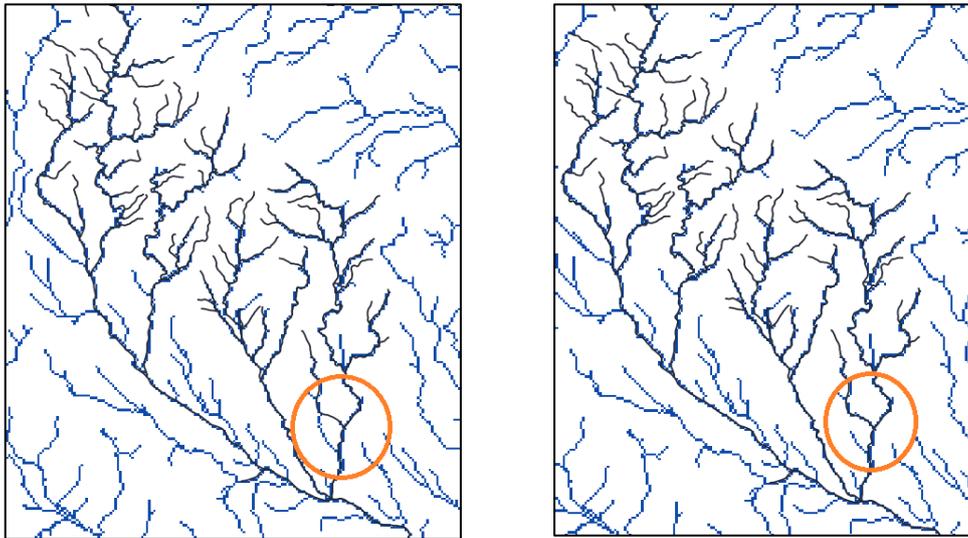
El primer control de calidad que se le realizo al MDT fue la identificación y eliminación de sumideros espurios. Por ende, se empleó la herramienta *Fill sinks* de la extensión *Arc Hydro tools* de ARCGIS (pendiente mínima de 0,01 grados), en este proceso se observó que un 4,30% de la región analizada se corrigió mediante el rellenado de espurios, eliminando zonas problemáticas dentro de la superficie de la cuenca.

A continuación, se realizó la corrección hidrológica del MDT mediante el socavado de la red hídrica de la cuenca. Para ello se empleo la herramienta *DEM Reconditioning* de la extensión *Arc Hydro tools* de ARCGIS, se consideró como mapa de líneas azules el mapa disponible en la web de descargas de la *Confederación Hidrográfica del Júcar*. Para verificar la coherencia de la red de drenaje se empleó como segunda fuente de información, el *mapa de red hidrográfica suministrado por el MITECO para el MDT de 100m*. una vez comprobada la viabilidad del mapa con dicha fuente, se consideró adecuado el marco de referencia para el socavado de cauces sobre el MDT, ya libre de sumideros.

Para garantizar la efectividad del proceso se estableció como umbral del ancho de cauce un valor de 200m el cual corresponde al doble de la resolución del MDT. En la calibración de la profundidad de socavado se examinaron uno a uno los resultados obtenidos para profundidades de 2, 3, 4, 4.5 y 5m. Asimismo, se volvieron a rellenar los sumideros mediante la herramienta *Fill sinks* con el fin de asegurarnos que el MDT resultante y seleccionado sea hidrológicamente correcto.

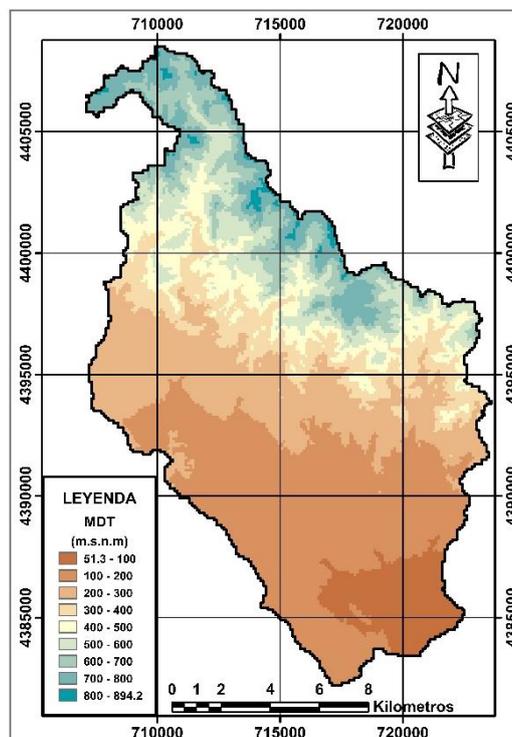
Por último, para la elección de la profundidad de socavado que representa mejor nuestra red de cauces en comparación con el mapa de líneas azules (MLA) se ha generado nuevas capas (entre 2 y 5m de socavado) empleando la clasificación de orden de Strahler. Esta clasificación categoriza los cauces desde aguas arriba a aguas abajo en donde los afluentes de cabecera tienen orden 1 y cuando dos del mismo orden confluyen se eleva el orden en una unidad. Para el caso en donde dos afluentes de orden diferente confluyan se heredará el mayor de los dos órdenes. Mediante una calibración visual entre el mapa de líneas azules y los mapas de Strahler

se concluyó que la red inicia en el orden 4 de Strahler. Asimismo, se comprobó que para que la red de cauces se representara correctamente es indispensable realizar una profundidad de socavado de al menos 4m, ver figura 5.1.



**Figura 27.** Calibración del proceso de socavado de cauces en el modelo digital de elevaciones de la cuenca del Barranco del Carraixet. A la izquierda se muestra la red de cauces del modelo digital de elevaciones (azul) frente al mapa de líneas azules (negro) utilizando una profundidad de socavado de 3,5 m, a la derecha la comparación asignando una profundidad de socavado de 4 m.

El MDT hidrológicamente correcto se muestra en la figura 28.



**Figura 28.** Modelo digital de terreno para cuenca del Carraixet

### 5.1.2. Mapa de pendientes

Se calculó el mapa de pendientes mediante la herramienta *slope* de la extensión *spatial analyst* de ARCGIS. En donde se observó que las mayores pendientes se presentan en la zona Nor-Este de la cuenca con valores máximos de 88.19%, en el resto de la cuenca las pendientes se reducen drásticamente hasta predominar pendientes con valores prácticamente nulos. El valor medio de las pendientes es de 13.88% con una desviación estándar del orden de 14.19%, ver figura 29.

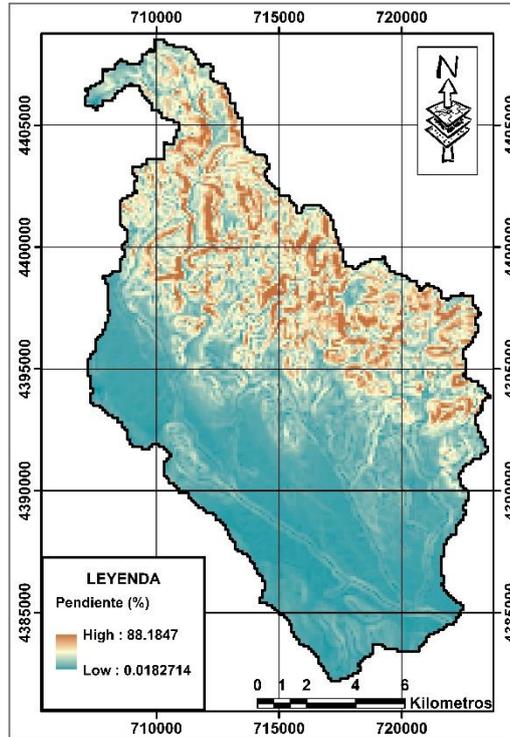


Figura 29. Mapa de pendientes en la cuenca del Carraixet

### 5.1.3. Mapa de direcciones de drenaje

El mapa de direcciones de drenaje se calculó mediante la herramienta *Flow Direction* de la extensión *Arc Hydro Tools* del programa ARCGIS. La presente herramienta emplea el modelo D8 (O'Callaghan, J. F., and D. M. Mark, 1984) de direcciones drenantes únicas, este método considera que cada celda drena a una de las 8 que la rodean escogiendo aquella con máxima  $i_k$ , donde  $i_k$  corresponde al cociente de la diferencia de cotas de la celda con la adyacente,  $z(c)-z(c_k)$ , y la distancia entre centros,  $d_k$ , siguiendo la expresión de la ecuación (5.1).

$$i_k = \frac{z(c) - z(c_k)}{d_k} \quad (5.1)$$

Si se presentaran valores nulos esto nos indicaría la existencia de sumideros. En este caso, no se ha considerado mapa de depresiones por lo que el mapa de direcciones de flujo no presenta sumideros. La codificación de direcciones de flujo que admite TETIS es la que genera por defecto el programa ArcGIS tal como se muestra en figura 30 y 31.

TETIS		
32	64	128
16		1
8	4	2

Figura 30. Direcciones de flujo según ARCGIS

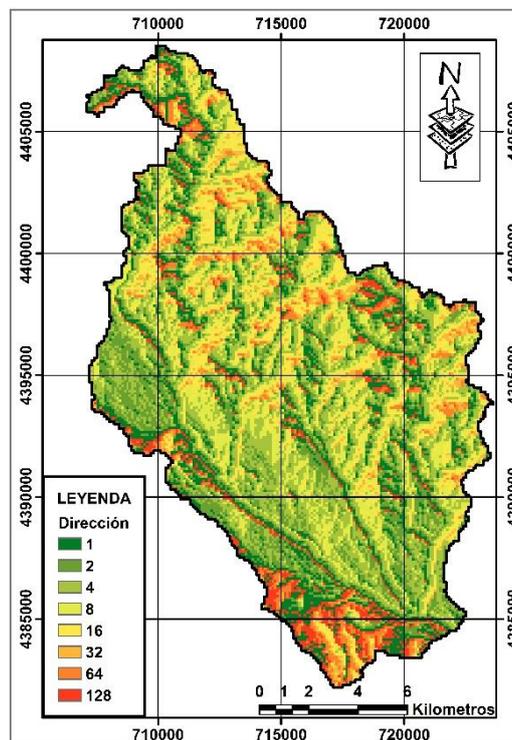


Figura 31. Mapa de direcciones de flujo en la cuenca del Carraixet

#### 5.1.4. Mapa de celdas drenantes acumuladas

Para el cálculo del mapa de celdas drenantes acumuladas se utilizó la herramienta *Flow Accumulation* de la extensión *Arc Hydro Tools* del programa ARCGIS siendo su dato de entrada el mapa de direcciones. Es necesario mencionar que el mapa de celdas drenantes acumuladas representa el número de celdas que drenan a cada celda, más 1 unidad (ella misma), ver figura 32.

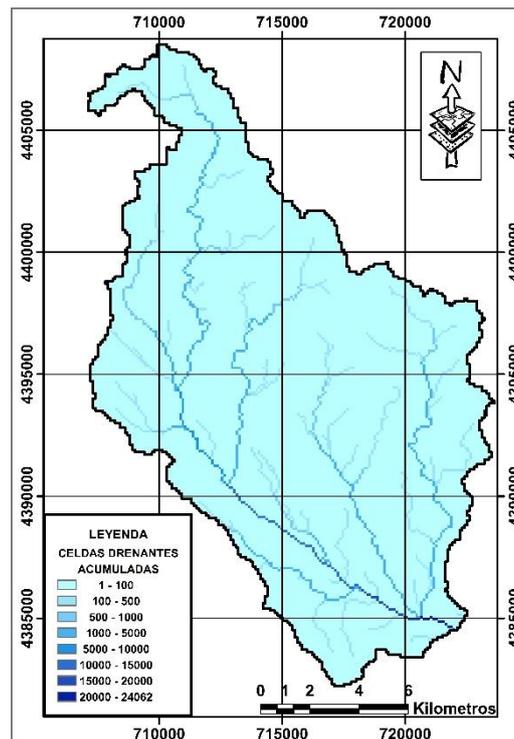


Figura 32. Mapa de celdas drenantes acumuladas en la cuenca del Carraixet

#### 5.1.5. Mapa de velocidad de flujo en ladera

Para la representación espacial de la velocidad de flujo en ladera se utilizó la calculadora ráster que se encuentra disponible en el sistema de información geográfica de ARCGIS. La ecuación (5.2) nos muestra una aproximación de la velocidad de flujo en ladera.

$$v = 1.4142 * \sqrt{s_0} \quad (5.2)$$

Donde:

$v$  = Velocidad de flujo (m/s)

$s_0$  = Pendiente (m/m) en cada una de las celdas de la Cuenca

Como podemos observar esta aproximación solo depende del mapa de pendientes y es válida para velocidades entre 0.001 y 1m/s. Sin embargo, en la cuenca de estudio encontramos una pequeña área con velocidades superiores a la unidad, ver figura 33. En cualquier caso, se asume que es una estimación válida pues los problemas en la estimación suelen venir de velocidades inferiores a 0.001 y el valor mínimo estimado corresponde a 0.019 m/s en el Barranco del Carraixet.

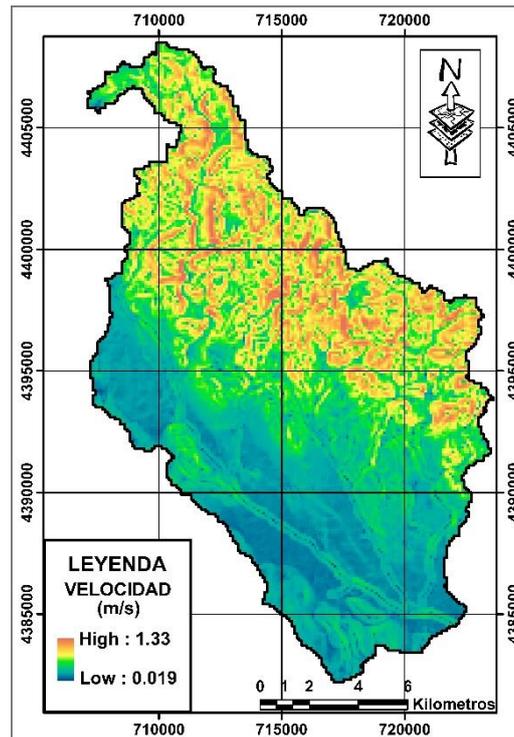


Figura 33. Mapa de velocidades de flujo en ladera - Cuenca del Carraixet

## 5.2. USOS DEL SUELO Y MAPAS DE PARÁMETROS DERIVADOS

### 5.2.1. Mapa de usos del suelo

Cómo se ha descrito anteriormente para la generación del mapa de uso de suelos se ha empleado la información del proyecto Corine Land Cover 2018, ortofotos del PNAO (Plan Nacional de Ortofotografía Área), imágenes de satélite de MODIS y el inventario forestal nacional de España. Obteniendo finalmente el mapa de la figura 34.

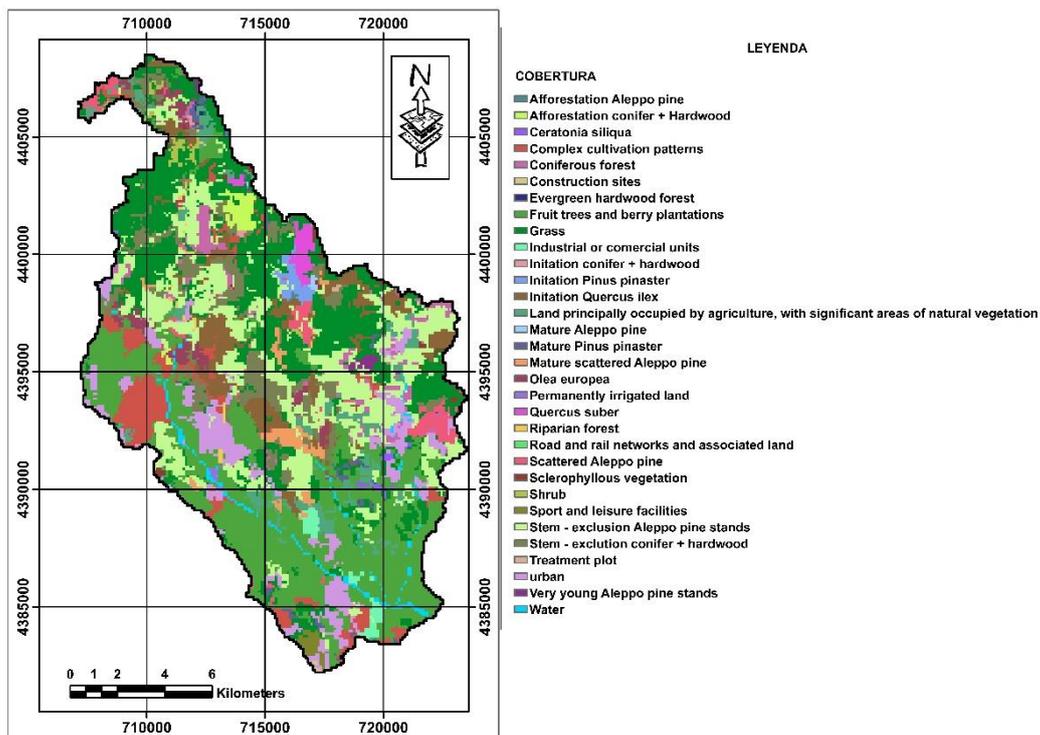


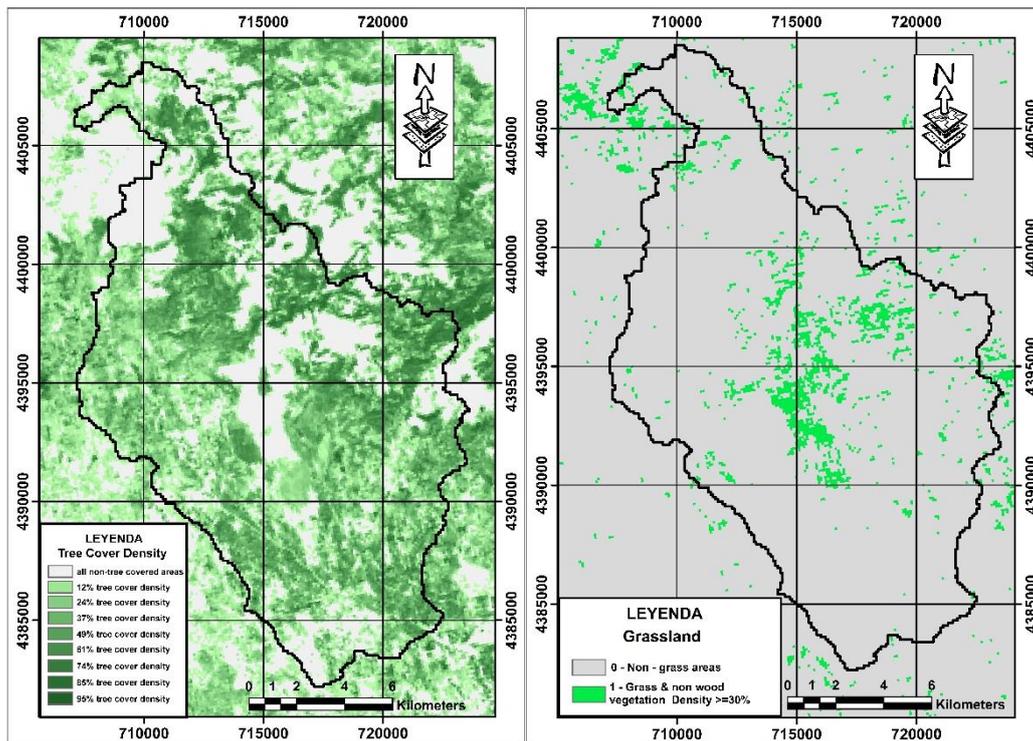
Figura 34. Mapa de uso de suelo en la Cuenca del Carraixet

### 5.2.2. Mapa de factor de cobertura

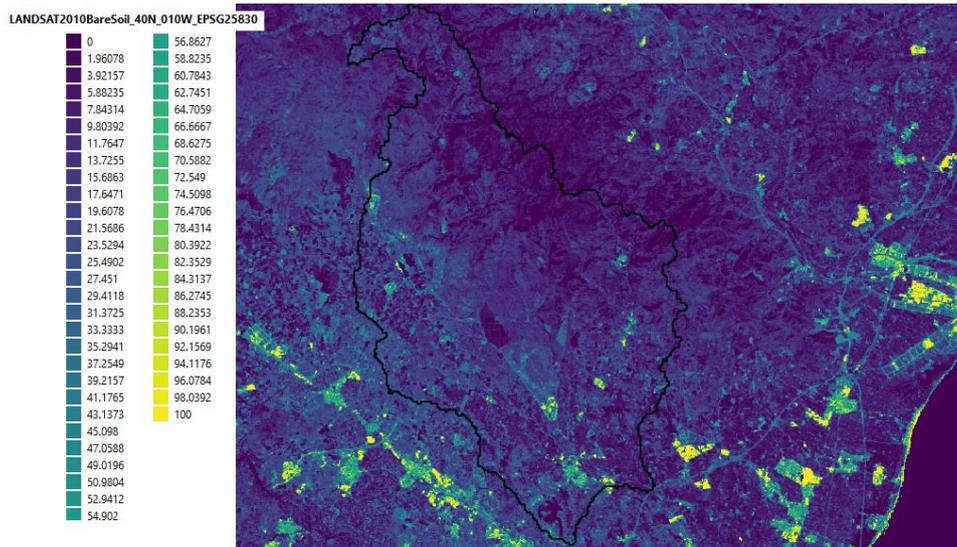
El mapa de factor de cobertura representa la fracción de superficie que cubre un uso de suelo en una celda concreta, sus unidades se expresan en m/m. Por ende, el presente mapa tendrá valores entre 0 y 1. La importancia del factor de cubierta en los diferentes usos de suelo se debe a que interviene en los procesos de intercepción, evapotranspiración y escorrentía en la capa superficial del suelo.

En la elaboración del presente mapa se emplearon imágenes Lídár del año 2015, el mapa de cópernicus TDC (*Tree density cover*), el mapa de cópernicus NTDC (*Non-Tree density cover*) e imágenes Landsat de suelo desnudo. Debido a la disponibilidad de información, las imágenes Lídár 2015 permitieron representar el factor de cobertura en las partes altas de la cuenca. En el resto la superficie se decidió completar el factor de cubierta de la siguiente manera:

1. Los usos forestales, o aquellos en los que el estrato arbóreo se consideraba dominante (*Tree dominant*), se completaron con el mapa de *Copérnicus TDC (Tree density cover)* del año 2015, ver figura 35.
2. Los usos fundamentalmente herbáceos o arbustivos (*Non-Tree dominant*) se completaron con el mapa de *Copérnicus TDC* y con el mapa de *Non-Tree density cover* asignando una fracción de cobertura del 30%, ver figura 35.
3. Los usos considerados sin cobertura vegetal dominante (*Bare soil dominant*) se completaron considerando la imagen *Landsat* de porcentaje de suelo desnudo, figura 36.

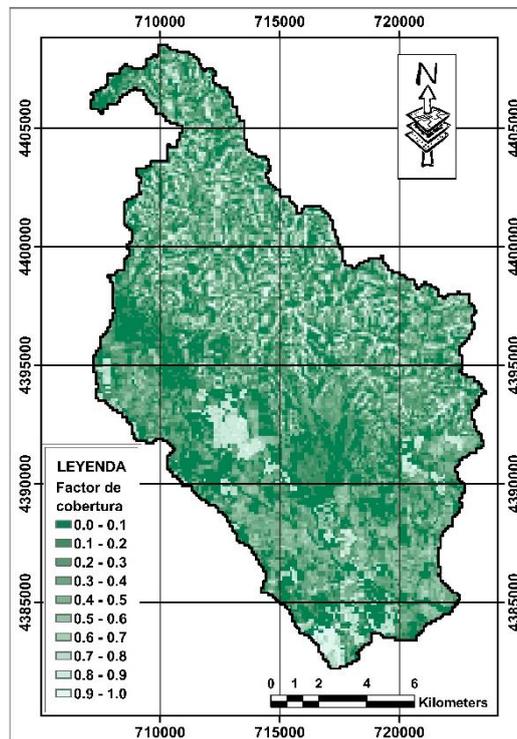


**Figura 35. Mapas de fracción de cobertura de referencia para usos del suelo cuyo estrato dominante es arbóreo (izquierda) y para usos del suelo con estrato herbáceo dominante en la cuenca del Carraxet.**



**Figura 36. Imagen Landsat de porcentaje de suelo desnudo Global bare soil Landsat 30m (año 2015) en la cuenca del Barranco del Carraxet.**

El mapa resultante representa adecuadamente la cobertura de los diferentes usos en la cuenca del Carraxet, ver figura 37. Como puede observarse la cobertura es elevada en zonas forestales y ciertas áreas de cultivo que se encuentran ubicadas en la parte alta y media de la cuenca. Sin embargo, si observamos las zonas con cobertura reducidas estas se encuentran asociadas a áreas urbanas.



**Figura 37. Mapa de factor de cobertura en la Cuenca del Carraxet.**

### 5.2.3. Mapa de almacenamiento estático del suelo

#### 5.2.3.1. Abstracciones iniciales

Las abstracciones iniciales están compuestas por la intercepción de la vegetación y el almacenamiento superficial en el terreno.

- **Intercepción (mm):** el dosel vegetal intercepta el agua de lluvia, llegando en ocasiones a suponer hasta el 50% de las precipitaciones anuales. Esta agua interceptada solo puede salir del sistema mediante procesos de evaporación. Es común encontrar en bibliografías que el valor de la intercepción es estimado como un porcentaje de la precipitación. Sin embargo, la metodología no es correcta y debe estimarse teniendo en cuenta la intercepción máxima de los tipos de vegetación presentes en la cubierta del suelo y teniendo en cuenta como mínimo las variabilidades estacionales (mes a mes) que se producen en la cobertura de dicha vegetación (Muzylo *et al.*, 2009). Asimismo, debido a que se está trabajando con el submodelo de vegetación dinámica de TETIS (ECO-TETIS) la intercepción se calcula internamente día a día. Por tanto, no se incluirá como input de entrada el valor de intercepción máxima.
- **Almacenamiento superficial (mm):** corresponde a la cantidad de agua almacenada en la cubierta vegetal y depresiones del terreno, estando relacionado el primero con el tipo de uso de suelo y el segundo con la pendiente del terreno. El agua almacenada solo puede salir del sistema mediante procesos de evaporación y/o infiltración.

Para la estimación espacial del almacenamiento en depresiones se empleó el mapa de pendientes y la ecuación (5.3) que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} A_{charcos} &= 10 - 1.3 * S_0, \text{ si } S_0 \leq 7.5\% \\ A_{charcos} &= 0, \text{ si } S_0 > 7.5\% \end{aligned} \quad (5.3)$$

Donde:

$S_0$  = Pendiente (%).

De acuerdo con la ecuación (5.3) podemos mencionar que cuando las pendientes sean superiores 7.5 % el agua escurrirá por la superficie de la cuenca sin producirse almacenamiento en depresiones. En consecuencia, el mapa de almacenamiento en depresiones tendrá valores entre 0 y 10 mm siendo cercano a la unidad cuando la pendiente sea de 7.5 % y nulos para pendientes más pronunciadas.

En un segundo paso, para el cálculo de almacenamiento en la cubierta vegetal se empleó la tabla 7, que recoge valores obtenidos de estudios previos realizados en Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (DIHMA) de la Universitat Politècnica de València (UPV)

**Tabla 7. Almacenamiento en cubierta vegetal por tipo de suelo**

CÓDIGO	USO DE SUELO	Almacenamiento en cubierta (mm)
1	Parcela de tratamiento	15
2	Urbano	12
3	Agua	0
4	Grass	15
5	Arbusto, Matorral	16
6	Pino carrasco disperso	15
7	Alcornoque mediterráneo	16
8	Algarrobo	16
9	Pino carrasco maduro disperso	15
10	Bosque de frondosas perennes	17
11	Pino Alepo Maduro	15
12	Rodales - Exclusión de tallos de pino carrasco	14
13	Pino rodeno maduro	15
14	Tallo - exclusión de conífera + madera dura	14
15	Bosque ribereño	15
16	Olivo	13
17	Rodales muy jóvenes de pino carrasco	14
18	Iniciación de encina	16
19	Iniciación de conífera + madera dura	14
20	Iniciación pino rodeno	14
21	Forestación de pino carrasco	15
22	Forestación coníferas + Madera dura	15
23	Bosque de coníferas	14
24	Vegetación esclerófila	16
25	Tierras de regadío permanente	25
26	Plantaciones de árboles frutales y bayas	25
27	Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural y semi natural	19
28	Mosaico de cultivos	18
29	Unidades industriales o comerciales	2
30	Redes de carreteras y ferrocarriles y terrenos asociados	2
31	Lugares de construcción	4
32	Instalaciones deportivas y de ocio	4

Los mapas generados de almacenamiento en depresiones y cobertura vegetal se muestran en la figura 38. Asimismo, la suma de estos dos mapas nos proporciona el mapa final de almacenamiento superficial en la cuenca del Carraixet, ver figura 39.

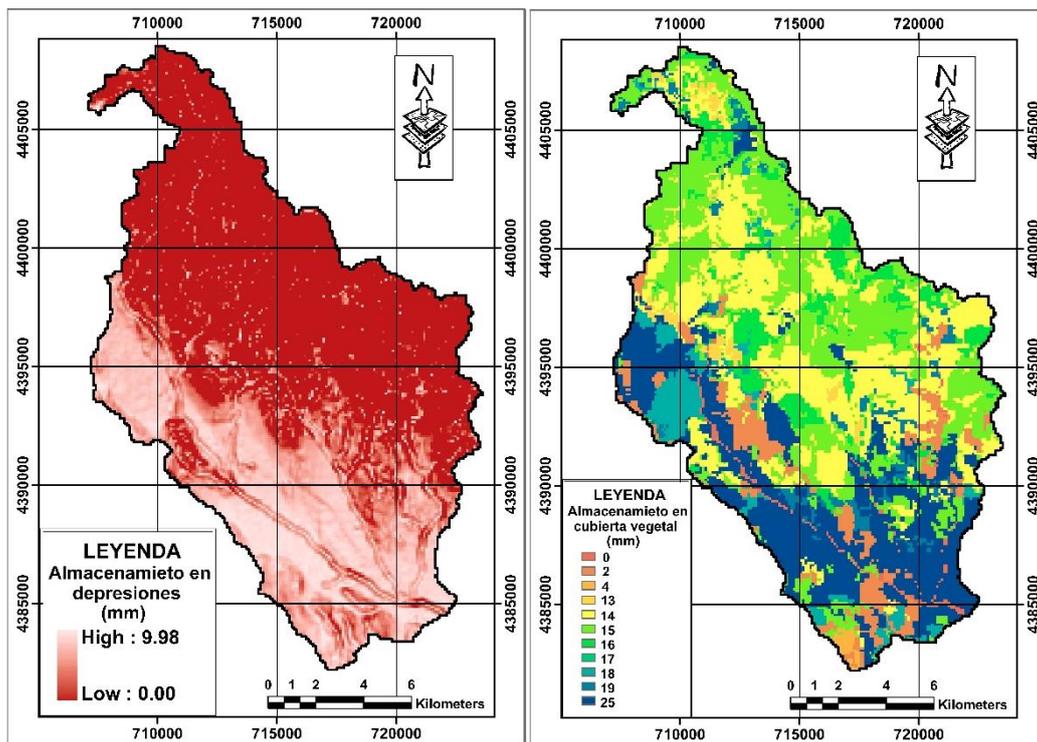


Figura 38. Mapa de almacenamiento en depresiones (mm) como consecuencia de la pendiente (izquierda) y de la cubierta vegetal (derecha) en la cuenca del Carraixet.

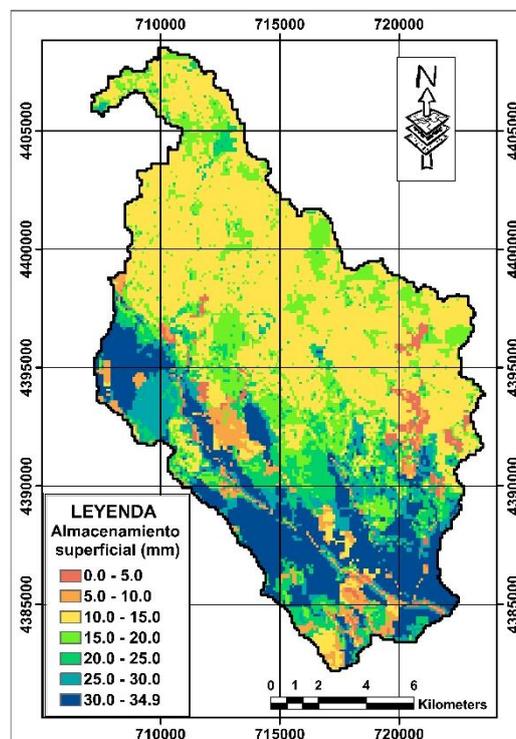


Figura 39. Mapa de almacenamiento superficial (mm) en la cuenca del Carraixet.

### 5.2.3.2. Almacenamiento capilar

Para el cálculo del almacenamiento capilar se ha empleado la ecuación (5.4) que se muestra a continuación.

$$Alm. cap = AWC\_TOP \times \min(Prof. raices; ROO) \quad (5.4)$$

Donde:

$Alm. cap$  = Almacenamiento capilar (mm).

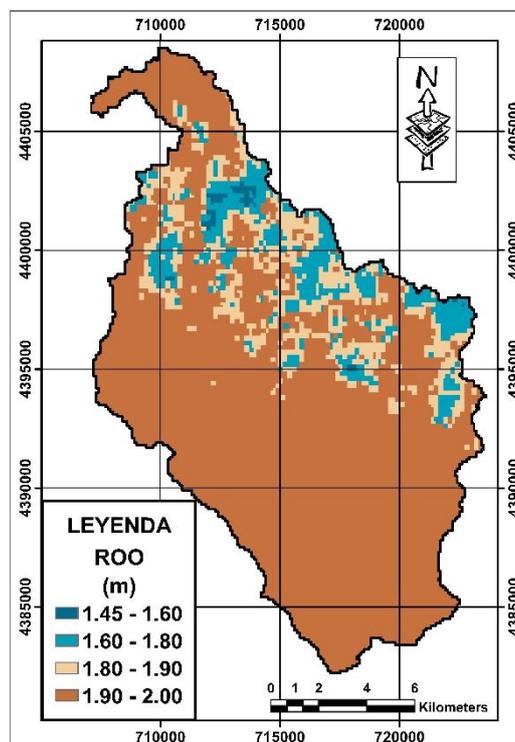
$AWC\_TOP$  = Contenido de agua disponible en el suelo (mm/m).

$Prof. raices$  = Profundidad de raíces (m).

$ROO$  = Profundidad de suelo hasta la roca madre (m).

Para el cálculo del almacenamiento capilar se ha desarrollado un script en R que permite trabajar con matrices tridimensionales, en donde se contempla las características de humedad del suelo en sus diferentes capas a medida que avanzamos en profundidad.

Primero se determinó de manera distribuida y espacialmente la profundidad de suelo hasta la roca madre (ROO). Por ende, se tomó como valor de referencia el mapa de profundidad de suelo hasta la roca madre del *International Soil Reference and Information Centre*, *ISRIC World Soil Information* que posee una resolución espacial de 250m, ver figura 40. El presente mapa nos muestra una matriz de suelo en donde las plantas pueden transpirar siempre y cuando la profundidad de raíces no fuera limitante.



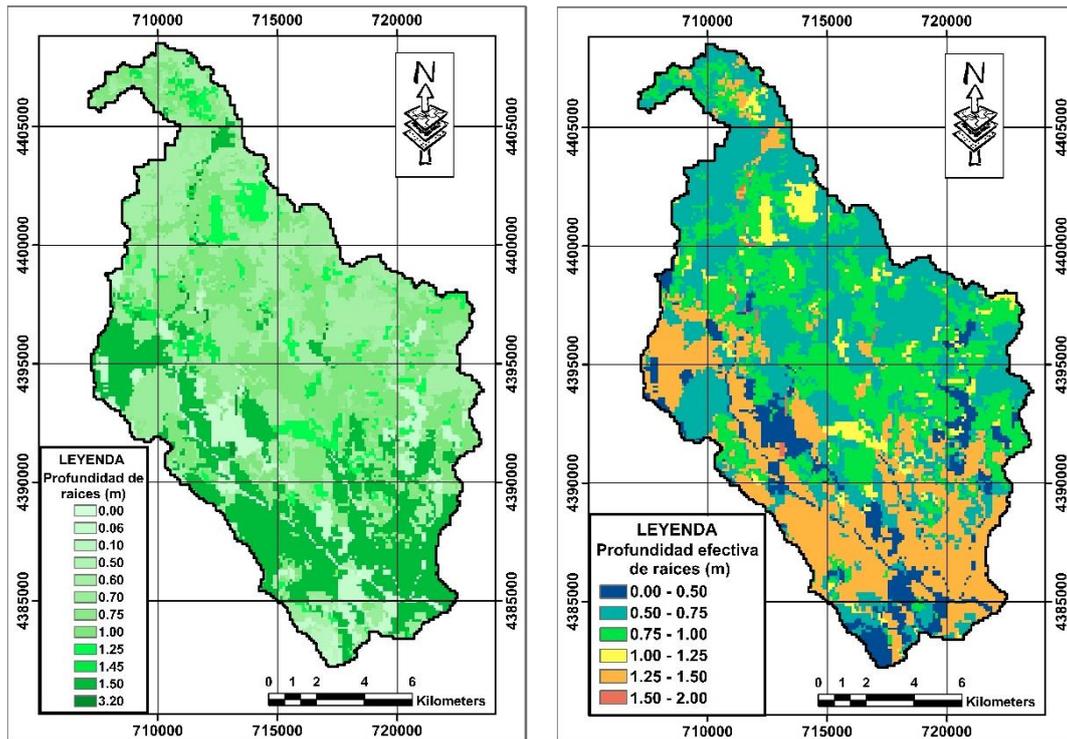
**Figura 40.** Mapa de profundidades hasta la roca madre en la cuenca del Carraixet.

Para determinar la profundidad de suelo que será utilizado para las extracciones por transpiración se necesitó estimar la profundidad de raíces en cada píxel. Por ende, se realizó una reclasificación del mapa de cobertura vegetal en donde se asignaron las profundidades de raíces

que muestran en la tabla 8. Asimismo, la representación espacial de las profundidades de raíces según el uso de suelo y las condicionadas por la localización de la roca madre denominadas profundidad efectiva de raíces se muestran en la figura 41.

**Tabla 8. Profundidades de raíces por tipo de suelo**

CÓDIGO	USO DE SUELO	Profundidad de raíces (m)
1	Parcela de experimental	1.25
2	Urbano	0.06
3	Agua	0
4	Grass	0.6
5	Arbusto, Matorral	0.7
6	Pino carrasco disperso	1
7	Alcornoque mediterráneo	0.7
8	Algarrobo	1
9	Pino carrasco maduro disperso	1.25
10	Bosque de frondosas perennes	1
11	Pino Alepo Maduro	1.25
12	Rodales - Exclusión de tallos de pino carrasco	1
13	Pino rodeno maduro	1.25
14	Tallo - exclusión de conífera + madera dura	1
15	Bosque ribereño	3.2
16	Olivo	1.45
17	Rodales muy jóvenes de pino carrasco	1
18	Iniciación de encina	0.7
19	Iniciación de conífera + madera dura	1
20	Iniciación pino rodeno	1
21	Forestación de pino carrasco	1.25
22	Forestación coníferas + Madera dura	1.25
23	Bosque de coníferas	1.25
24	Vegetación esclerófila	0.7
25	Tierras de regadío permanente	0.5
26	Plantaciones de árboles frutales y bayas	1.5
27	Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural y semi natural	0.75
28	Mosaico de cultivos	0.7
29	Unidades industriales o comerciales	0.06
30	Redes de carreteras y ferrocarriles y terrenos asociados	0.06
31	Lugares de construcción	0.06
32	Instalaciones deportivas y de ocio	0.1



**Figura 41.** Profundidades de raíces en la cuenca del Carraxet. El límite máximo (izquierda) y las profundidades efectivas (derecha) una vez comprobada la profundidad de la roca madre

Para la determinación del contenido de agua en el suelo (AWC\_TOP) se utilizaron los mapas disponibles en la base de datos del European Soil Database, 3D-SoilsHydroGrid. Los mapas empleados fueron el contenido de humedad a capacidad de campo (Water Content at Field Capacity, FC) y contenido de humedad en el punto de marchitez permanente (Water Content at Wilting Point, WP), la resolución espacial que poseen estos mapas es de 250m x 250m. Es indispensable mencionar que los mapas de FC y WP fueron obtenidos en las diferentes profundidades del suelo tal como: 0 m, 0.05m, 0.15m, 0.30m, 0.60m, 1.00m y 2.00 m de profundidad. Además, dichas capas poseían datos faltantes. Por tanto, para completar esta información se tomó referencia la media de los valores de las celdas adyacentes.

Por otra parte, los mapas del European Soil Database, 3D-SoilsHydroGrid, empleados para cuantificar el contenido de humedad en saturación y capacidad de campo son determinados para una tensión matricial de 0Mpa y -0.033Mpa respectivamente. Por tanto, no se consideró necesario una corrección inicial en base a la curva de retención de humedad del suelo. Así mismo, el contenido de humedad en el punto de marchitez permanente es considerado la línea umbral en donde la vegetación puede o no extraer de agua del suelo, la tensión matricial a la que se encuentra este contenido de humedad es de -1.5Mpa, tal como se describe en el caso de los mapas del European Soil Database, 3D-SoilsHydroGrid. por consiguiente, no se requirió ningún ajuste previo (Tóth, *et al.*, 2017).

Esto mapas base, son generados mediante funciones de pedotransferencia calibradas en base a un gran número de muestras a nivel global (Tóth, *et al.*, 2015), en donde la estimación del contenido de humedad está en función de la textura y materia orgánica del suelo. Por esta razón, es importante tener en cuenta los diferentes horizontes del perfil del suelo y por ello contemplamos toda la información de las capas disponibles a diferentes profundidades.

Una vez completados y analizado los mapas de referencia se procedió a calcular el almacenamiento capilar para cada capa de suelo en los diferentes niveles de profundidad. De

modo que el contenido de agua máxima disponible para la evapotranspiración en cada capa de suelo corresponderá a la diferencia entre el valor en dicha capa (para cada celda) del contenido de humedad a capacidad de campo FC (mm) y el punto de marchitez WP (mm) siempre que en la capa existan sistemas de raíces. Finalmente, nuestro mapa de contenido de humedad se calculó como el sumatorio de los horizontes del suelo, considerando la profundidad efectiva de raíces como limitante (entre 0 y 2 m que es la profundidad de suelo máxima hasta el horizonte ROO en nuestra zona de estudio). En la ecuación (5.5) se muestra un desglose de las operaciones matemáticas en un píxel en el caso de que la profundidad de raíces se encuentre ubicado en el último horizonte (entre 0m y 2m)

$$\begin{aligned}
 Alm. cap = & 0.05 * \frac{AWC_{0.00} + AWC_{0.05}}{2} + 0.1 * \frac{AWC_{0.05} + AWC_{0.15}}{2} + 0.15 * \frac{AWC_{0.15} + AWC_{0.30}}{2} \\
 & + 0.30 * \frac{AWC_{0.30} + AWC_{0.60}}{2} + 0.40 * \frac{AWC_{0.60} + AWC_{1.00}}{2} + (prof.r - 1.00) \\
 & * \frac{AWC_{1.00} + AWC_{2.00}}{2}
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Donde:

$Alm. cap$  = Almacenamiento capilar (mm).

$AWC_i$  = Contenido de agua disponible en el suelo (mm/m), a una profundidad  $i$ (m).

$Prof. r$  = Profundidad de raíces (m).

Para facilitar el cálculo del almacenamiento capilar en cada celda de la cuenca, se generó un código en R considerando la franja de suelo y la profundidad de raíces necesarias en cada uno de los píxeles, como resultado de este proceso se obtuvo el mapa de almacenamiento capilar que se muestra en la figura 42.

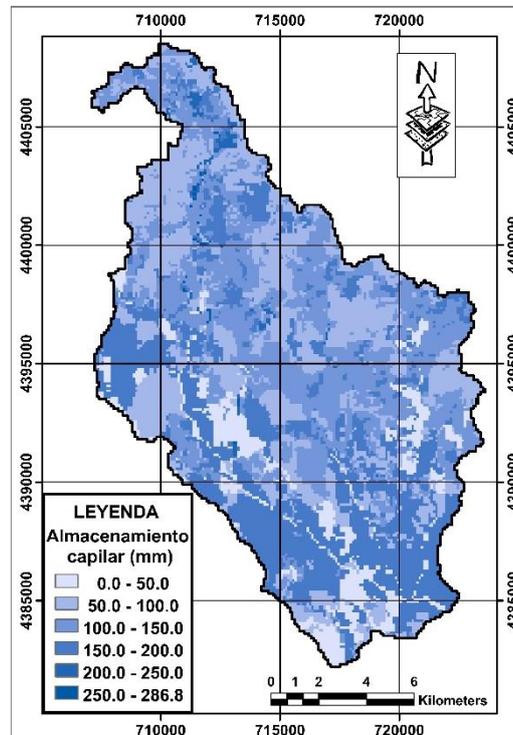


Figura 42. Mapa de almacenamiento capilar (mm) en la cuenca del Carraixet.

Una vez calculado los mapas almacenamiento superficial y almacenamiento capilar se procedió a determinar el mapa de almacenamiento estático del suelo (ver figura 43) mediante la ecuación (5.6) que se muestra a continuación.

$$Hu = Alm.Sup + AWC\_TOP \times \min(Prof.raices; ROO) \quad (5.6)$$

$$Hu = Alm.Sup + Alm.cap \quad (5.6)$$

Donde:

- $Hu$  = Almacenamiento estatico del suelo (mm).  
 $Alm.Sup$  = Almacenamiento superficial (mm).  
 $Alm.cap$  = Almacenamiento capilar (mm).

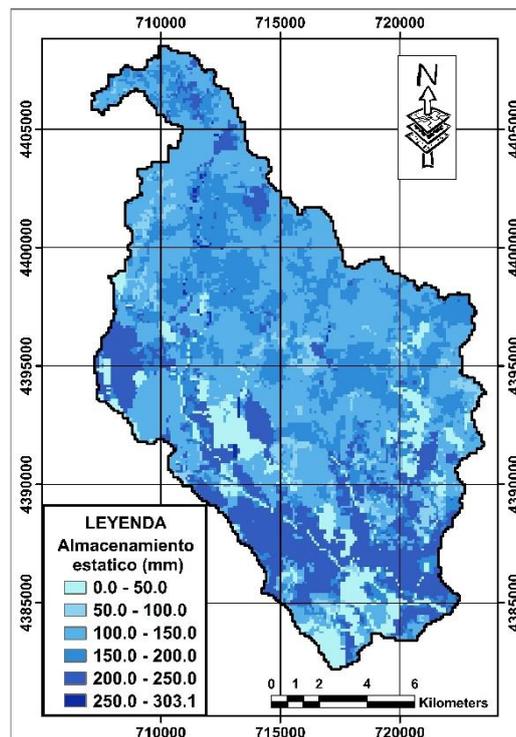


Figura 43. Mapa de almacenamiento estático del suelo (mm) en la cuenca del Carraixet.

Al activar el submodelo de vegetación dinámica de TETIS, el modelo divide a la matriz del suelo en 2 capas, la primera corresponderá una capa superficial de suelo de 0.05 m de profundidad y la segunda al resto de la matriz del suelo. Los mapas requeridos en ambas capas de suelo son el almacenamiento estático a capacidad de campo ( $Hu_1$  y  $Hu_2$  respectivamente, mm), almacenamiento estático en el punto óptimo ( $H^*1$  y  $H^*2$  respectivamente, mm) y el almacenamiento estático en el punto de marchitamiento permanente ( $Hlim_1$  y  $Hlim_2$  respectivamente, mm). Para su estimación se emplearon las ecuaciones (5.7), (5.8), (5.9), (5.10), (5.11) y (5.12). Asimismo, su representación espacial de los mapas se muestra en las figuras 44, 45 y 46.

$$Hu_1 = Alm.Sup + AWC\_FC_1 \times \min(0.05m; ROO) \quad (5.7)$$

$$Hu_2 = AWC\_FC_2 \times [ \min(Prof.raices; ROO) - \min(0.05m; ROO) ] \quad (5.8)$$

$$Hlim_1 = AWC\_WP_1 \times \min(0.05m; ROO) \quad (5.9)$$

$$Hlim_2 = AWC\_WP_1 \times [ \min(Prof.raices; ROO) - \min(0.05m; ROO) ] \quad (5.10)$$

$$H * 1 = \frac{2}{3} * Hu1 \quad (5.11)$$

$$H * 2 = \frac{2}{3} Hu2 \quad (5.12)$$

Donde:

Hu1 = Almacenamiento estático a capacidad de campo en la capa 1(mm).

Hu2 = Almacenamiento estático a capacidad de campo en la capa 2(mm).

Hlim1= Almacenamiento estático en el punto de marchitamiento permanente en la capa 1(mm).

Hlim2= Almacenamiento estático en el punto de marchitamiento permanente en la capa 2(mm).

H\*1= Almacenamiento estático en el punto óptimo en la capa 1(mm).

H\*2= Almacenamiento estático en el punto óptimo en la capa 2(mm).

Alm.Sup= Almacenamiento superficial (mm).

AWC\_FC<sub>1</sub> = Contenido de agua disponible en el suelo a capacidad de campo (mm/m) en la capa 1.

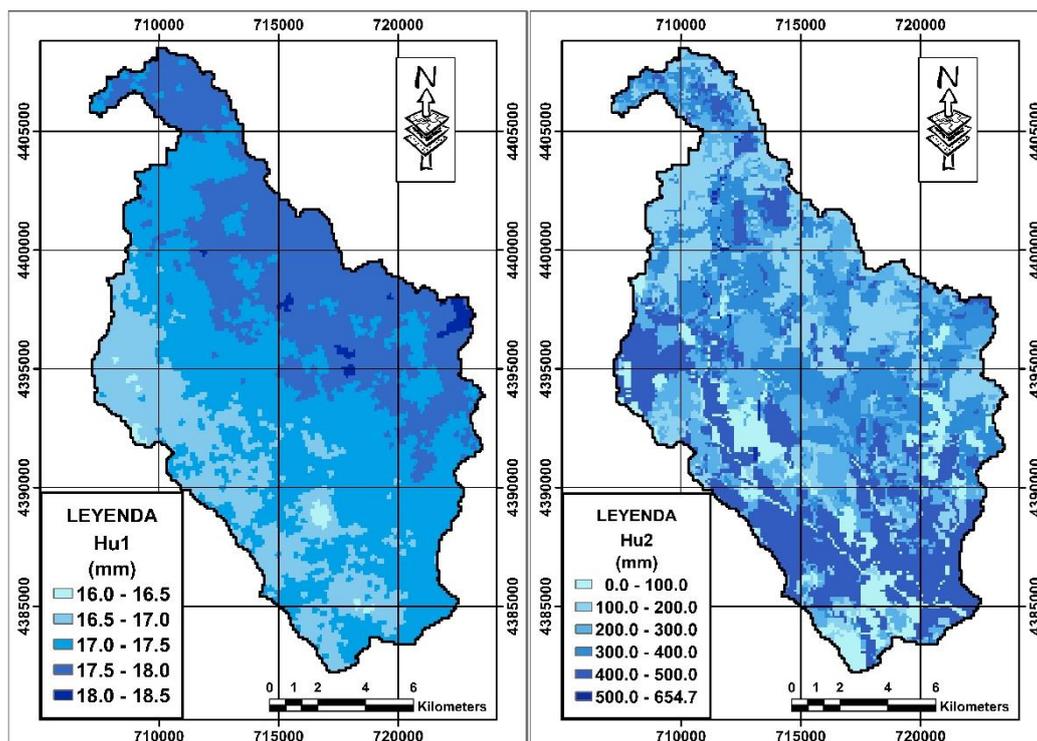
AWC\_FC<sub>2</sub> = Contenido de agua disponible en el suelo a capacidad de campo (mm/m) en la capa 2.

AWC\_WP<sub>1</sub> = Contenido de agua disponible en el suelo en el punto de marchitamiento permanente (mm/m) en la capa 1.

AWC\_WP<sub>2</sub> = Contenido de agua disponible en el suelo en el punto de marchitamiento permanente (mm/m) en la capa 2.

Prof.raíces = Profundidad de raíces (m).

ROO = Profundidad de suelo hasta roca madre (m).



**Figura 44.** Mapas de almacenamiento estático a capacidad de campo, capa superior (izquierda) e inferior del suelo (derecha) en la cuenca del Carraxet.

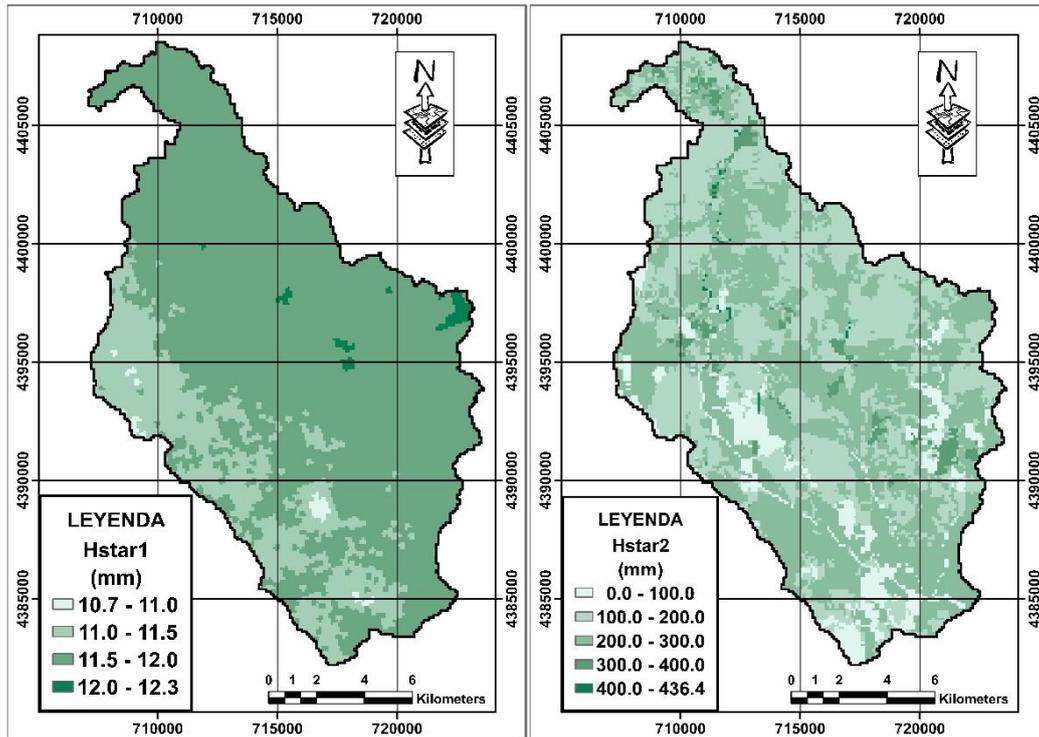


Figura 45. Mapas de almacenamiento estático en el punto óptimo de humedad, capa superior (izquierda) e inferior del suelo (derecha) en la cuenca del Carraxet.

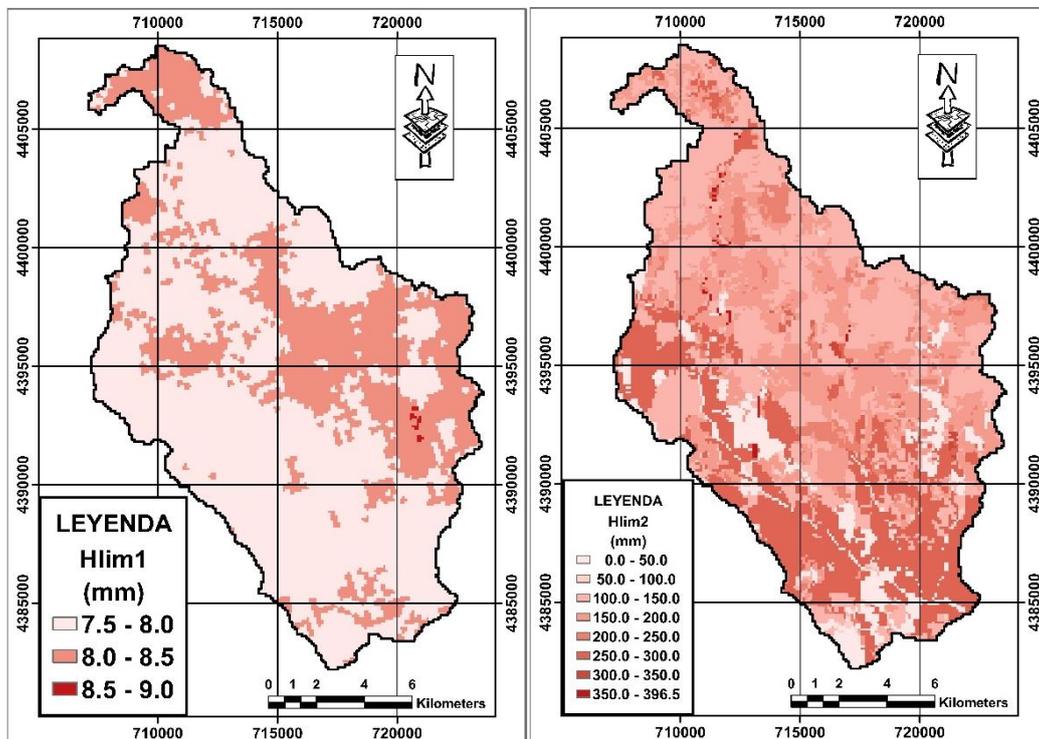


Figura 46. Mapas de almacenamiento estático en el punto de marchitamiento permanente, capa superior (izquierda) e inferior del suelo (derecha) en la cuenca del Carraxet.

### 5.3. MAPAS DE PARÁMETROS DERIVADOS DE LA EDAFOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y LA LITOLOGÍA DE LA CUENCA

#### 5.3.1. Mapa de capacidad de infiltración

Para el cálculo del mapa de capacidad de infiltración ( $K_s$ ), se empleó como información de referencia los mapas de conductividad hidráulica saturada ( $K_S$ ) del European Soil Database, 3D-SoilsHydroGrid. Estos mapas se encuentran disponibles a profundidades de 0 m, 0.05m, 0.15m, 0.30m, 0.60m, 1.00m y 2.00 m de profundidad. Asimismo, estos mapas son obtenidos mediante funciones de pedotransferencia calibradas en base a un gran número de muestras a nivel global, el potencial matricial para la estimación de la conductividad saturada es de 0Mpa (Tóth, *et al.*, 2015). Por parte, mediante un script en R se implementó la ecuación (5.13), en donde se integra las diferentes capas de referencia, correspondientes a las profundidades especificadas para obtener como resultado un valor único de  $K_s$  en cada píxel.

$$K_s = \frac{L}{\sum \frac{H_i}{K_{S_i}}} \quad (5.13)$$

Donde:

$K_s$  = Capacidad de infiltración (mm/h)

$L$  = Profundidad de suelo hasta roca madre (m)

$H_i$  = Distancia en profundidad entre las capas (m)

$K_{S_i}$  = Conductividad hidráulica saturada de referencia (mm/h)

La figura 47 muestra el mapa de conductividad hidráulica que se empleara en el modelamiento eco - hidrológico con TETIS.

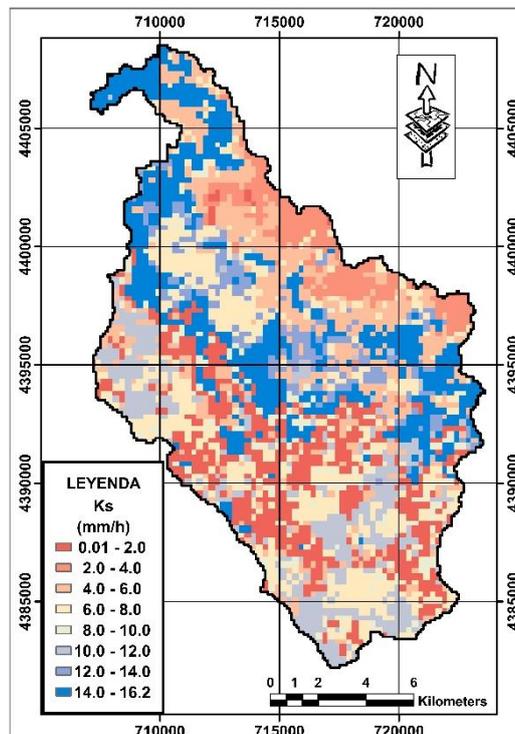


Figura 47. Mapas de capacidad de infiltración en la cuenca del Carraixet.

### 5.3.2. Mapa de conductividad hidráulica en Interflujo

La conductividad hidráulica en Interflujo ( $K_{ss}$ ), fue estimada tomando como referencia los mapas de conductividad hidráulica saturada ( $K_S$ ) del European Soil Database, 3D-SoilsHydroGrid. El valor de  $K_{ss}$  en cada píxel fue determinado mediante la ecuación (5.14), del mismo que para el cálculo de la capacidad de infiltración se trabajó con capas de suelo a profundidades de 0 m, 0.05m, 0.15m, 0.30m, 0.60m, 1.00m y 2.00 m de profundidad. Así mismo, la representación espacial de la conductividad hidráulica en Interflujo se muestra en la figura 48.

$$K_{ss} = (1/L) \sum H_i \cdot K_{S_i} \quad (5.14)$$

Donde:

$K_{ss}$  = Conductividad hidraulica en interflujo (mm/h).

$L$  = Profundidad de suelo hasta roca madre (m)

$H_i$  = Distancia en profundidad entre las capas (m)

$K_{S_i}$  = Conductividad hidraulica saturada de referencia (mm/h)

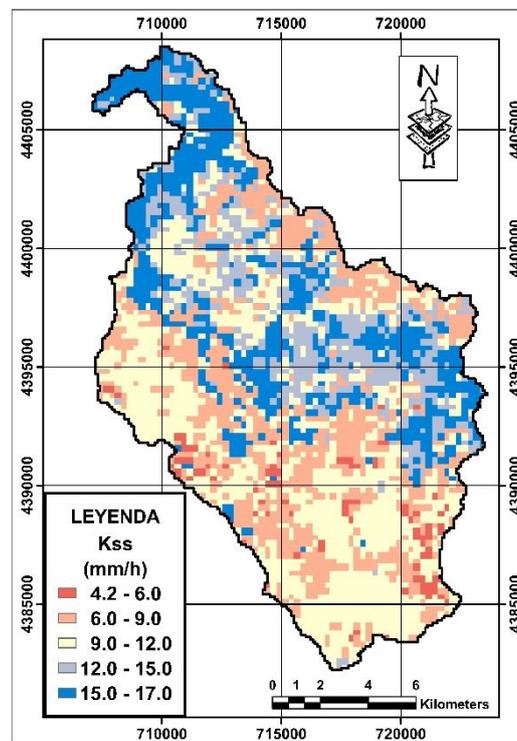
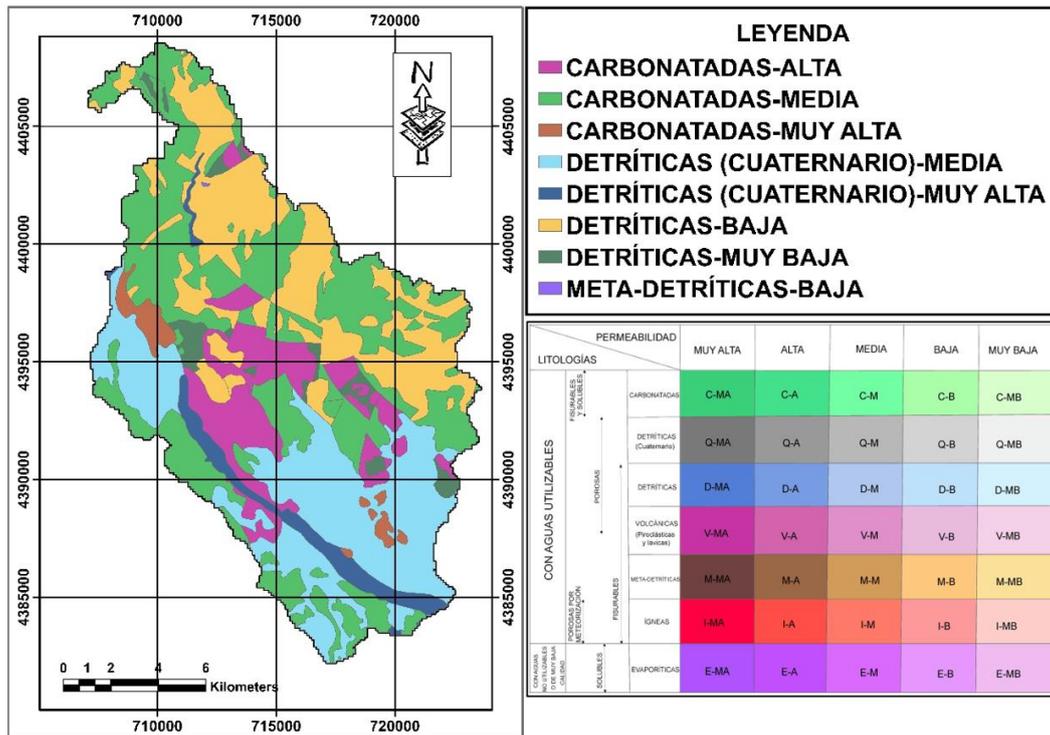


Figura 48. Mapas de conductividad hidráulica en interflujo en la cuenca del Carraixet.

### 5.3.3. Mapa de capacidad de percolación

La capacidad de percolación o conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso se encuentra influenciada por la litología, meteorización y fracturación de la roca. Para su estimación en la cuenca se tomó como referencia dos mapas. El primero fue el mapa de permeabilidad de España a escala 1:200 000 descargado del servidor del Instituto Geológico y Minero Español, este mapa esta creado a partir del Mapa Litoestratigráfico y representa los niveles litoestratigráficos cartografiados que se encuentran agrupados por valores de similar permeabilidad, ver figura 49.



**Figura 49. Mapa de permeabilidad de España (1:200.000) del Instituto Geológico y Minero Español en la cuenca del Carraixet.**

Del presente mapa se obtuvo la representación espacial preliminar de los diferentes niveles de permeabilidad en la cuenca. Asimismo, en la leyenda se muestra 5 tipos de permeabilidad: Muy alta, Alta, Media, Baja y Muy baja que se encuentran relacionadas a distintos tipos de litología: carbonatadas, detríticas, detríticas del cuaternario, volcánicas, metadetríticas, ígneas y evaporíticas.

Una vez analizada esta información y habiendo tomado un conocimiento del contexto hidrogeológico de la cuenca, se recurrió al Mapa Hidrogeológico de España a escala 1:200.000 que toma como referencia el mapa de permeabilidad y representa los niveles litoestratigráficos de las áreas asociadas a los diferentes acuíferos. Los colores azules representan acuíferos porosos, los verdes acuíferos fisurados o kársticos y los marrones, formaciones de muy baja o baja permeabilidad, ver figura 50. Cabe destacar que el presente mapa se tomó como referencia para la estimación de  $K_p$  en la zona de estudio, teniendo en cuenta los valores de permeabilidad que se muestran en la tabla 9 (Domenico, P. y Schwartz, F, 1998).

**Tabla 9. Valores de permeabilidad en función a la categoría**

Categoría	Permeabilidad (m/día)	Categoría	Permeabilidad (m/día)	Categoría	Permeabilidad (m/día)
C-MB	0.001	D-MB	0.001	Q-B	0.01
C-B	0.01	D-B	0.01	Q-M	0.1
C-M	0.1	D-M	0.1	Q-A	10
C-A	10	D-A	10	Q-MA	1000
C-MA	1000	D-MA	100	V-MB	0.001
E-MB	0.001	M-MB	0.001	V-B	0.01
E-B	0.01	M-B	0.01	I-MB	0.001
E-M	0.1	M-M	0.1	I-B	0.01

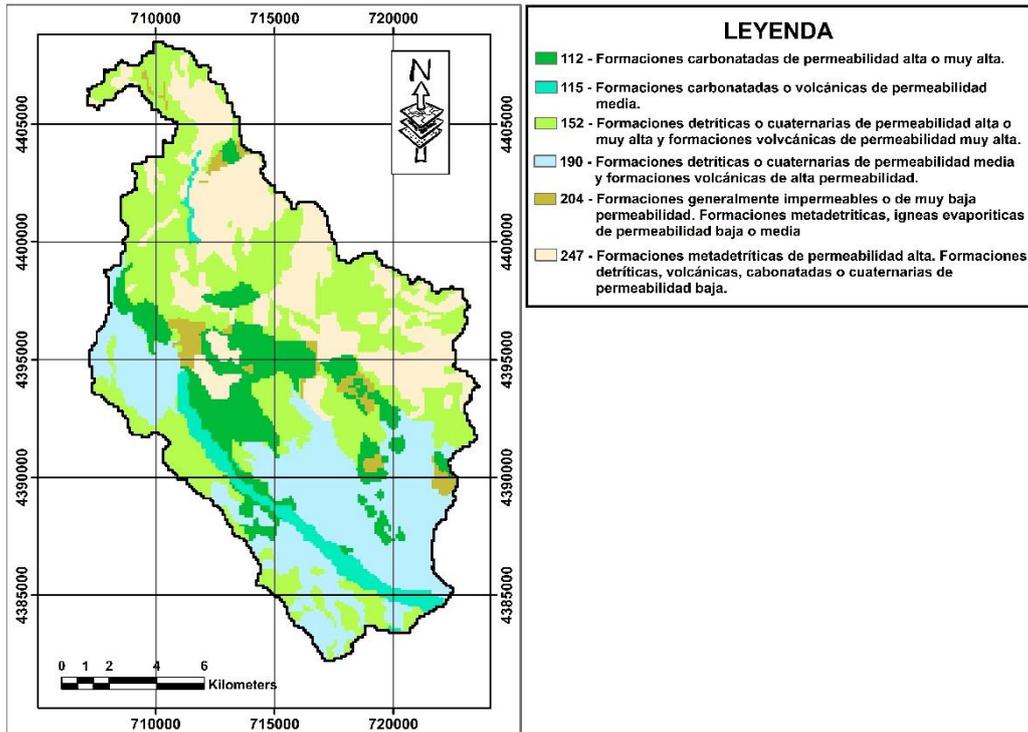


Figura 50. Mapa hidrogeológico de la cuenca del Carraixet.

Una vez ajustada las unidades de permeabilidad a mm/h, se asignaron los siguientes valores a las categorías del mapa hidrogeológico del IGME, ver tabla 10. Asimismo, la representación espacial del mapa de percolación se muestra en la figura 51.

Tabla 10. Valores de permeabilidad en función a las categorías del mapa hidrogeológico

CÓDIGO	CATEGORÍAS	Kp (mm/h)
112	Formaciones carbonatadas de permeabilidad alta o muy alta.	41666.667
152	Formaciones carbonatadas o volcánicas de permeabilidad media.	4166.667
115	Formaciones detríticas o cuaternarias de permeabilidad alta o muy alta y formaciones volcánicas.	416.667
190	Formaciones detríticas o cuaternarias de permeabilidad media y formaciones volcánicas de alta permeabilidad.	4.167
247	Formaciones metadetríticas de permeabilidad alta. Formaciones detríticas, volcánicas, carbonatadas o cuaternarias de permeabilidad baja.	0.417
204	Formaciones generalmente impermeables o de muy baja permeabilidad. Formaciones metadetríticas, ígneas evaporíticas de permeabilidad baja o media.	0.042

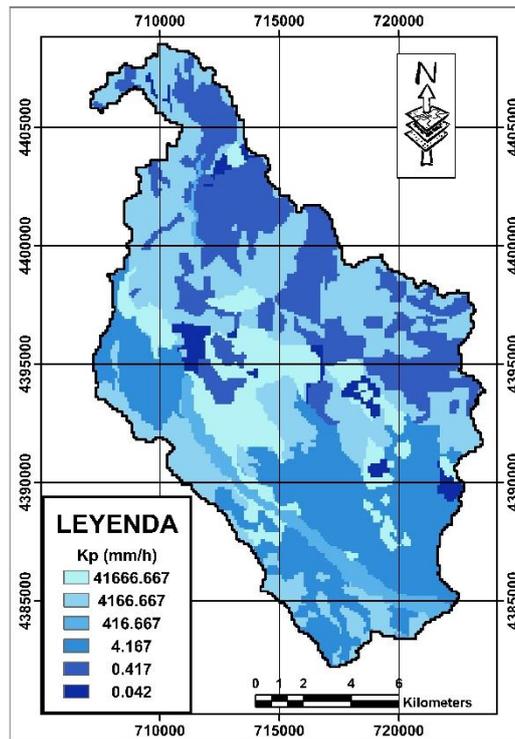


Figura 51. Mapa de capacidad de percolación en la cuenca del Carraixet.

#### 5.4. PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS

TETIS emplea la onda cinemática geomorfológica para el cálculo de la propagación del flujo en cauce. En sus ecuaciones se asimila la forma de la sección a las relaciones de geometría hidráulica (Leopold y Maddock, 1953). Así mismo, se considera que existe una relación entre el caudal a sección llena en un punto y el área de cuenca que drena a través de este para una zona con condiciones climáticas y morfológicas homogéneas (Leopold, Wolmany Miller, 1964). Para poder implementar el modelo, es necesaria la definición de nueve parámetros geomorfológicos que simplifican la morfología de cárcavas y cauces y permite al modelo realizar la propagación del flujo a lo largo de los mismos durante la simulación.

Debido a que no existen estudios geomorfológicos en la cuenca para la estimación de estos parámetros, una opción es utilizar los valores por defecto que nos proporciona TETIS. Sin embargo, se ha decidido emplear los valores de los parámetros geomorfológicos determinados para la cuenca del río Tajo (DIHMA, 2001) debido a que es una cuenca vecina con unas características geomorfológicas similares, ver tabla 11. Tras evaluar la idoneidad de la asignación de unos u otros parámetros mediante diferenciación por regiones homogéneas, se ha decidido implementar a nuestro modelo TETIS con los parámetros geomorfológicos de la región B que corresponden a la cuenca media del río Tajo.

Tabla 11. Valores de los parámetros geomorfológicos de referencia determinados para la cuenca del Río Tajo (DIHMA, 2001)

	$Q_{secc}=C_1 \cdot A_d^{exp1}$	Ancho= $C_2 \cdot Q_{secc}^{exp2}$	Ancho= $\alpha \cdot Q_{estac}^{exp3}$	$D_{sed}=C_4 \cdot (Y.S_0)^{exp4}$	Rug.= $C_5 \cdot D_{sed}^{exp5}$
<b>Regiones A, B y D</b>	$Q=1.2968 \cdot A_d^{0.7571}$	$An=3.1301 \cdot Q^{0.5088}$	$An=\alpha \cdot Q^{0.3253}$	$Ds=6.5156 \cdot Q^{0.6548}$	$N=0.047 \cdot D^{0.167}$
<b>Región C</b>	$Q=2.4818 \cdot A_d^{0.7494}$	$An=1.2103 \cdot Q^{0.7161}$	$An=\alpha \cdot Q^{0.2396}$	$Ds=1.3833 \cdot Q^{0.2437}$	$N=0.047 \cdot D^{0.167}$
<b>Cauce ppal. Tajo</b>	$Q=1.495 \cdot A_d^{0.844}$	$An=1.1229 \cdot Q^{0.6263}$	$An=\alpha \cdot Q^{0.04}$	$Ds=1.3651 \cdot Q^{0.3912}$	$N=0.047 \cdot D^{0.167}$

El motivo de esta decisión se debe a que estos valores ya se han implementado en cuencas cercanas obteniendo resultados favorables, tal como es el caso de la cuenca del río Júcar ( Ramos y Francés, 2014), ver tabla 12.

**Tabla 12. Parámetros geomorfológicos utilizados en la modelación con TETIS en la cuenca del Carraixet.**

RELACIONES GEOMORFOLÓGICAS	Y = Coeficiente X Exponente	Coeficiente	Exponente
Área acumulada de la cuenca y caudal a sección llena	$\Lambda = \kappa Q_b^\phi$	1.2968	0.7571
Ancho de la sección transversal a sección llena y caudal a sección llena	$w_b = \alpha Q_b^{\alpha 1}$	3.1301	0.5088
Ancho de la sección transversal y el caudal	$w = Q^{\alpha 2}$		0.3253
Diámetro del sedimento, la pendiente y la profundidad del flujo	$d = C_d (y s_o)^{\theta}$	6.5156	0.6548
Coeficiente de rugosidad y el diámetro del sedimento	$n = c_n d^\xi$	0.0470	0.1667

Es necesario mencionar que los parámetros geomorfológicos que se muestran en la tabla 5.7 fueron asignados tanto al cauce como a cárcavas. Así mismo, se asumió la cuenca del Carraixet como una región única y homogénea. Se prevé que un futuro la modificación o actualización de estos parámetros será posible, siempre y cuando se disponga de un estudio con valores regionales. El área umbral definida para el flujo base e Interflujo fue de 0.5 km<sup>2</sup> y 0.01 Km<sup>2</sup> respectivamente, la definición de estas áreas umbrales en TETIS permite la diferenciación entre ladera, cárcava y cauce. Por ejemplo, el área umbral para interflujo permite a TETIS diferenciar entre laderas y cárcavas; de la misma forma, un área umbral para el flujo base permite la distinción interna entre cárcavas y cauces.

### 5.5. MAPA ZONAS KARSTICAS Y MANANTIALES

TETIS modela la respuesta de las zonas Kársticas mediante 2 tanques. En el primero, el tanque gravitacional simula el movimiento rápido del flujo del suelo y del epikarst hacia el manantial; mientras que el tanque que conceptualiza al acuífero simula una respuesta más lenta. La precipitación que cae en los píxeles definidos como zonas de karst se puede convertir bien en escorrentía superficial o bien en infiltración hacia el acuífero kárstico, por el cual se propagará hasta alcanzar una salida. Estas salidas de los acuíferos kársticos se representan en TETIS mediante la definición de manantiales.

Para la representación espacial de las zonas kársticas en la cuenca del Carraixet, se procedió a descargar el mapa de Karst a escala 1:1.000.000 del servidor del Instituto Geológico y Minero Español, ver figura 52. Asimismo, la definición de manantiales se realizó en base al inventario de la guardería fluvial de la Confederación Hidrográfica del Júcar, la tabla 13 muestra las coordenadas de los manantiales para nuestra área de estudio.

Las zonas kársticas han sido redefinidas de manera que se encuentran restringidas a aquellos píxeles correspondientes a las diferentes áreas vertientes a los manantiales. Esta redefinición de las zonas kársticas fue necesaria para asegurar que TETIS modelara únicamente los manantiales propuestos y no generase otros en los contornos de las zonas kársticas. En ocasiones los manantiales se situaban en celdas sin vertientes. Las coordenadas se adaptaron para el modelo de 100m mediante el empleo de GIS, ver figura 53.

IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ECO-HIDROLÓGICO PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL CARRAIXET (VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

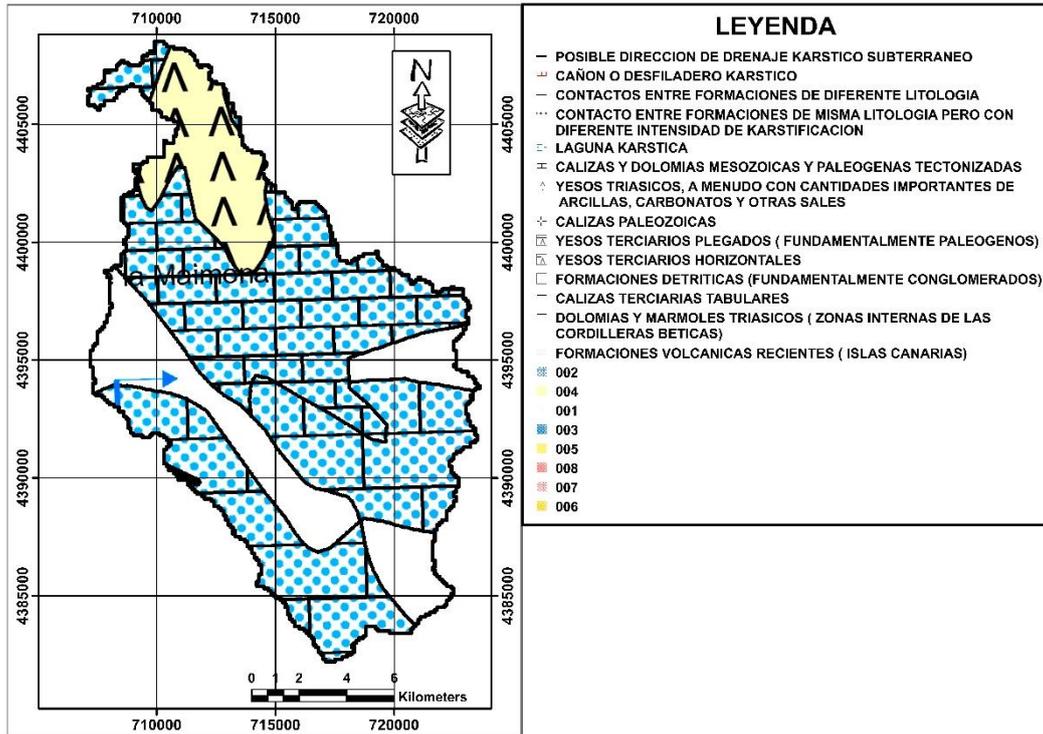


Figura 52. Mapa de zonas kársticas en la cuenca del Carraixet.

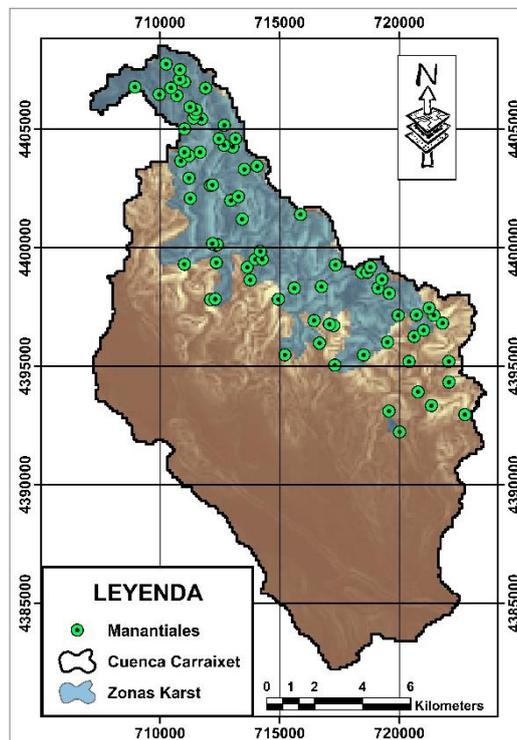


Figura 53. Mapa de zona karst y manantiales que se han considerado en la simulación hidrológica para la cuenca del Carraixet.

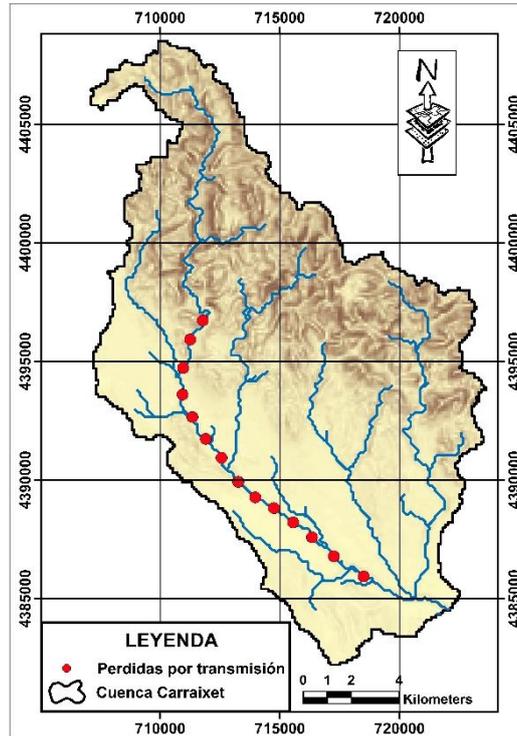
**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ECO-HIDROLÓGICO PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL  
CARRAIXET (VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

**Tabla 13. Denominación y situación geográfica de los manantiales considerados en la cuenca del Carraixet.**

NOMBRE DEL MANANTIAL	X	Y	NOMBRE DEL MANANTIAL	X	Y
	ETRS89 30N	ETRS89 30N		ETRS89 30N	ETRS89 30N
Manantial El Pantano	720004.31	4392225.27	Fuente de Pardalets	714267.373	4399505.33
Fuente Del Oro	722735.29	4392954.26	Fuente del Pi	714181.378	4399839.33
Manantial Ullal Dels Trencalls	719559.282	4393104.3	Manantial La Legona	712341.402	4400102.33
Manantial Fuente de Camanal	721334.277	4393338.28	Manantial del Bau	712385.402	4400121.33
Manantial El Sif	720773.263	4393912.3	Fuente La Molera	712185.401	4400167.33
Manantial Ullat de Moncudío	722067.265	4394329.28	Manantial Sargatillo	713427.397	4401198.32
Fuente Volaria	717300.277	4395044.34	Fuente Tristan	715867.355	4401399.33
Manantial Fuente El Molino	720397.27	4395192.31	Fuente Arcis	712949.409	4401985.32
Fuente El Mallo	722058.267	4395201.29	Fuente El Rincon	711262.402	4402074.34
Fuente de Potrillos	718501.276	4395474.33	Fuente Molinera	713267.404	4402148.32
Fuente de La Abeja	715215.302	4395474.34	Manantial El Morteral	712097.412	4402623.33
Manantial La Olla	716656.293	4395971.34	Fuente Balsica del Tio Pepe	712185.413	4402641.33
Fuente de Deula	719502.277	4396013.32	Fuente Rama	711204.405	4402930.34
Fuente Sagrado Corazon de Jesus La Salud	720611.275	4396250.31	Fuente Sacañi	713520.404	4403301.32
Fuente de San Jose El Paellero	721005.274	4396510.3	Fuente El Cardaire	714048.396	4403442.31
Manantial Font Seca de La Poblet	717253.294	4396711.34	Fuente Del Retor	710867.405	4403659.34
Manantial El Minat de La Pobleta	717075.297	4396765.34	Fuente La Huertecica	711215.409	4403871.34
Fuente de La Humbria	721797.272	4396810.3	Fuente de Pupe	711673.414	4404023.33
Fuente El Marche	716435.306	4396919.34	Fuente de Las Higueras	711013.408	4404027.34
Manantial Baseta de Valero	721437.275	4397138.3	Fuente del Tormo	713040.417	4404243.31
Manantial Fuente La Miseria	719943.282	4397138.32	Fuente El Vallejo	712673.424	4404313.31
Manantial del Marianet	720707.278	4397165.31	Fuente Del Muro	712463.425	4404593.32
Manantial La Horteta	721237.277	4397449.3	Fuente Loca	713153.416	4404596.31
Font de La Cava	712108.371	4397804.34	Fuente de La Fonfria	711023.412	4405003.34
Fuente La Malaena	714942.338	4397823.34	Fuente Iranzo	712675.428	4405159.31
Font Del Flare	712302.371	4397829.33	Fuente Rocha Las Vueltas	711727.421	4405428.33
Fuente La Prunera	719574.29	4398069.32	Fuente de La Fonfria 2	711391.417	4405459.33
Fuente La Gota	715611.334	4398288.34	Fuente Tejeria o del Sotero	711480.419	4405644.33
Manantial de Mugro	719103.294	4398293.33	Fuente La Tejeria	711501.42	4405816.33
Fuente Del Berro	716744.318	4398353.34	Fuente Los Terreros	711243.416	4405929.33
Fuente Dels Sentits	713760.368	4398637.33	Fuente de La Alameda	710702.398	4406403.33
Manantial Pou del Curro del Mugro	719260.296	4398655.33	Manantial Balsa El Mas	709964.389	4406460.35
Fuente El Llantiscle	718418.305	4398954.33	Manantial de Piñel	711899.401	4406727.3
Fuente Tio GuaGuao Caseta del Satre	718658.303	4398964.33	Manantial Balsa de Torres	710449.388	4406731.33
Manantial Ullal La Remansa	713635.378	4399169.33	Fuente El Rebollo	708947.375	4406771.36
Fuente El Tio Sopa	718787.303	4399184.33	Fuente Chirivilla 3	711019.386	4406991.31
Fuente El Poll	717331.318	4399268.34	Fuente Chirivilla 2	710815.382	4407098.32
Fuente Quebranta	712346.395	4399368.33	Fuente Chirivilla	710826.372	4407505.31
Fuente Melchor	711011.279	4399298.94	Manantial Mojon de Lozano	710250.363	4407741.31
Manantial Ullal del Correcher	713971.378	4399505.33			

### 5.6. PÉRDIDAS POR TRANSMISIÓN EN CAUCE

Pedrajas (2017) demostró que la modelación hidrológica mejora si se introduce pérdidas por transmisión a lo largo del cauce. Por consiguiente, se puede simular de manera adecuada el comportamiento de los caudales mínimos en el trayecto del río, ajustándose en términos de duración de caudales y permanencia de una forma adecuada a la realidad. Para nuestro modelo las pérdidas por transmisión se incorporaron de forma puntual y su distribución fue una por cada kilómetro de cauce tal como se muestra en la figura 54.



**Figura 54.** Ubicación espacial de las pérdidas por transmisión en la cuenca del Carraxet.

---

## **CAPITULO 6. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO TETIS**

---

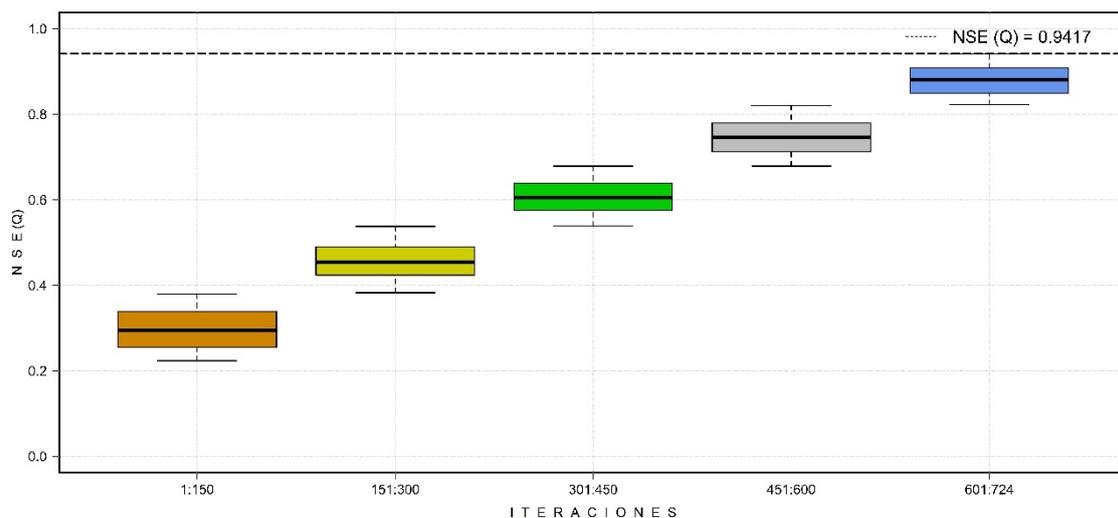
La calibración del modelo Ecohidrológico TETIS, parte con un ajuste manual de los 9 factores correctores correspondientes al submodelo hidrológico. Asimismo, se tomó como referencia el estudio de **Sanchis, M et al. (2019)** para la estimación inicial de los parámetros del submodelo de vegetación. Posteriormente, se realizó la calibración automática con las configuraciones monobjetivo y multiobjetivo empleando los algoritmos de SCE-UA y MOSCEM-UA, tal como se detallará más adelante.

Tras el proceso de calibración se realizó la validación del modelo, con el objetivo de verificar su bondad de ajuste. Los índices de eficiencia empleados en la calibración y validación del modelo fueron el NSE (índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe), VE (error en volumen) y el STE (índice de eficiencia espacio – temporal).

## 6.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO ECOHIDROLÓGICO TETIS

### 6.1.1. Monobjetivo temporal

En este tipo de calibración monobjetivo temporal se ha empleado el algoritmo de SCE-UA para optimizar el ajuste del modelo, la función objetivo empleada fue el NSE(Q) calculado entre los caudales observados y simulados. Asimismo, el algoritmo busca que este índice de eficiencia sea lo más cercano a la unidad. Con relación al criterio de convergencia este se ha producido después de 724 iteraciones con un NSE(Q) = 0.9417, ver figura 55.



**Figura 55. Evolución del índice NSE en el proceso de calibración automática**

Después de realizar la calibración, se ha procedido a efectuar la validación del modelo en donde se ha obtenido también un buen resultado de NSE(Q), siendo su valor en este periodo 0.6215. En la figura 56, podemos observar que TETIS representa adecuadamente los caudales altos y bajos en el periodo de calibración; sin embargo, se tiene una ligera sobre estimación de los caudales medios los cuales oscilan entre 0.1 m<sup>3</sup>/s y 6m<sup>3</sup>/s. Debido a esta sobre estimación el caudal máximo en la etapa de validación no se llega a representar con exactitud; sin embargo, se considera que el modelo se encuentra correctamente implementado una vez analizados los resultados, ver figura 57.

Los factores correctores que multiplican a los parámetros del submodelo hidrológico de TETIS se muestran en la tabla 14. De igual forma, en la tabla 15 se puede observar los parámetros establecidos para el submodelo de vegetación de TETIS. Es necesario mencionar que para el

submodelo de vegetación se tomó como referencia los parámetros obtenidos en la investigación de Sanchis, M *et al.* (2019). Por otro lado, los nombres completos de las abreviaturas correspondientes a los parámetros de vegetación se muestran en la tabla 2 del capítulo 2.

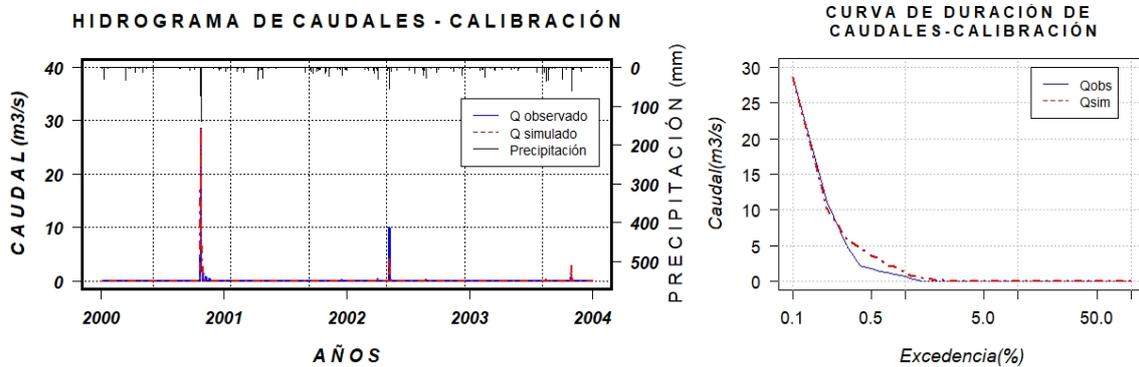


Figura 56. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración monobjetivo temporal.

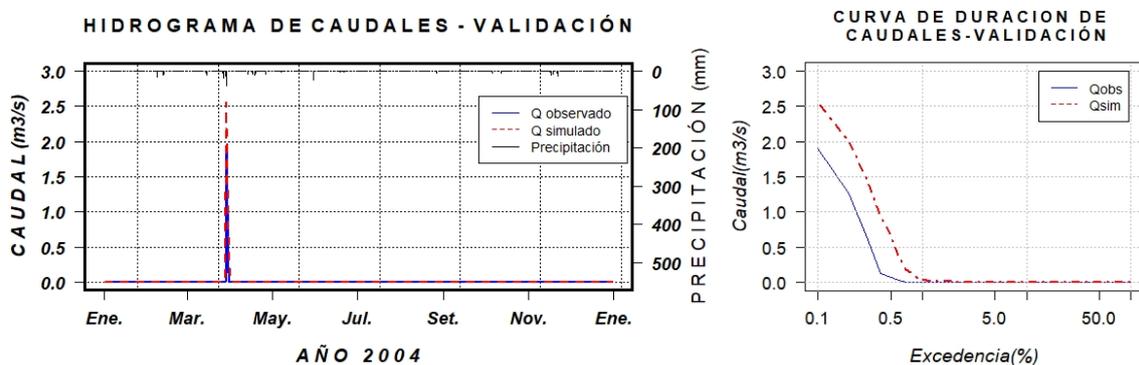


Figura 57. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración monobjetivo temporal.

Tabla 14. Factores correctores iniciales y finales del submodelo hidrológico para una calibración monobjetivo temporal.

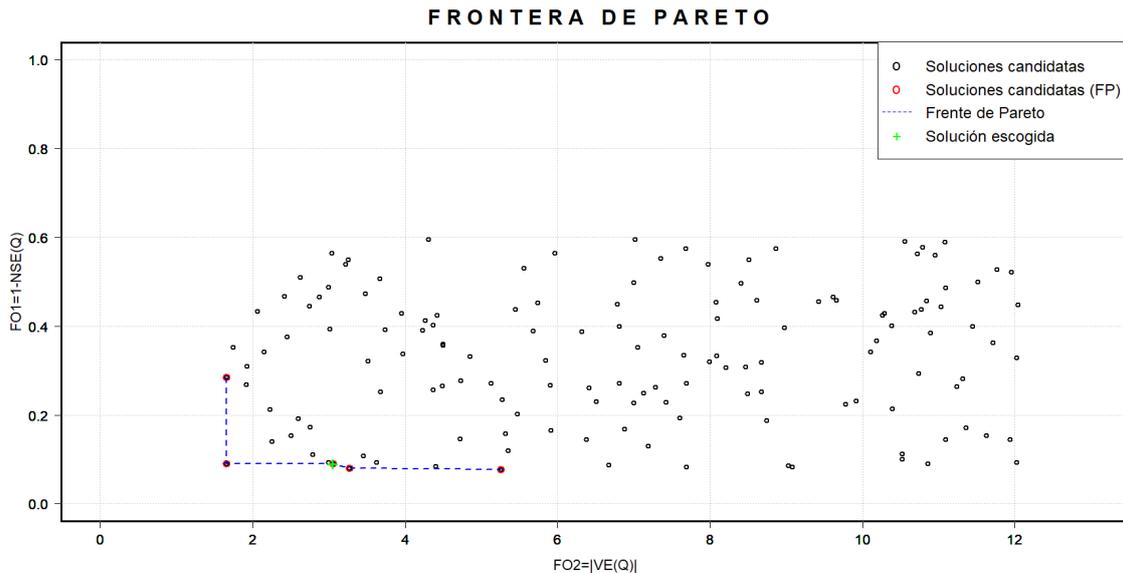
Modelo	Factores Correctores	Unid .	Valor Inicial	Rango de búsqueda	Valor Final
SUBMODELO HIDROLÓGICO	FC1 - Almacenamiento estático del suelo	[-]	2.9	[0.5-3.5]	3.4981
	FC2 - Evapotranspiración	[-]	0.9	[0.9-1.3]	1.2318
	FC3 - Infiltración	[-]	1.4	[0.1-1.5]	1.2705
	FC4 - Escorrentía directo	[-]	0.5	[0.5-10.0]	0.5047
	FC5 - Percolación	[-]	5	[5-10]	6.3048
	FC6 - Interflujo	[-]	100	[10-500]	200.00
	FC7 - Flujo subterráneo profundo	[-]	1000	[0.5-10000]	10000
	FC8 - Flujo base	[-]	0.1	[0-1]	0.0
	FC9 - Velocidad en red fluvial	[-]	0.5	[0.1-1]	0.1404

**Tabla 15. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS, referencia Sanchis, M et al. (2019).**

Código de uso de suelo	ExpFDisp	ExpFestres	Alm max	% raíces	Kdecay	T° opt	LUE	rResp	Kmuerte	SLA	LAlmax
1	2	1	1.189	0.309	0.505	18	1.621	0.007	0	5.766	2.915
2	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
3	1	1	0	1	0.512	18	1.39	0.007	0.001	1	0.2
4	3	1	1.259	0.728	0.475	18	0.104	0.007	0	23	0.156
5	1	1	0.674	0.51	0.483	18	1.817	0.007	0	27.992	0.761
6	1	1	2.033	0.173	0.519	18	0.677	0.007	0	30.069	1.738
7	1	2	0.773	0.173	0.589	18	1.119	0.007	0.001	5.143	2.578
8	2	2	1.867	0.127	0.579	18	0.645	0.007	0.001	29.014	1.897
9	1	1	0.845	0.048	0.5	18	1.209	0.007	0	6.108	2.181
10	1	2	0.669	0.002	0.525	18	1.201	0.007	0.001	6.276	2.021
11	2	2	0.945	0.067	0.501	18	1.932	0.007	0	5.526	2.628
12	2	2	1.03	0.039	0.517	18	2.038	0.007	0	6.244	2.632
13	2	2	1.282	0.2	0.548	18	1.816	0.007	0	6.47	2.046
14	2	2	1.177	0.553	0.513	18	1.873	0.007	0	6.314	2.94
15	2	2	0.7	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	3
16	1	1	1.324	1	0.512	18	0	0.007	0.001	1	0.502
17	2	2	0.446	0.095	0.455	18	1.904	0.007	0	5.02	2.985
18	1	2	1.291	0.184	0.512	18	1.892	0.007	0.001	6.295	3.327
19	2	2	1.178	0.158	0.469	18	1.931	0.007	0	5.229	1.851
20	2	2	1.158	0.1	0.462	18	1.907	0.007	0	5.019	1.803
21	2	2	1.335	0.144	0.507	18	1.952	0.007	0	6.263	2.855
22	2	2	1.4	0.1	0.512	18	1.923	0.007	0	6	2.8
23	2	2	1.2	0.1	0.512	18	1.803	0.007	0	6	2
24	1	2	0.4	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	2
25	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
26	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
27	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
28	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
29	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
30	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
31	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
32	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2

### 6.1.2. Multiobjetivo Temporal

En la presente calibración se ha empleado el algoritmo de MOSCEM-UA para optimizar (minimizar) las siguientes funciones objetivo:  $FO1=1-NSE(Q)$  y  $FO2=|VE(Q)|$ . El número de iteraciones realizadas fueron 5000, en donde solo 144 soluciones fueron seleccionadas como candidatas, de este grupo solo 5 soluciones candidatas conforman la frontera de Pareto. Los parámetros obtenidos en las 5 soluciones candidatas fueron utilizados para realizar el periodo de validación, y se ha seleccionado como solución óptima la que presenta mejor desempeño en el periodo de validación, ver figura 58. Para la solución escogida el índice de NSE y VE obtenidos en la etapa de calibración fueron 0.9102 y 3.0523% respectivamente.



**Figura 58. Soluciones candidatas y frontera de Pareto al final del proceso de optimización con configuración multiobjetivo temporal.**

Asimismo, El índice de NSE y VE para el periodo de validación fueron 0.7584 y 12.3254% respectivamente. Para tener una mejor visualización de los resultados se ha generado los hidrogramas y las curvas de duración de caudales para las etapas de calibración (figura 59) y validación (figura 60) del modelo, en estas se puede observar que los caudales simulados se reproducen adecuadamente. Sin embargo, en la etapa de calibración se puede observar que el caudal pico es ligeramente subestimado por el modelo y los caudales que oscilan entre  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  son ligeramente sobrestimados por el modelo. En la etapa de validación se puede apreciar que los caudales simulados representan satisfactoriamente a los caudales observados con una ligera subestimación del caudal pico para este periodo.

Para la solución óptima escogida, los factores correctores correspondientes a los parámetros del submodelo hidrológico se muestran en la tabla 16. Para el caso del submodelo de vegetación de TETIS, se ha decidido calibrar los usos de suelo correspondientes a las zonas forestales de la cuenca y además se ha decidido calibrar 6 de los 11 parámetros de vegetación ya que estos son los más sensibles para el proceso de calibración en la vegetación. En la tabla 17, se puede observar mediante color verde los parámetros de vegetación obtenidos en el proceso de calibración multiobjetivo temporal.

IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ECO-HIDROLÓGICO PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL  
CARRAIXET (VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

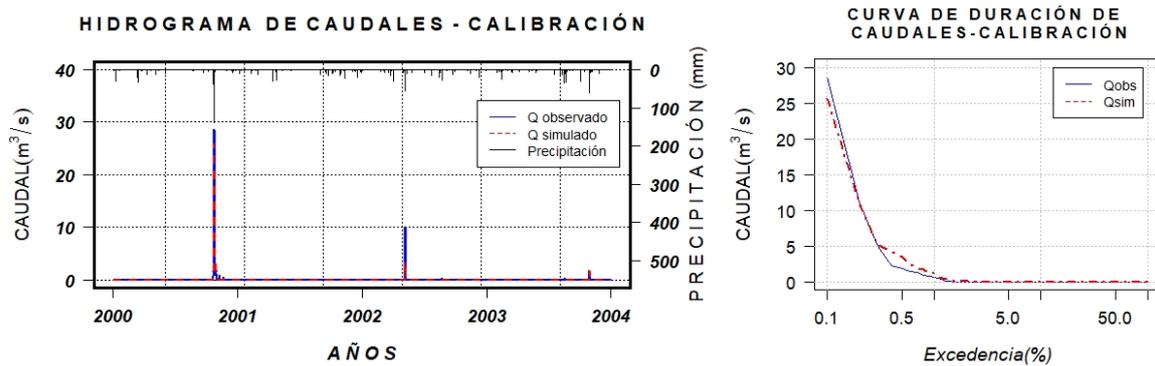


Figura 59. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración multiobjetivo temporal.

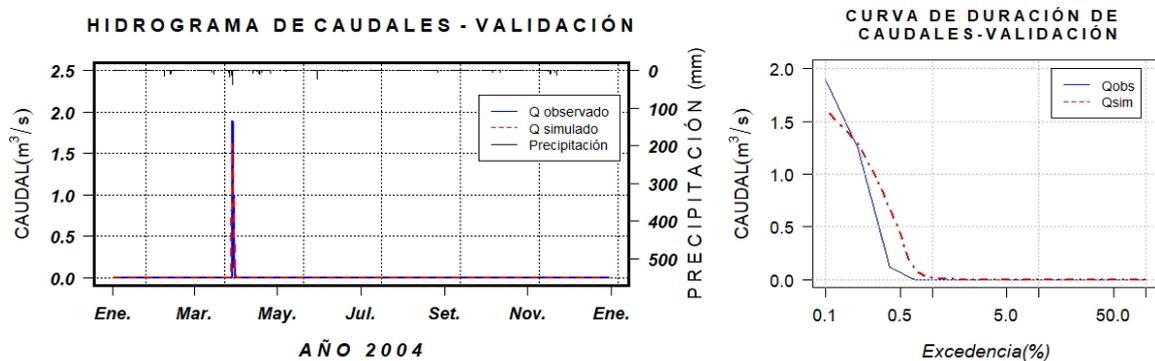


Figura 60. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración temporal – multiobjetivo.

Tabla 16. Factores correctores iniciales y finales del submodelo hidrológico para una calibración temporal multiobjetivo.

Modelo	Factores Correctores	Unid .	Valor Inicial	Rango de búsqueda	Valor Final
SUBMODELO HIDROLÓGICO	FC1 - Almacenamiento estático del suelo	[-]	2.9	[0.5-3.5]	3.3647
	FC2 - Evapotranspiración	[-]	0.9	[0.9-2.0]	1.9274
	FC3 - Infiltración	[-]	1.4	[0.1-2.0]	1.4108
	FC4 - Escorrentía directa	[-]	0.5	[0.005-10.0]	0.4208
	FC5 - Percolación	[-]	5	[5-10]	6.3897
	FC6 - Interflujo	[-]	100	[10-500]	200.00
	FC7 - Flujo subterráneo profundo	[-]	1000	[0.5-10000]	10000
	FC8 - Flujo base	[-]	0.1	[0-1]	0.0
	FC9 - Velocidad en red fluvial	[-]	0.5	[0.05-1]	0.0991

**Tabla 17. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS para una calibración multiobjetivo temporal.**

Código de uso de suelo	ExpFDisp	ExpFestres	Alm max	% raíces	Kdecay	T° opt	LUE	rResp	Kmuerte	SLA	LAlmax
1	2	1	1.16	0.335	0.524	18	1.402	0.007	0	6.944	2.437
2	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
3	1	1	0	1	0.512	18	1.39	0.007	0.001	1	0.2
4	3	1	0.983	0.727	0.423	18	0.109	0.007	0	23	0.144
5	1	1	0.463	0.925	0.519	18	1.834	0.007	0	20.67	0.789
6	1	1	1.946	0.115	0.471	18	0.677	0.007	0	29.396	1.884
7	1	2	0.612	0.127	0.597	18	1.01	0.007	0.001	6.796	3.344
8	2	2	2.076	0.21	0.516	18	0.633	0.007	0.001	29.739	1.618
9	1	1	0.855	0.008	0.5	18	1.011	0.007	0	5.387	1.753
10	1	2	0.724	0.141	0.506	18	1.223	0.007	0.001	5.065	2.825
11	2	2	0.991	0.082	0.499	18	2.041	0.007	0	6.9	2.67
12	2	2	0.904	0.174	0.525	18	1.891	0.007	0	6.695	2.504
13	2	2	1.205	0.017	0.489	18	2.078	0.007	0	5.859	2.025
14	2	2	1.259	0.407	0.513	18	1.967	0.007	0	6.799	2.873
15	2	2	0.7	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	3
16	1	1	1.324	1	0.512	18	0	0.007	0.001	1	0.502
17	2	2	0.377	0.118	0.474	18	1.929	0.007	0	6.604	3.17
18	1	2	1.108	0.034	0.428	18	1.913	0.007	0.001	6.283	3.14
19	2	2	1.242	0.092	0.515	18	1.959	0.007	0	6.259	2.233
20	2	2	1.299	0.1	0.454	18	1.938	0.007	0	6.162	2.121
21	2	2	1.457	0.062	0.517	18	1.984	0.007	0	5.38	2.798
22	2	2	1.4	0.1	0.512	18	1.923	0.007	0	6	2.8
23	2	2	1.2	0.1	0.512	18	1.803	0.007	0	6	2
24	1	2	0.4	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	2
25	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
26	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
27	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
28	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
29	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
30	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
31	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
32	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
<b>Rango de búsqueda</b>			[0.2 - 3]	[0 - 1]	[0.4 - 0.6]		[0.08 - 2.1]			[1 - 31]	[0.1 - 3.4]

### 6.1.3. Monobjetivo espacio - temporal

Para la siguiente configuración se han analizado 2 escenarios de calibración monobjetivo espacio - temporal. En la primera se ha empleado a la SM como variable de estado, siendo la función objetivo  $FO_1 = 1 - STE(SM)$ . En la segunda, se ha utilizado el LAI como variable de estado y la función objetivo a minimizar fue  $FO_2 = 1 - STE(LAI)$ . En todas las calibraciones se ha empleado el algoritmo de SCE-UA para optimizar las funciones objetivo. El criterio de convergencia para la SM y LAI se ha generado después 1050 y 1203 iteraciones respectivamente; los máximos índices de eficiencia espacial (STE) encontrados en el proceso de calibración fueron:  $STE(SM) = 0.6123$  y  $STE(LAI) = 0.4824$ , tal como se observan en las figuras 61 y 62. No obstante, en el proceso de validación los índices de STE disminuyeron ligeramente siendo sus valores  $STE(SM) = 0.5524$  y  $STE(LAI) = 0.3128$ .

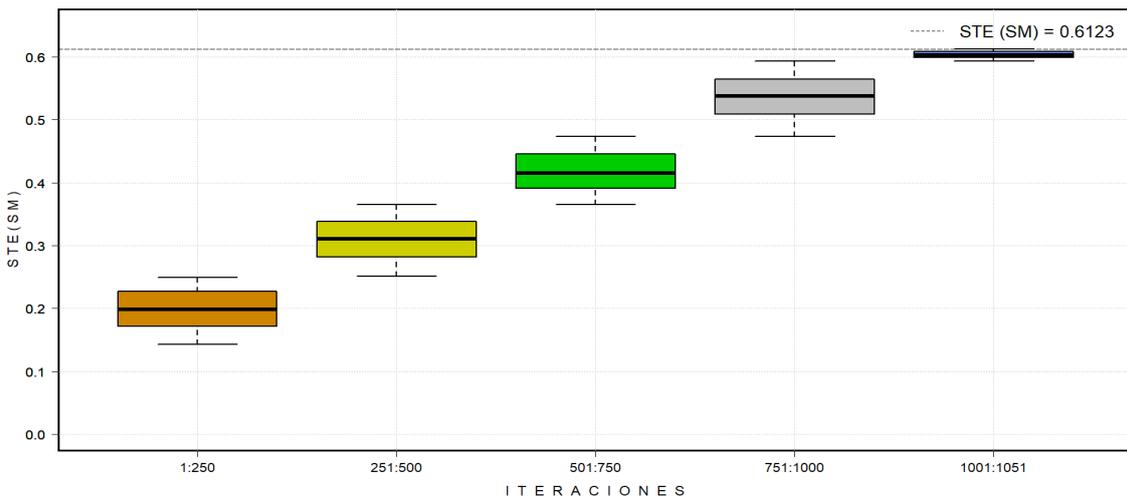


Figura 61. Evolución del STE(SM) en el proceso de calibración automática

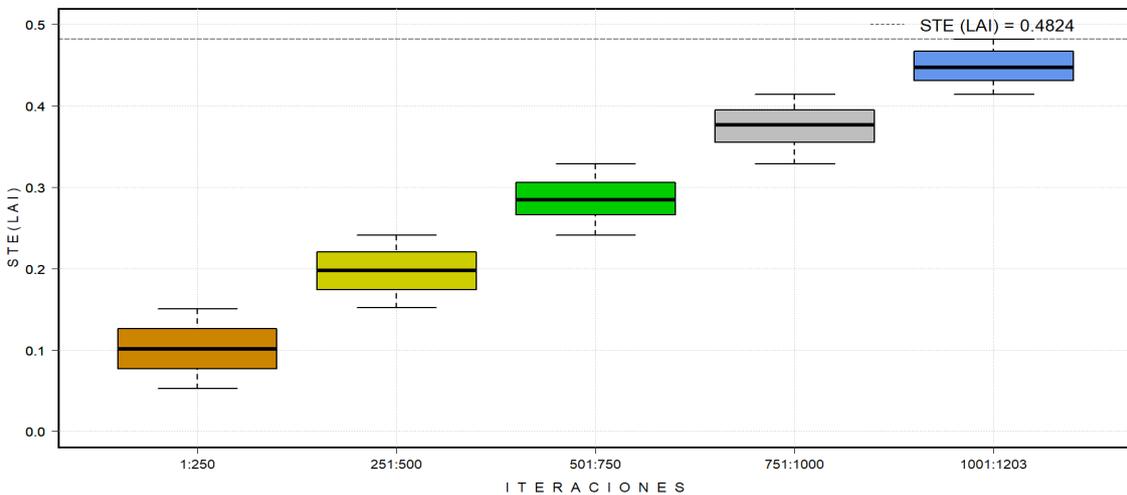
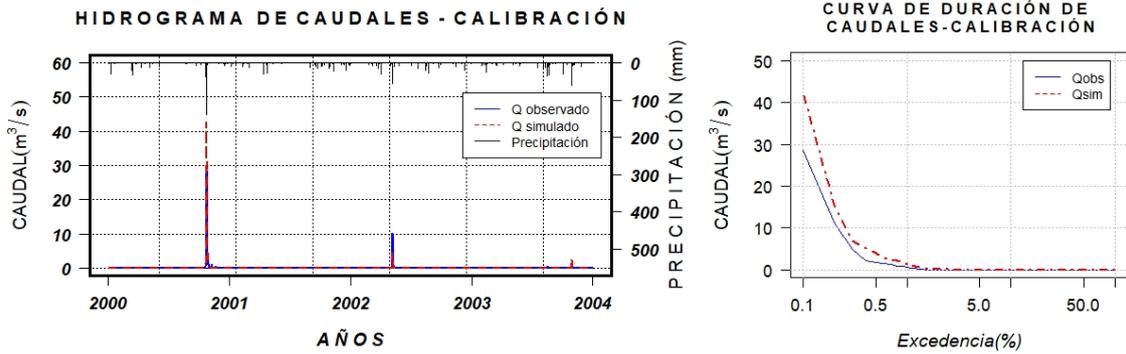
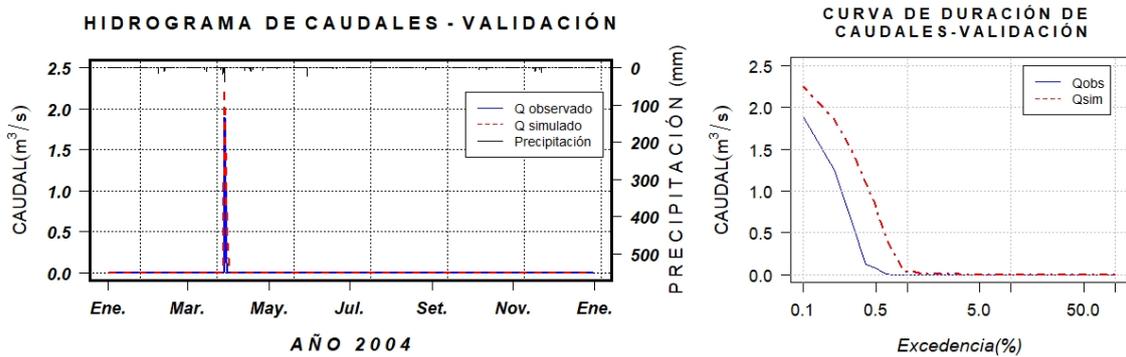


Figura 62. Evolución del índice STE(LAI) en el proceso de calibración automática

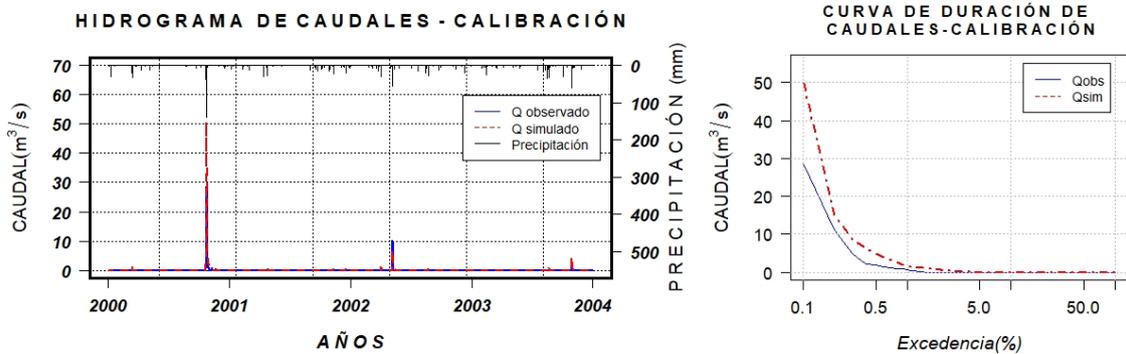
Si analizamos las figuras 63 y 64 podemos observar que el modelo representa adecuadamente los caudales observados para el primer escenario de calibración. Asimismo, los índices de NSE para el periodo de calibración y validación fueron 0.6484 y 0.5221 respectivamente. Por otro lado, en el escenario de calibración 2, el modelo no llega a representar adecuadamente los caudales observados debido a que existe una sobrestimación de estos; los índices de NSE para el periodo de calibración y validación fueron 0.3673 y 0.1235 respectivamente, ver figuras 65 y 66.



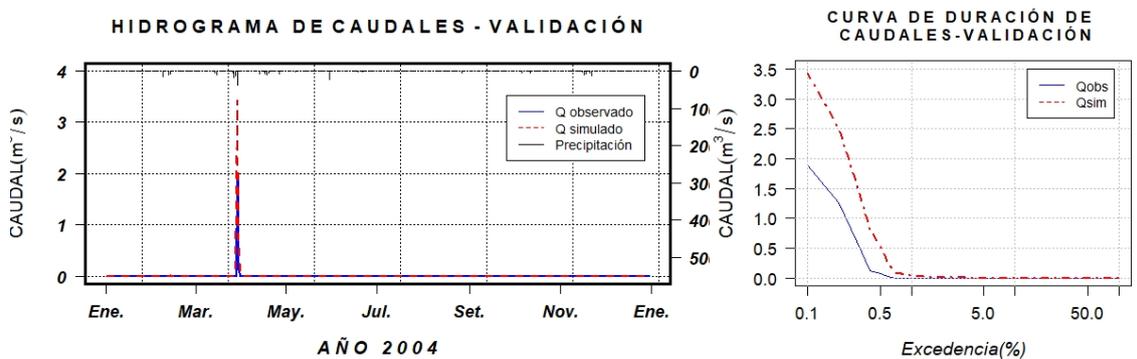
**Figura 63. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración monobjetivo espacio - temporal, escenario 1**



**Figura 64. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración monobjetivo espacio - temporal. Escenario 1.**



**Figura 65. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración monobjetivo espacio - temporal, escenario 2.**



**Figura 66. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración monobjetivo espacio - temporal. Escenario 2.**

Con la solución óptima determinada para cada escenario de calibración, se ha obtenido la tabla 18 que muestran los factores correctores del submodelo hidrológico. Asimismo, en las tablas 19 y 20 podemos observar los parámetros efectivos del submodelo de vegetación; es indispensable mencionar que los parámetros sombreados de color verde son los obtenidos en el proceso de calibración monobjetivo espacio - temporal.

**Tabla 18. Factores correctores iniciales y finales del submodelo hidrológico para una calibración monobjetivo espacio - temporal.**

Factores Correctores	Unid.	Valor Inicial	Rango de búsqueda	E1	E2
				Valor Final	Valor Final
FC1 - Almacenamiento estático del suelo	[-]	2.9	[0.5-3.5]	2.6538	2.5121
FC2 - Evapotranspiración	[-]	0.9	[0.9-2.0]	1.8423	1.0041
FC3 - Infiltración	[-]	1.4	[0.1-2.0]	1.0034	1.0022
FC4 - Escorrentía directo	[-]	0.5	[0.005-10.0]	0.8367	0.1967
FC5 - Percolación	[-]	5	[5-10]	5.9438	6.0453
FC6 - Interflujo	[-]	100	[10-500]	200.00	200.0
FC7 - Flujo subterráneo profundo	[-]	1000	[0.5-10000]	10000	10000
FC8 - Flujo base	[-]	0.1	[0-1]	0.0	0.0
FC9 - Velocidad en red fluvial	[-]	0.5	[0.05-1]	0.0971	0.1451

E1: Calibración monobjetivo espacio - temporal [FO<sub>1</sub>=1-STE(SM)]

E2: Calibración monobjetivo espacio - temporal [FO<sub>2</sub>=1-STE(LAI)]

**Tabla 19. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS para una calibración monobjetivo espacio - temporal – Escenario 1.**

Código de uso de suelo	ExpFDisp	ExpFestres	Alm max	% raíces	Kdecay	T° opt	LUE	rResp	Kmuerte	SLA	LAI max
1	2	1	1.066	0.32	0.48	18	1.54	0.007	0	6.361	2.364
2	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
3	1	1	0	1	0.512	18	1.39	0.007	0.001	1	0.2
4	3	1	0.946	0.901	0.47	18	0.104	0.007	0	23	0.174
5	1	1	0.483	0.522	0.408	18	1.768	0.007	0	25.976	0.757
6	1	1	2.019	0.283	0.421	18	0.71	0.007	0	29.673	1.879
7	1	2	0.778	0.08	0.569	18	1.277	0.007	0.001	6.81	3.151
8	2	2	2.128	0.232	0.495	18	0.685	0.007	0.001	29.575	1.848
9	1	1	0.789	0.122	0.5	18	1.085	0.007	0	6.32	2.387
10	1	2	0.759	0.193	0.511	18	1.185	0.007	0.001	5.48	2.261
11	2	2	1.078	0.162	0.442	18	1.965	0.007	0	5.433	2.572
12	2	2	0.999	0.034	0.548	18	2.039	0.007	0	6.504	2.663
13	2	2	1.164	0.086	0.483	18	1.879	0.007	0	6.761	1.969
14	2	2	1.24	0.437	0.477	18	1.932	0.007	0	6.428	3.004
15	2	2	0.7	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	3
16	1	1	1.324	1	0.512	18	0	0.007	0.001	1	0.502
17	2	2	0.389	0.104	0.453	18	1.877	0.007	0	6.585	2.912
18	1	2	1.148	0.198	0.512	18	1.878	0.007	0.001	6.562	2.874
19	2	2	1.139	0.058	0.508	18	1.931	0.007	0	5.515	1.548
20	2	2	1.224	0.1	0.531	18	1.966	0.007	0	5.666	2.048
21	2	2	1.307	0.105	0.497	18	1.994	0.007	0	5.913	2.71
22	2	2	1.4	0.1	0.512	18	1.923	0.007	0	6	2.8
23	2	2	1.2	0.1	0.512	18	1.803	0.007	0	6	2
24	1	2	0.4	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	2
25	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
26	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
27	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
28	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
29	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
30	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
31	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
32	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
<b>Rango de búsqueda</b>			[0.2 - 3]	[0 - 1]	[0.4 - 0.6]		[0.08 - 2.1]			[1 - 31]	[0.1 - 3.4]

**Tabla 20. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS para una calibración monobjetivo espacio - temporal – Escenario 2.**

Código de uso de suelo	ExpFDisp	ExpFestres	Alm max	% raíces	Kdecay	T° opt	LUE	rResp	Kmuerte	SLA	LAlmax
1	2	1	<b>1.152</b>	<b>0.329</b>	<b>0.515</b>	18	<b>1.402</b>	0.007	0	<b>6.453</b>	<b>2.91</b>
2	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
3	1	1	0	1	0.512	18	1.39	0.007	0.001	1	0.2
4	3	1	<b>1.101</b>	<b>0.953</b>	<b>0.559</b>	18	<b>0.086</b>	0.007	0	<b>23</b>	<b>0.135</b>
5	1	1	<b>0.726</b>	<b>0.852</b>	<b>0.433</b>	18	<b>1.727</b>	0.007	0	<b>24.74</b>	<b>0.755</b>
6	1	1	<b>1.905</b>	<b>0.196</b>	<b>0.423</b>	18	<b>0.812</b>	0.007	0	<b>30.698</b>	<b>1.908</b>
7	1	2	<b>0.755</b>	<b>0.124</b>	<b>0.422</b>	18	<b>1.265</b>	0.007	0.001	<b>5.957</b>	<b>2.787</b>
8	2	2	1.835	0.111	0.558	18	0.794	0.007	0.001	29.278	1.745
9	1	1	<b>0.84</b>	<b>0.001</b>	<b>0.5</b>	18	<b>1.224</b>	0.007	0	<b>5.146</b>	<b>2.371</b>
10	1	2	<b>0.669</b>	<b>0.096</b>	<b>0.525</b>	18	<b>1.106</b>	0.007	0.001	<b>5.402</b>	<b>2.369</b>
11	2	2	<b>1.006</b>	<b>0.049</b>	<b>0.486</b>	18	<b>2.014</b>	0.007	0	<b>5.172</b>	<b>2.547</b>
12	2	2	<b>0.913</b>	<b>0.089</b>	<b>0.529</b>	18	<b>1.989</b>	0.007	0	<b>6.216</b>	<b>2.61</b>
13	2	2	<b>1.224</b>	<b>0.17</b>	<b>0.485</b>	18	<b>1.922</b>	0.007	0	<b>5.492</b>	<b>1.971</b>
14	2	2	<b>1.239</b>	<b>0.585</b>	<b>0.546</b>	18	<b>1.935</b>	0.007	0	<b>5.878</b>	<b>3.108</b>
15	2	2	0.7	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	3
16	1	1	1.324	1	0.512	18	0	0.007	0.001	1	0.502
17	2	2	<b>0.335</b>	<b>0.17</b>	<b>0.542</b>	18	<b>1.878</b>	0.007	0	<b>6.583</b>	<b>3.173</b>
18	1	2	<b>1.137</b>	<b>0.157</b>	<b>0.471</b>	18	<b>1.986</b>	0.007	0.001	<b>6.826</b>	<b>3.237</b>
19	2	2	<b>1.155</b>	<b>0.115</b>	<b>0.476</b>	18	<b>1.923</b>	0.007	0	<b>6.59</b>	<b>1.744</b>
20	2	2	<b>1.117</b>	<b>0.1</b>	<b>0.464</b>	18	<b>1.945</b>	0.007	0	<b>5.569</b>	<b>2.13</b>
21	2	2	<b>1.435</b>	<b>0.073</b>	<b>0.465</b>	18	<b>1.961</b>	0.007	0	<b>5.211</b>	<b>2.713</b>
22	2	2	<b>1.4</b>	<b>0.1</b>	<b>0.512</b>	18	<b>1.923</b>	0.007	0	<b>6</b>	<b>2.8</b>
23	2	2	1.2	0.1	0.512	18	1.803	0.007	0	6	2
24	1	2	0.4	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	2
25	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
26	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
27	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
28	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
29	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
30	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
31	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
32	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
<b>Rango de búsqueda</b>			[0.2 - 3]	[0 - 1]	[0.4 - 0.6]		[0.08 - 2.1]			[1 - 31]	[0.1 - 3.4]

#### 6.1.4. Multiobjetivo espacio - temporal

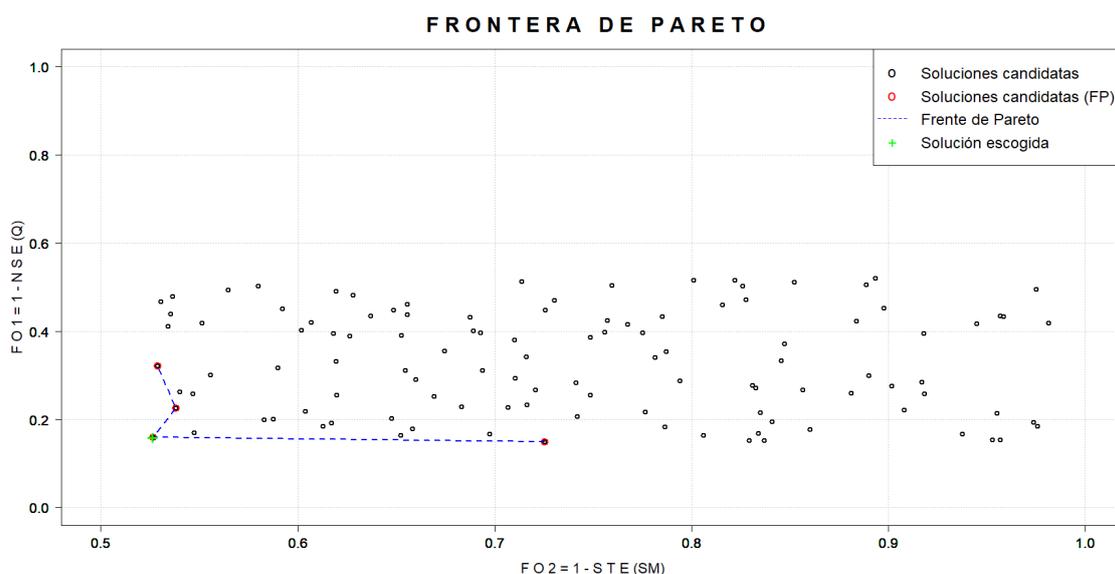
Para la siguiente configuración se ha realizado 3 escenarios de calibración multiobjetivo espacio - temporal, tal como se detalla a continuación:

- En el escenario 1, se ha empleado el caudal (Q) y la humedad del suelo (SM) como variables de estado, y las funciones objetivas a minimizar fueron:  $FO_1 = 1 - NSE(Q)$  y  $FO_2 = 1 - STE(SM)$ .
- En el escenario 2, se ha empleado el caudal (Q) y el índice de área foliar (LAI) como variables de estado, y las funciones objetivas a minimizar fueron:  $FO_1 = 1 - NSE(Q)$  y  $FO_2 = 1 - STE(LAI)$ .
- En el escenario 3, se ha empleado la humedad del suelo (SM) y el índice de área foliar (LAI) como variables de estado, y las funciones objetivas a minimizar fueron:  $FO_1 = 1 - STE(SM)$  y  $FO_2 = 1 - STE(LAI)$ .

En todas las calibraciones se ha utilizado el algoritmo de MOSCEM-UA para optimizar las funciones objetivas. Asimismo, después de 5000 iteraciones se ha obtenido los siguientes resultados:

- En el escenario 1, 112 soluciones fueron escogidas como candidatas, y dentro de ellas 4 conforman la frontera de Pareto, ver figura 67.
- En el escenario 2, 123 soluciones fueron elegidas candidatas, de las cuales 5 conforman la frontera de Pareto, ver figura 68.
- En el escenario 3, 97 soluciones fueron designadas candidatas, y 7 de ellas conforman la frontera de Pareto, ver figura 69.

Con los resultados obtenidos para los diferentes escenarios en mención, se procedió a realizar el periodo de validación, escogiendo como solución óptima para cada escenario, la que presenta mejor desempeño en este periodo.



**Figura 67. Soluciones candidatas y frontera de Pareto al final del proceso de optimización con configuración multiobjetivo espacio - temporal – Escenario 1.**

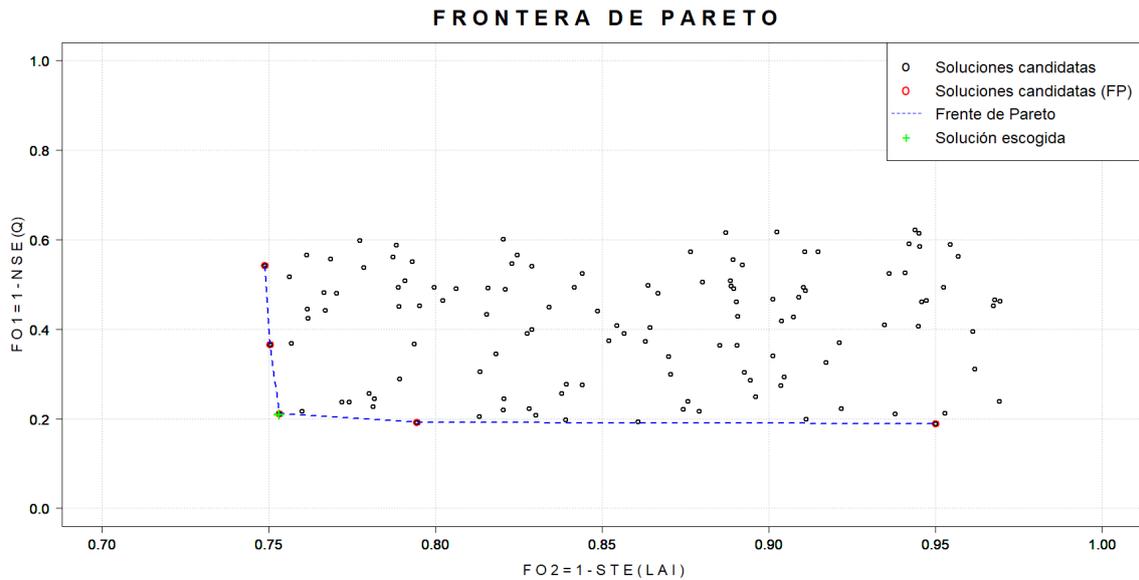


Figura 68. Soluciones candidatas y frontera de Pareto al final del proceso de optimización con configuración multiobjetivo espacio-temporal – Escenario 2.

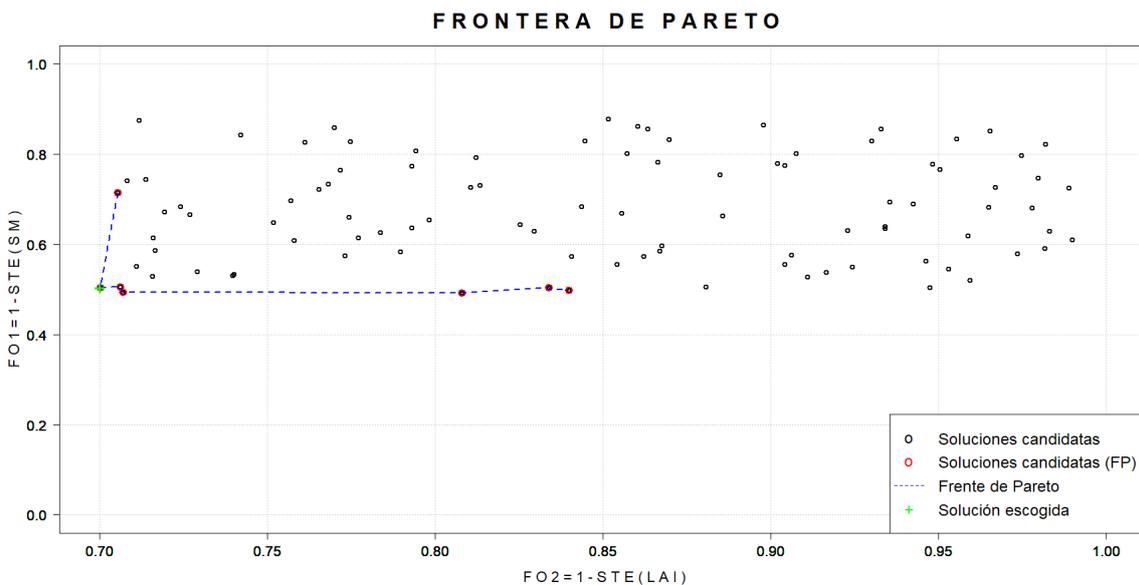


Figura 69. Soluciones candidatas y frontera de Pareto al final del proceso de optimización con configuración multiobjetivo espacio-temporal – Escenario 3.

Los índices de eficiencia obtenidos para soluciones candidatas en el periodo de calibración y validación se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Índices de eficiencia para el periodo calibración y validación multiobjetivo espacio-temporal, escenarios 1,2 y 3.

ESCENARIO	VARIABLES DE ESTADO	CALIBRACIÓN				VALIDACIÓN			
		NSE (Q)	VE(Q) (%)	STE (SM)	STE (LAI)	NSE (Q)	VE(Q) (%)	STE (SM)	STE (LAI)
1	Q - SM	<b>0.8331</b>	16.0387	<b>0.4525</b>	0.2147	<b>0.7125</b>	19.3254	<b>0.3965</b>	0.1789
2	Q - LAI	<b>0.7723</b>	38.8553	0.3129	<b>0.2187</b>	<b>0.6878</b>	25.4784	0.2147	<b>0.1325</b>
3	SM - LAI	0.7236	21.3418	<b>0.4711</b>	<b>0.2843</b>	0.6011	24.5687	<b>0.3854</b>	<b>0.2047</b>

Con el fin de visualizar mejor los resultados en cada escenario de calibración, se ha procedido a generar los hidrogramas y curvas de caudales clasificados que se muestran en las figuras 70, 71, 72, 73, 74 y 75. En los hidrogramas se puede visualizar que los caudales simulados reproducen adecuadamente a los caudales observados, tanto en su periodo de calibración como en el de validación. Las curvas de caudales clasificados nos muestran que existe una ligera sobrestimación de los caudales bajos y medios en el periodo de calibración. Además, se puede observar que el caudal pico es subestimado por el modelo tanto en su periodo de calibración como en el de validación.

La solución óptima elegida en cada escenario de calibración ha permitido determinar los parámetros efectivos del modelo ecohidrológico TETIS. Los factores correctores que multiplican a los mapas de parámetros en el submodelo hidrológico se muestran en la tabla 22; y en el caso del submodelo de vegetación los parámetros efectivos se muestran en las tablas 23, 24 y 25, donde los parámetros sombreados de color verde son los obtenidos en el proceso de calibración multiobjetivo espacio - temporal.

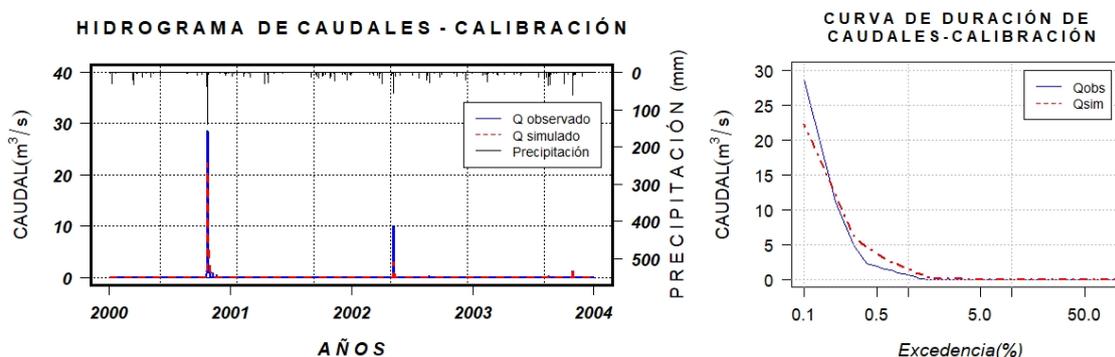
**Tabla 22. Factores correctores iniciales y finales del submodelo hidrológico para una calibración multiobjetivo espacio - temporal.**

Factores Correctores	Unid.	Valor Inicial	Rango de búsqueda	E1	E2	E3
				Valor Final	Valor Final	Valor Final
FC1 - Almacenamiento estático del suelo	[-]	2.9	[0.5-3.5]	2.9872	2.7903	2.8230
FC2 - Evapotranspiración	[-]	0.9	[0.9-2.0]	1.5938	1.6116	1.9814
FC3 - Infiltración	[-]	1.4	[0.1-2.0]	1.9831	1.0955	1.4982
FC4 - Escorrentía directo	[-]	0.5	[0.005-10.0]	0.8848	0.2352	0.006
FC5 - Percolación	[-]	5	[5-10]	6.2134	6.2513	5.8463
FC6 - Interflujo	[-]	100	[10-500]	200.00	200.0	200.0
FC7 - Flujo subterráneo profundo	[-]	1000	[0.5-10000]	10000	10000	10000
FC8 - Flujo base	[-]	0.1	[0-1]	0.0	0.0	0.0
FC9 - Velocidad en red fluvial	[-]	0.5	[0.05-1]	0.0650	0.0508	0.1033

E1: Calibración multiobjetivo espacio - temporal [ $FO_1=1-NSE(Q)$ ;  $FO_2=1-STE(SM)$ ]

E2: Calibración multiobjetivo espacio - temporal [ $FO_1=1-NSE(Q)$ ;  $FO_2=1-STE(LAI)$ ]

E3: Calibración multiobjetivo espacio - temporal [ $FO_1=1-STE(SM)$ ;  $FO_2=1-STE(LAI)$ ]



**Figura 70. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración multiobjetivo espacio - temporal, escenario 1.**

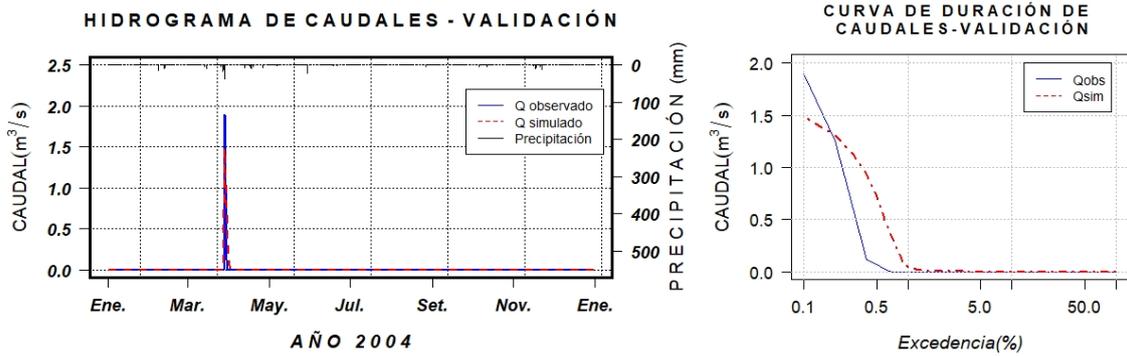


Figura 71. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración multiobjetivo espacio – temporal, Escenario 1.

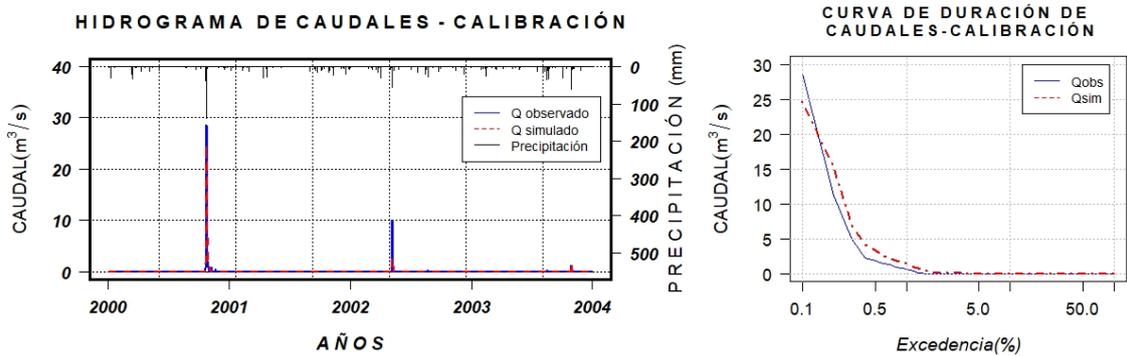


Figura 72. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración multiobjetivo espacio – temporal, escenario 2.

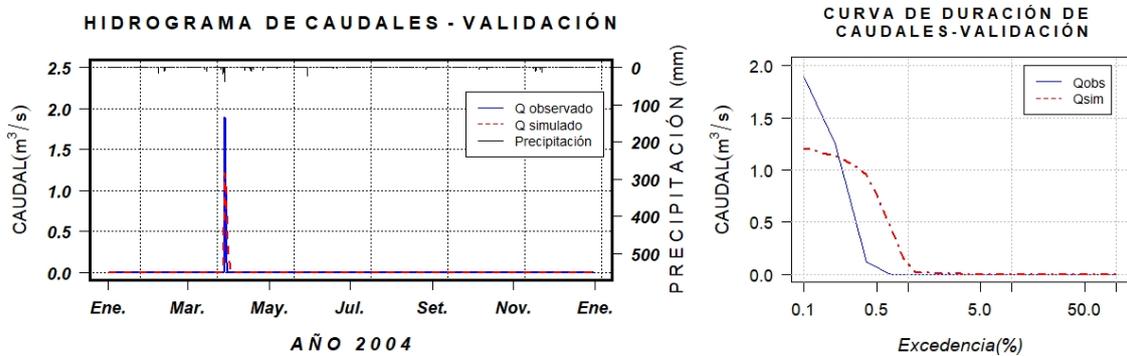


Figura 73. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración multiobjetivo espacio – temporal, Escenario 2.

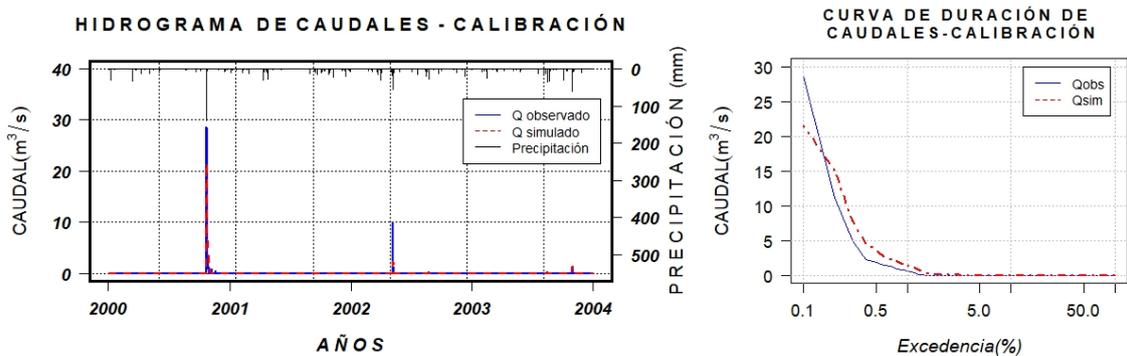
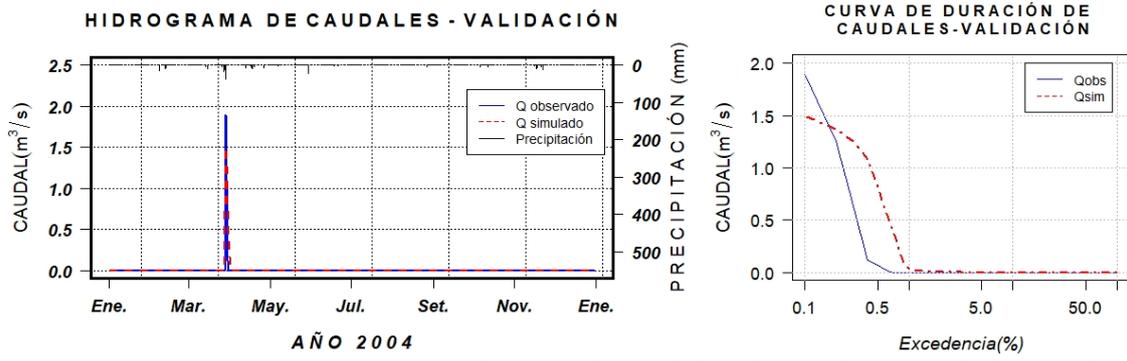


Figura 74. Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de calibración para una configuración multiobjetivo espacio – temporal, escenario 3.



**Figura 75.** Hidrograma y curva de duración de caudales observados y simulados en el periodo de validación para una configuración multiobjetivo espacio – temporal. Escenario 3.

**Tabla 23. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS para una calibración multiobjetivo espacio - temporal – Escenario 1.**

Código de uso de suelo	ExpFDisp	ExpFestres	Alm max	% raíces	Kdecay	T° opt	LUE	rResp	Kmuerte	SLA	LAlmax
1	2	1	1.431	0.28	0.578	18	1.644	0.007	0	5.308	2.615
2	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
3	1	1	0	1	0.512	18	1.39	0.007	0.001	1	0.2
4	3	1	1.259	0.749	0.531	18	0.098	0.007	0	23	0.144
5	1	1	0.88	0.89	0.457	18	1.888	0.007	0	20.13	0.675
6	1	1	1.918	0.169	0.418	18	0.692	0.007	0	30.186	1.898
7	1	2	0.637	0.146	0.568	18	1.119	0.007	0.001	6.578	2.788
8	2	2	1.994	0.29	0.429	18	0.849	0.007	0.001	29.234	1.85
9	1	1	0.788	0.077	0.5	18	1.09	0.007	0	5.408	1.927
10	1	2	0.682	0.053	0.516	18	1.153	0.007	0.001	6.479	2.138
11	2	2	1	0.142	0.596	18	1.833	0.007	0	5.266	2.59
12	2	2	1.097	0.089	0.52	18	2.052	0.007	0	5.49	2.635
13	2	2	1.203	0.021	0.475	18	2.025	0.007	0	5.01	1.992
14	2	2	1.182	0.58	0.501	18	1.858	0.007	0	6.688	3.187
15	2	2	0.7	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	3
16	1	1	1.324	1	0.512	18	0	0.007	0.001	1	0.502
17	2	2	0.364	0.074	0.464	18	1.933	0.007	0	5.715	2.801
18	1	2	1.224	0.146	0.464	18	1.978	0.007	0.001	5.214	2.613
19	2	2	1.194	0.16	0.522	18	1.95	0.007	0	6.299	1.594
20	2	2	1.186	0.1	0.548	18	1.994	0.007	0	6.1	2.177
21	2	2	1.469	0.145	0.475	18	2	0.007	0	6.765	2.841
22	2	2	1.4	0.1	0.512	18	1.923	0.007	0	6	2.8
23	2	2	1.2	0.1	0.512	18	1.803	0.007	0	6	2
24	1	2	0.4	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	2
25	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
26	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
27	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
28	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
29	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
30	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
31	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
32	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
<b>Rango de búsqueda</b>			[0.2 - 3]	[0 - 1]	[0.4 - 0.6]		[0.08 - 2.1]			[1 - 31]	[0.1 - 3.4]

**Tabla 24. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS para una calibración multiobjetivo espacio - temporal – Escenario 2.**

Código de uso de suelo	ExpFDisp	ExpFestres	Alm max	% raíces	Kdecay	T° opt	LUE	rResp	Kmuerte	SLA	LAI max
1	2	1	<b>1.263</b>	<b>0.313</b>	<b>0.502</b>	18	<b>1.63</b>	0.007	0	<b>5.279</b>	<b>2.654</b>
2	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
3	1	1	0	1	0.512	18	1.39	0.007	0.001	1	0.2
4	3	1	<b>1.109</b>	<b>0.866</b>	<b>0.415</b>	18	<b>0.096</b>	0.007	0	<b>23</b>	<b>0.156</b>
5	1	1	<b>0.944</b>	<b>0.615</b>	<b>0.537</b>	18	<b>1.805</b>	0.007	0	<b>21.545</b>	<b>0.896</b>
6	1	1	<b>2.068</b>	<b>0.13</b>	<b>0.406</b>	18	<b>0.619</b>	0.007	0	<b>30.112</b>	<b>1.773</b>
7	1	2	<b>0.705</b>	<b>0.182</b>	<b>0.406</b>	18	<b>1.121</b>	0.007	0.001	<b>6.538</b>	<b>2.722</b>
8	2	2	2.068	0.176	0.455	18	0.848	0.007	0.001	29.439	1.768
9	1	1	<b>0.739</b>	<b>0.122</b>	<b>0.5</b>	18	<b>1.012</b>	0.007	0	<b>6.782</b>	<b>2.327</b>
10	1	2	<b>0.796</b>	<b>0.023</b>	<b>0.523</b>	18	<b>1.146</b>	0.007	0.001	<b>6.705</b>	<b>1.896</b>
11	2	2	<b>0.901</b>	<b>0.19</b>	<b>0.557</b>	18	<b>1.848</b>	0.007	0	<b>5.111</b>	<b>2.647</b>
12	2	2	<b>1.066</b>	<b>0.005</b>	<b>0.47</b>	18	<b>1.938</b>	0.007	0	<b>6.458</b>	<b>2.598</b>
13	2	2	<b>1.102</b>	<b>0.054</b>	<b>0.516</b>	18	<b>1.917</b>	0.007	0	<b>5.306</b>	<b>2.056</b>
14	2	2	<b>1.224</b>	<b>0.572</b>	<b>0.545</b>	18	<b>1.925</b>	0.007	0	<b>5.097</b>	<b>2.821</b>
15	2	2	0.7	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	3
16	1	1	1.324	1	0.512	18	0	0.007	0.001	1	0.502
17	2	2	<b>0.313</b>	<b>0.112</b>	<b>0.481</b>	18	<b>1.866</b>	0.007	0	<b>6.14</b>	<b>2.983</b>
18	1	2	<b>1.174</b>	<b>0.146</b>	<b>0.405</b>	18	<b>1.94</b>	0.007	0.001	<b>5.371</b>	<b>3.378</b>
19	2	2	<b>1.143</b>	<b>0.078</b>	<b>0.471</b>	18	<b>1.912</b>	0.007	0	<b>6.543</b>	<b>2.389</b>
20	2	2	<b>1.126</b>	<b>0.1</b>	<b>0.488</b>	18	<b>1.986</b>	0.007	0	<b>5.605</b>	<b>2.164</b>
21	2	2	<b>1.482</b>	<b>0.078</b>	<b>0.51</b>	18	<b>1.919</b>	0.007	0	<b>5.759</b>	<b>2.872</b>
22	2	2	<b>1.4</b>	<b>0.1</b>	<b>0.512</b>	18	<b>1.923</b>	0.007	0	<b>6</b>	<b>2.8</b>
23	2	2	1.2	0.1	0.512	18	1.803	0.007	0	6	2
24	1	2	0.4	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	2
25	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
26	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
27	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
28	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
29	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
30	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
31	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
32	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
<b>Rango de búsqueda</b>			[0.2 - 3]	[0 - 1]	[0.4 – 0.6]		[0.08 - 2.1]			[1 - 31]	[0.1 – 3.4]

**Tabla 25. Parámetros del submodelo de vegetación de TETIS para una calibración multiobjetivo espacio - temporal – Escenario 3.**

Código de uso de suelo	ExpFDisp	ExpFestres	Alm max	% raíces	Kdecay	T° opt	LUE	rResp	Kmuerte	SLA	LAlmax
1	2	1	<b>1.058</b>	<b>0.312</b>	<b>0.509</b>	18	<b>1.516</b>	0.007	0	<b>5.129</b>	<b>2.481</b>
2	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
3	1	1	0	1	0.512	18	1.39	0.007	0.001	1	0.2
4	3	1	<b>1.12</b>	<b>0.842</b>	<b>0.438</b>	18	<b>0.14</b>	0.007	0	<b>23</b>	<b>0.182</b>
5	1	1	<b>0.275</b>	<b>1</b>	<b>0.518</b>	18	<b>1.766</b>	0.007	0	<b>27.673</b>	<b>0.781</b>
6	1	1	<b>2.034</b>	<b>0.18</b>	<b>0.559</b>	18	<b>0.743</b>	0.007	0	<b>30.852</b>	<b>1.711</b>
7	1	2	<b>0.795</b>	<b>0.183</b>	<b>0.568</b>	18	<b>1.028</b>	0.007	0.001	<b>6.125</b>	<b>2.568</b>
8	2	2	1.908	0.218	0.532	18	0.667	0.007	0.001	30.041	1.928
9	1	1	<b>0.869</b>	<b>0.027</b>	<b>0.5</b>	18	<b>1.076</b>	0.007	0	<b>5.805</b>	<b>2.193</b>
10	1	2	<b>0.791</b>	<b>0.199</b>	<b>0.542</b>	18	<b>1.17</b>	0.007	0.001	<b>5.719</b>	<b>2.049</b>
11	2	2	<b>0.934</b>	<b>0.043</b>	<b>0.406</b>	18	<b>1.923</b>	0.007	0	<b>6.168</b>	<b>2.533</b>
12	2	2	<b>1.051</b>	<b>0.145</b>	<b>0.42</b>	18	<b>1.922</b>	0.007	0	<b>6.755</b>	<b>2.557</b>
13	2	2	<b>1.282</b>	<b>0.14</b>	<b>0.482</b>	18	<b>1.864</b>	0.007	0	<b>5.172</b>	<b>2.053</b>
14	2	2	<b>1.177</b>	<b>0.583</b>	<b>0.488</b>	18	<b>1.977</b>	0.007	0	<b>5.295</b>	<b>2.979</b>
15	2	2	0.7	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	3
16	1	1	1.324	1	0.512	18	0	0.007	0.001	1	0.502
17	2	2	<b>0.414</b>	<b>0.097</b>	<b>0.46</b>	18	<b>1.92</b>	0.007	0	<b>5.226</b>	<b>2.957</b>
18	1	2	<b>1.206</b>	<b>0.155</b>	<b>0.402</b>	18	<b>1.95</b>	0.007	0.001	<b>5.03</b>	<b>3.282</b>
19	2	2	<b>1.136</b>	<b>0.171</b>	<b>0.484</b>	18	<b>1.974</b>	0.007	0	<b>5.59</b>	<b>2.137</b>
20	2	2	<b>1.175</b>	<b>0.1</b>	<b>0.525</b>	18	<b>1.909</b>	0.007	0	<b>5.745</b>	<b>1.872</b>
21	2	2	<b>1.454</b>	<b>0.053</b>	<b>0.528</b>	18	<b>1.911</b>	0.007	0	<b>6.199</b>	<b>2.829</b>
22	2	2	<b>1.4</b>	<b>0.1</b>	<b>0.512</b>	18	<b>1.923</b>	0.007	0	<b>6</b>	<b>2.8</b>
23	2	2	1.2	0.1	0.512	18	1.803	0.007	0	6	2
24	1	2	0.4	0.1	0.512	18	1.18	0.007	0.001	6	2
25	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
26	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
27	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
28	1	1	1.675	1	0.512	18	0	0.007	0	1	0.285
29	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
30	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
31	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
32	1	1	0	1	0.512	18	1.995	0.007	0.007	22.993	0.2
<b>Rango de búsqueda</b>			[0.2 - 3]	[0 - 1]	[0.4 - 0.6]		[0.08 - 2.1]			[1 - 31]	[0.1 - 3.4]

## 6.2. IMPLEMENTACION DEL MODELO ECOHIDROLÓGICO TETIS

Después de ejecutar las diversas calibraciones descritas en el apartado 6.1, se decidió realizar un análisis de los resultados, en donde se llegó a la conclusión que la calibración multiobjetivo espacio - temporal del escenario 1 ( funciones objetivo a minimizar  $FO_1 = 1 - NSE(Q)$  y  $FO_2 = 1 - STE(SM)$ ) es la que representa adecuadamente el comportamiento de los caudales y dinámica de la vegetación en la cuenca, ver tabla 26 Y 27. Por ende, para esta calibración; los parámetros efectivos de la vegetación y factores correctores correspondiente a los mapas de parámetros del submodelo hidrológico serán utilizados para la implementación del modelo ecohidrológico TETIS, el cual emplearemos para el análisis de escenarios de gestión forestal.

**Tabla 26. Consolidado de los diferentes índices de eficiencia en la etapa de calibración del modelo ecohidrológico TETIS**

CONFIGURACIÓN	FUNCIONES OBJETIVO	VARIABLES DE ESTADO	ESTADÍSTICOS			
			NSE (Q)	VE(Q) (%)	STE (SM)	STE (LAI)
Monobjetivo temporal	NSE (Q)	Q	<b>0.9417</b>	15.5667	----	----
Multiobjetivo temporal	NSE (Q) - BE (Q)	Q	<b>0.9102</b>	<b>3.0523</b>	----	----
Multiobjetivo espacio - temporal	NSE (Q) - STE (SM)	Q - SM	<b>0.8331</b>	16.0387	<b>0.4525</b>	0.2147
Multiobjetivo espacio - temporal	NSE (Q) - STE (LAI)	Q - LAI	<b>0.7723</b>	38.8553	0.3129	<b>0.2187</b>
Multiobjetivo espacio - temporal	STE (SM) - STE (LAI)	SM - LAI	0.7236	21.3418	<b>0.4711</b>	<b>0.2843</b>
Monobjetivo espacio - temporal	STE (SM)	SM	0.6484	58.0832	<b>0.6123</b>	0.3451
Monobjetivo espacio - temporal	STE (LAI)	LAI	0.3673	54.5755	0.2912	<b>0.4824</b>

**Tabla 27. Consolidado de los diferentes índices de eficiencia en la etapa de validación del modelo ecohidrológico TETIS**

CONFIGURACIÓN	FUNCIONES OBJETIVO	VARIABLES DE ESTADO	ESTADÍSTICOS			
			NSE (Q)	VE(Q) (%)	STE (SM)	STE (LAI)
Monobjetivo temporal	NSE (Q)	Q	<b>0.6215</b>	25.4458	----	----
Multiobjetivo temporal	NSE (Q) - BE (Q)	Q	<b>0.7584</b>	<b>12.3254</b>	----	----
Multiobjetivo espacio - temporal	NSE (Q) - STE (SM)	Q - SM	<b>0.7125</b>	19.3254	<b>0.3965</b>	0.1789
Multiobjetivo espacio - temporal	NSE (Q) - STE (LAI)	Q - LAI	<b>0.6878</b>	25.4784	0.2147	<b>0.1325</b>
Multiobjetivo espacio - temporal	STE (SM) - STE (LAI)	SM - LAI	0.6011	24.5687	<b>0.3854</b>	<b>0.2047</b>
Monobjetivo espacio - temporal	STE (SM)	SM	0.5221	39.8745	<b>0.5524</b>	0.2874
Monobjetivo espacio - temporal	STE (LAI)	LAI	0.1235	41.2365	0.1478	<b>0.3128</b>

---

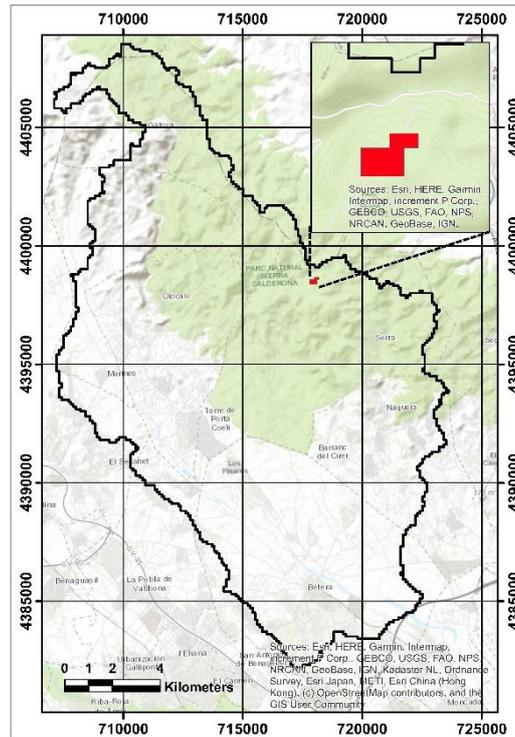
## **CAPITULO 7. ESCENARIOS DE GESTIÓN FORESTAL**

---

### 7.1. DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS DE GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL CARRAIXET

La gestión forestal se planteó con actuaciones de tala hipotética sobre una parcela experimental y 3 coberturas de suelo estratégicamente seleccionadas.

La parcela experimental tiene una superficie de 0.8 Km<sup>2</sup> y se ubica en una zona puramente forestal de la Sierra de la Calderona, en el municipio de Serra al noreste de la cuenca, ver figura 76.



**Figura 76. Ubicación de la parcela experimental (ZONA 1) seleccionada como primera zona para el análisis de impactos de los escenarios propuestos.**

Las otras superficies de análisis se muestran en la figura 77 y estas ocupan gran parte del área forestal en la cuenca, quedando definidas para este análisis las siguientes coberturas:

- Zona 2, Rodales de exclusión de pies de pino carrasco.
- Zona 3, Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.
- Zona 4, Rodales de pinos carrasco muy jóvenes.

Para los escenarios de gestión forestal (escenarios de tala), se estableció un escenario de control en donde fracción de cubierta en cada zona de análisis fue igual 0.85 (85% de densidad de cubierta); y con relación a este punto de partida se generó los escenarios de gestión forestal asumiendo talas de 20%, 30%, 40% y 50% al inicio del periodo analizado. Por ejemplo, un escenario de tala al 40% significa que el factor de cobertura en las diferentes zonas de análisis es igual a 0.51, de este modo se generaron 4 escenarios de gestión forestal, tal como se detalla en la tabla 28.

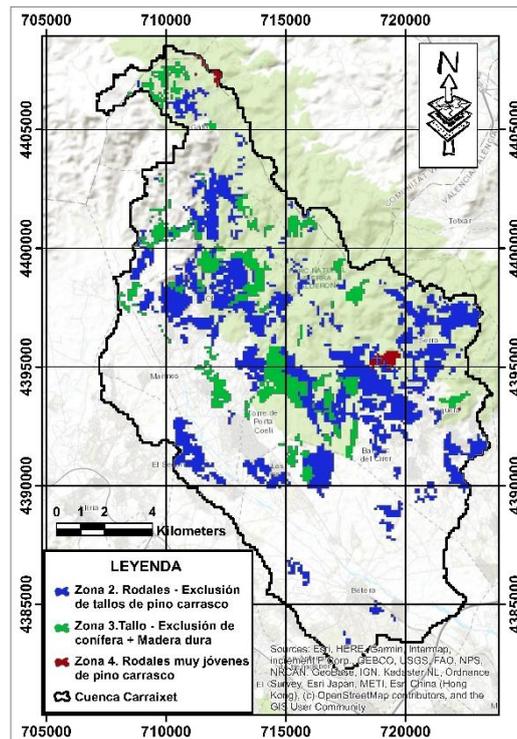


Figura 77. Zonas definidas por uso de suelo específico para el análisis de impactos de gestión forestal

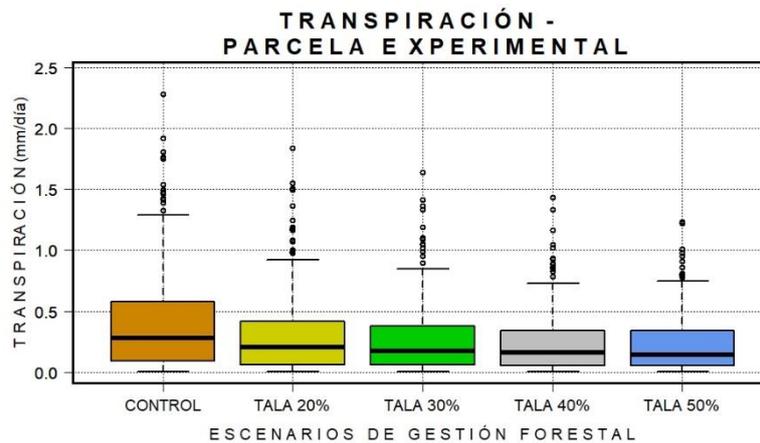
Tabla 28. Escenarios de gestión forestal en la cuenca del Carraxet

NOMBRE DEL ESCENARIO	ZONA	TALA (%)	FACTOR DE COBERTURA (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
Control 0 - 1	Zona 1. Parcela experimental	0	0.85
Corte 20 - 1		20	0.68
Corte 30 - 1		30	0.60
Corte 40 - 1		40	0.51
Corte 50 - 1		50	0.43
Control 0 - 2	Zona 2. Rodales de exclusión de pies de pino carrasco.	0	0.85
Corte 20 - 2		20	0.68
Corte 30 - 2		30	0.60
Corte 40 - 2		40	0.51
Corte 50 - 2		50	0.43
Control 0 - 3	Zona 3. Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.	0	0.85
Corte 20 - 3		20	0.68
Corte 30 - 3		30	0.60
Corte 40 - 3		40	0.51
Corte 50 - 3		50	0.43
Control 0 - 4	Zona 4. Rodales de pinos carrasco muy jóvenes.	0	0.85
Corte 20 - 4		20	0.68
Corte 30 - 4		30	0.60
Corte 40 - 4		40	0.51
Corte 50 - 4		50	0.43

## 7.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL CARRAIXET

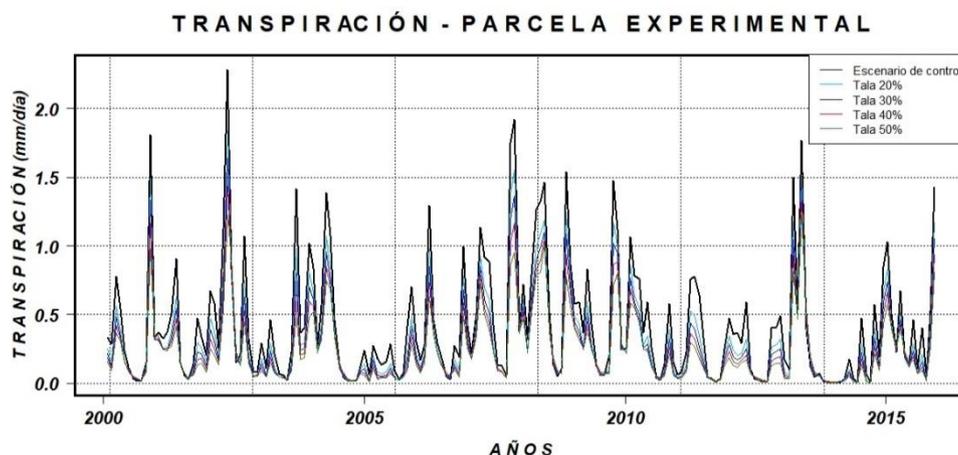
Los impactos de la gestión forestal se evaluaron teniendo en cuenta el comportamiento de los diferentes flujos hidrológicos en las celdas afectadas por la gestión forestal.

La figura 78, nos muestra el comportamiento de la transpiración en la parcela experimental (Zona 1), en esta podemos observar que el valor medio de la transpiración va disminuyendo ligeramente a medida que aumentamos la tala. Sin embargo, si observamos la dispersión podemos ver que la transpiración disminuye a medida que el escenario de tala es más agresivo.



**Figura 78. Boxplots de transpiración (mm/día) para los diferentes escenarios de gestión forestal - Parcela de experimental**

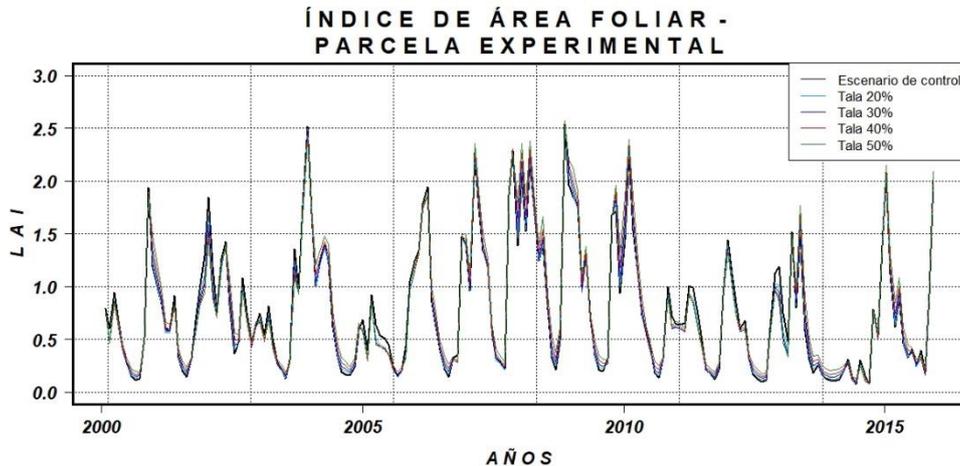
El periodo analizado fue de 15 años y como se ha mencionado anteriormente el valor medio de la transpiración fue ligeramente afectado por los escenarios de gestión forestal. Esto se debe a que la vegetación tiene la capacidad de recuperarse, tal como se observa en la figura 79. En el modelo ecohidrológico TETIS la recuperación de la vegetación se genera en forma de biomasa foliar en la fracción de cubierta. Por tal motivo, podemos observar que las mayores diferencias en la transpiración se producen en los primeros 10 a 12 años del periodo de analizado en comparación a su etapa final.



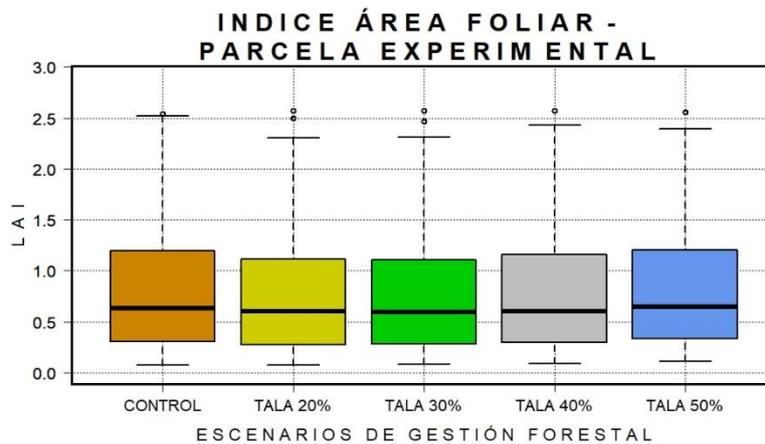
**Figura 79. Series de transpiración (mm/día) en los diferentes escenarios de gestión forestal - Parcela de tratamiento.**

Los anteriormente mencionado es reforzado al analizar la figura 80, que nos muestra la evolución temporal del índice de área foliar (LAI). Es necesario mencionar que en el modelo ecohidrológico TETIS simula el LAI como función de la biomasa foliar y el factor de cobertura.

En las figuras 80 y 81 podemos observar que la variación del LAI es muy pequeña en los diferentes escenarios de gestión forestal, esto se debe a que el crecimiento de la biomasa foliar es mayor cuanto mayor es la tala y por tanto las disminuciones en el factor de cobertura se ven rápidamente compensadas.

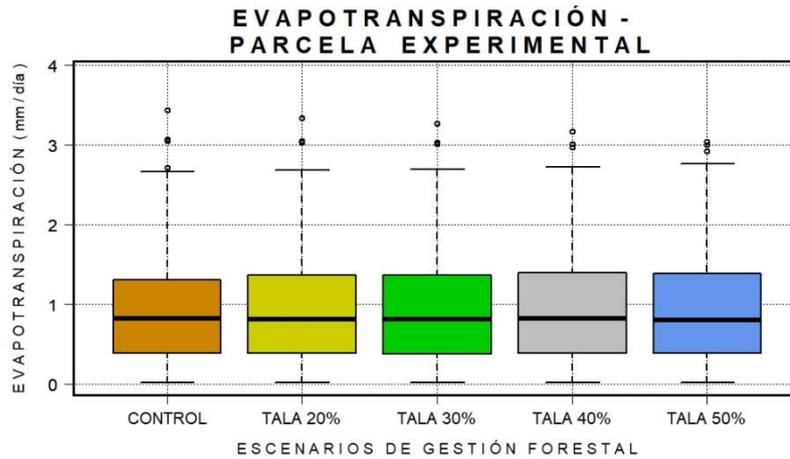


**Figura 80. Series de LAI ( $m^2/m^2$ ) en los diferentes escenarios de gestión forestal – Parcela de experimental.**

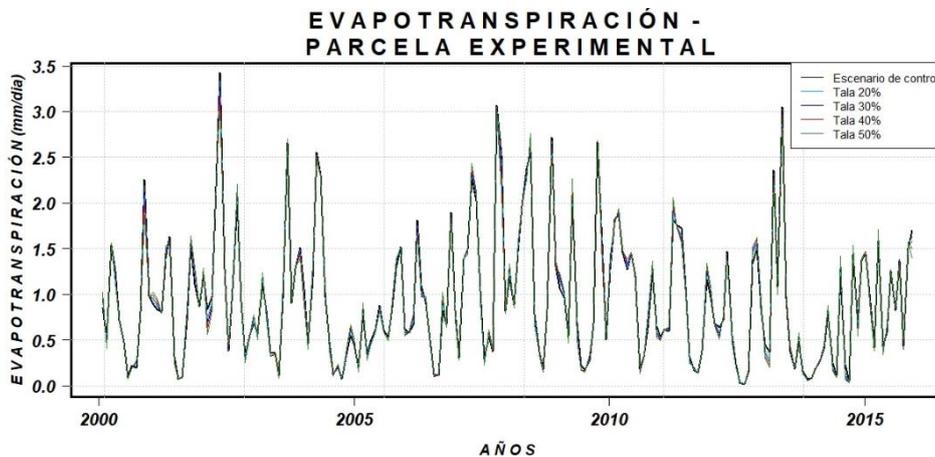


**Figura 81. Boxplots de LAI ( $m^2/m^2$ ) en los escenarios de gestión forestal – Parcela de experimental.**

En las figuras 82 y 83, podemos notar que no existe una variación significativa de la evapotranspiración a media que realizamos una gestión forestal más pronunciada. Esto es debido que las pérdidas por evaporación directa desde la matriz del suelo se llegan a incrementar a medida que aumenta la fracción no cubierta de suelo compensado de esta manera la reducción de las pérdidas por transpiración en la vegetación. En el modelo ecohidrológico TETIS las pérdidas por evapotranspiración se calculan sumando la evaporación del suelo desnudo más la transpiración de la planta.



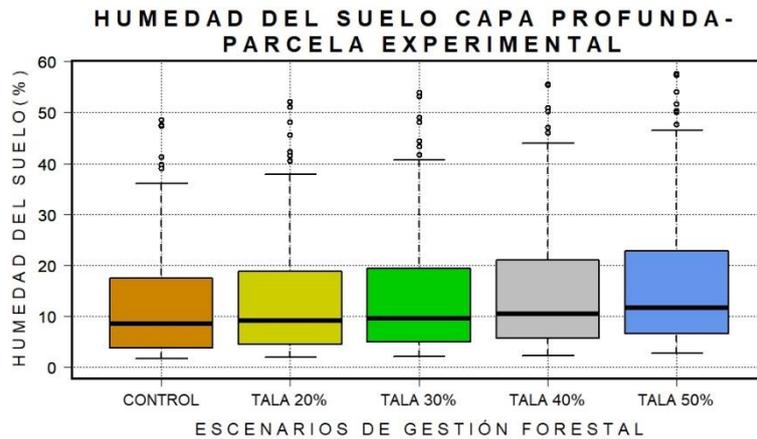
**Figura 82. Boxplots de evapotranspiración (mm/día) en los escenarios de gestión forestal – Parcela de experimental.**



**Figura 83. Series de evapotranspiración (mm/día) en los diferentes escenarios de gestión forestal – Parcela de experimental.**

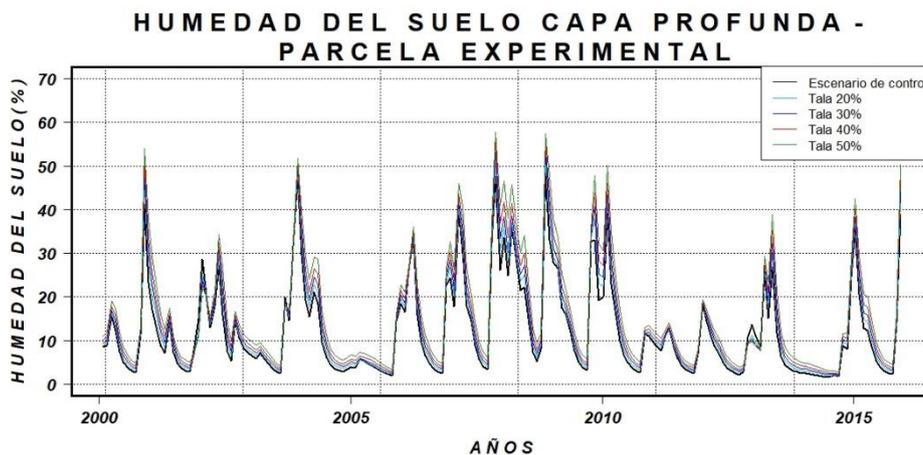
Recordemos que en el modelo ecohidrológico TETIS la zona efectiva de raíces se encuentra dividida entre la capa superficial y la capa profunda. Los procesos de transpiración por parte de las raíces más superficiales y la evaporación del suelo desnudo se producen en la capa superficial. No obstante, en la capa profunda solo se produce la transpiración de las raíces por parte de la vegetación. Por tanto, el estado de la vegetación afecta a los flujos del ciclo hidrológico y, por ende, al almacenamiento en los diferentes tanques.

Teniendo presente lo anteriormente mencionado, la humedad del suelo en la capa profunda se va incrementando a medida que el escenario de gestión forestal es más pronunciado, ver figura 84. La reducción de la vegetación ocasiona una disminución de la transpiración y por ende el balance en el tanque de la capa inferior se ve favorecido, quedando únicamente limitado por las características físicas del suelo en términos de pérdidas en la fracción no cubierta y los aportes de humedad.



**Figura 84. Boxplots de humedad del suelo de la capa profunda (%) en los diferentes escenarios de gestión forestal – Parcela de experimental.**

En la figura 85, se muestra como el incremento de la humedad del suelo en la capa profunda es más pronunciado en los periodos húmedos de la serie temporal, llegando a encontrarse diferencias puntuales de hasta 15% del contenido humedad, diferencias que llegan a disminuir considerablemente en los periodos más secos.



**Figura 85. Series de humedad en la capa profunda del suelo (%) en los diferentes escenarios de gestión forestal – Parcela de experimental.**

El incremento de la evaporación en el suelo desnudo es mayor a medida que aumentamos el escenario de gestión forestal (tala). Por tanto, un aumento de la tala genera una reducción de la humedad del suelo en la capa superficial (0.0 – 0.05 m de profundidad), tal como se observa en las figuras 86 y 87. Por otra parte, la vegetación principal que encontramos en la parcela experimental corresponde a pino carrasco. Si bien este tipo de vegetación tiene una cierta capacidad para transpirar desde la capa superficial, la mayor parte de la transpiración se produce desde la capa profunda. Por tal motivo, no fue extraño encontrar variaciones negativas en el contenido de humedad, más aún cuanto mayor era la fracción no cubierta de suelo, lo cual generaba una evaporación directa más intensa.

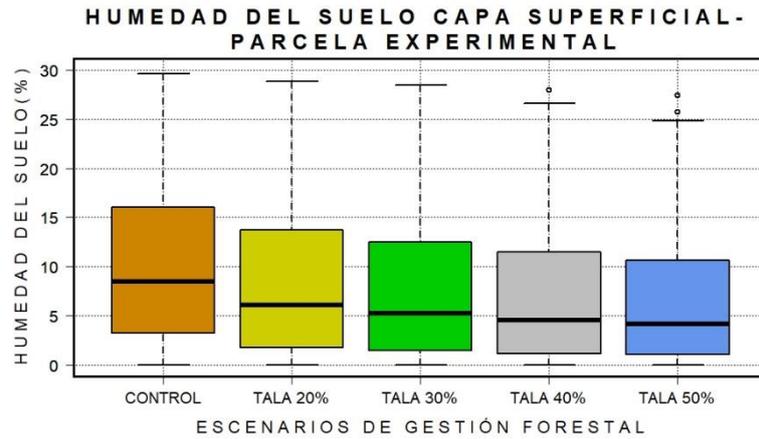


Figura 86. Boxplots de humedad del suelo de la capa superficial (/%) en los escenarios de gestión sobre la parcela de tratamiento.

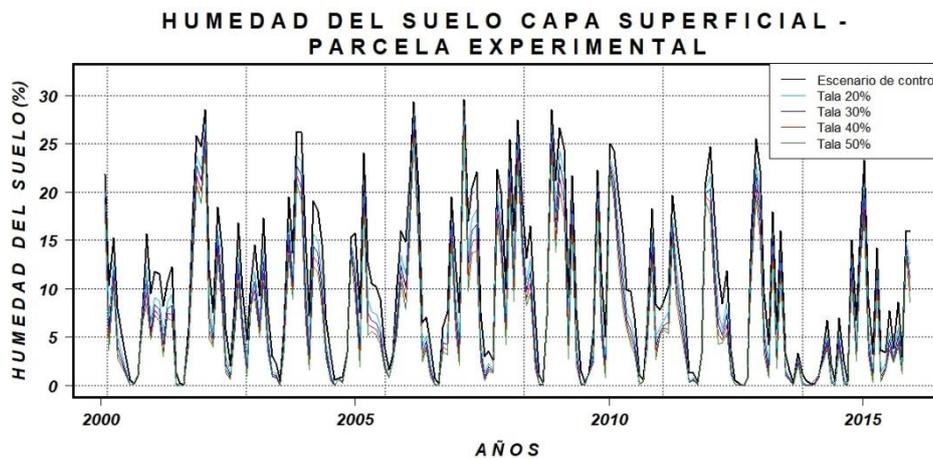


Figura 87. Series de humedad en la capa superficial del suelo (%) en los diferentes escenarios de gestión forestal – Parcela de experimental.

En cuencas con climas semiáridos es común que la percolación solo se genere con tormentas importantes; y debido a que la cuenca del Carraixet posee esta condición climática, la probabilidad de existir percolación en su área es muy reducida. Por tanto, ante diferentes escenarios de gestión forestal no se observa diferencias significativas en el valor de la percolación. Asimismo, los picos de percolación que se ven en la figura 88 se encuentran muy dispersos en nuestro periodo de análisis, estando asociados estos valores atípicos a tormentas importantes.

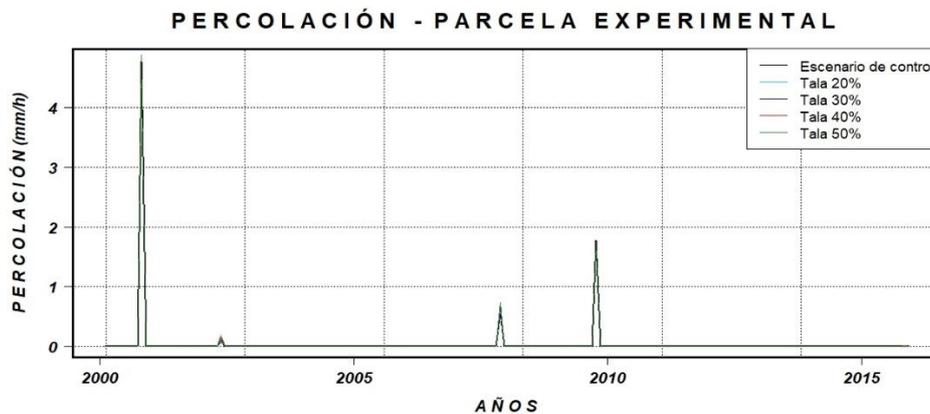
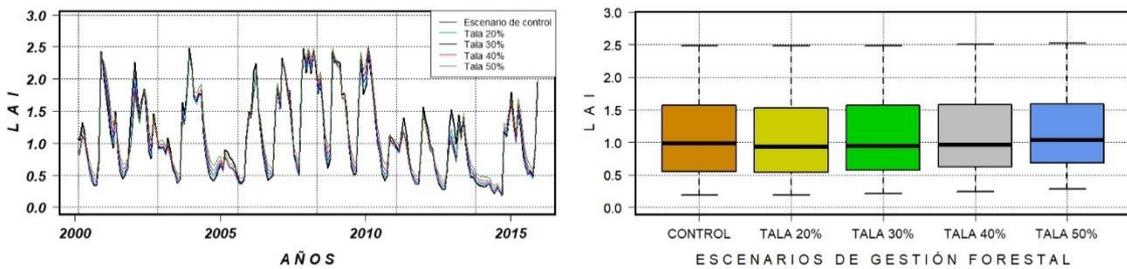


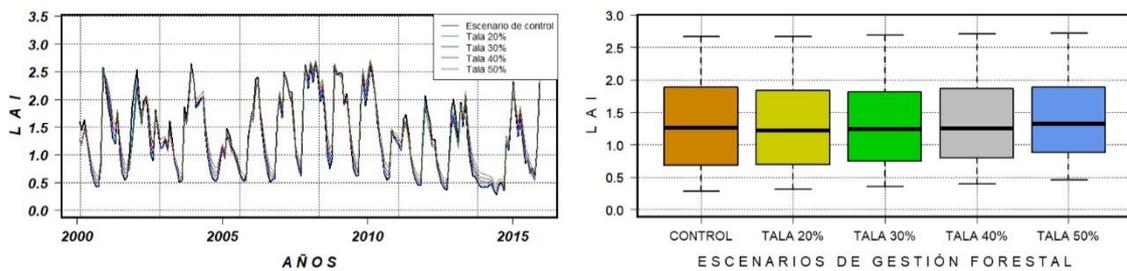
Figura 88. Series de percolación (mm/h) en los diferentes escenarios de gestión forestal – Parcela de experimental.

Los resultados obtenidos de las áreas de actuación definidas como zona 2 (Rodales de exclusión de pies de pino carrasco), zona 3 (Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas) y zona 4 (Rodales de pinos carrasco muy jóvenes) presentaron un comportamiento análogo a los obtenidos en la Zona 1 (Parcela experimental). En el caso del LAI se identificó un comportamiento diferente debido a la peculiaridad de los procesos hidrológicos que se dan en cada cobertura de suelo, los mismo que están ligados a los parámetros efectivos del modelo que tratan de representar los procesos físicos que ocurren en la naturaleza.

El LAI en la zona 2 y la zona 4 reflejan el mismo comportamiento de la parcela experimental, siendo mayor el incremento de LAI cuanto más agresivo es el tratamiento de tala y cuanto menores son los valores de LAI en el escenario control a lo largo de la serie temporal, ver figuras 89 y 90.

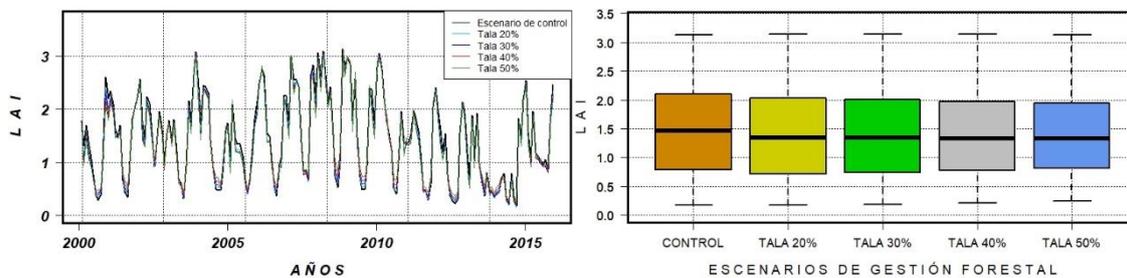


**Figura 89. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de LAI ( $m^2/m^2$ ) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de pino carrasco.**



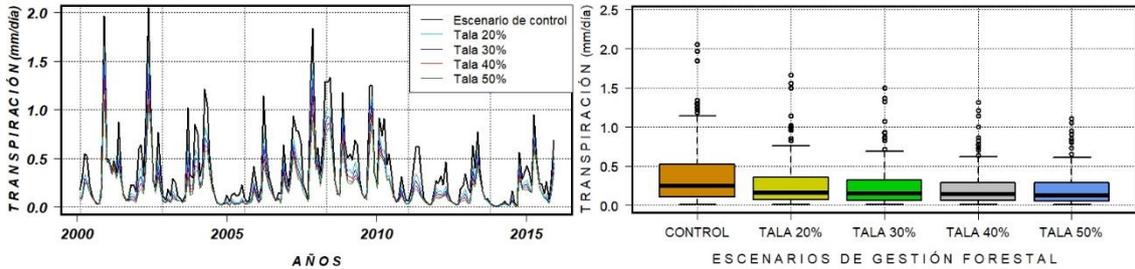
**Figura 90. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de LAI ( $m^2/m^2$ ) en los escenarios de gestión forestal para rodales de pinos carrasco muy jóvenes.**

En la zona 3, la tala provocada por los diferentes escenarios de gestión forestal generó un descenso del LAI, que se mantuvo en todo el periodo de análisis. La figura 91, nos muestra que la reducción del LAI no es tan significativa en los diferentes escenarios de gestión forestal, encontrándose diferencias escasas entre ellos.

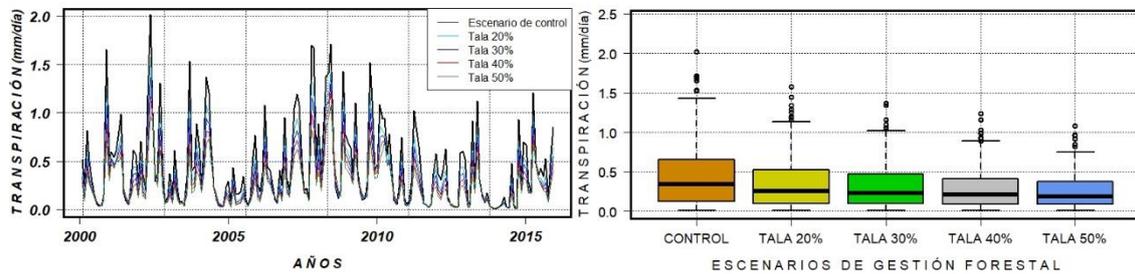


**Figura 91. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de LAI ( $m^2/m^2$ ) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.**

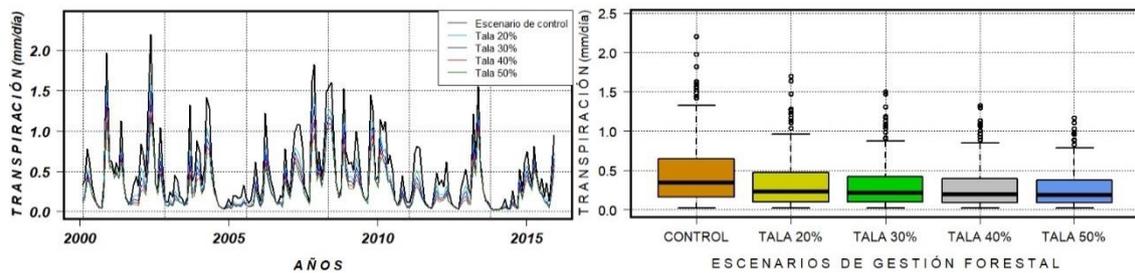
En relación con lo anterior, la transpiración en las tres zonas de análisis presentó descensos significativos a medida que aumentábamos la tala, ver figuras 92, 93 y 94. Por otro lado, este proceso se compensa en términos de evapotranspiración debido al incremento de la evaporación en el suelo desnudo, ver figuras 95, 96 y 97.



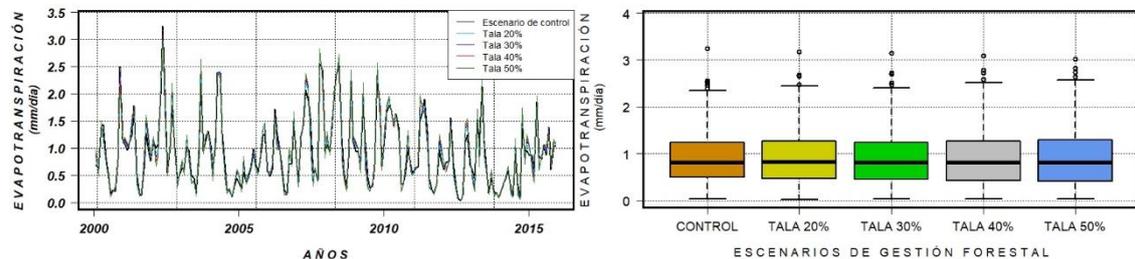
**Figura 92. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de transpiración (mm/día) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de pino carrasco.**



**Figura 93. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de transpiración (mm/día) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.**



**Figura 94. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de transpiración (mm/día) en los escenarios de gestión forestal para rodales de pinos carrasco muy jóvenes.**



**Figura 95. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de evapotranspiración (mm/día) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de pino carrasco.**

IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ECO-HIDROLÓGICO PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL CARRAIXET (VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

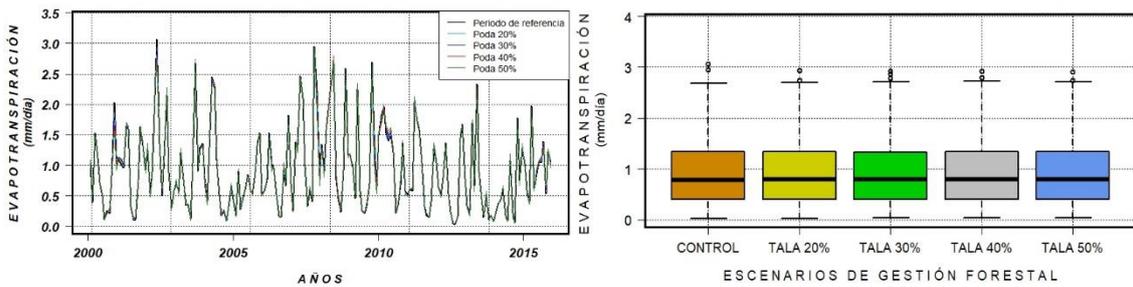


Figura 96. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de evapotranspiración (mm/día) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.

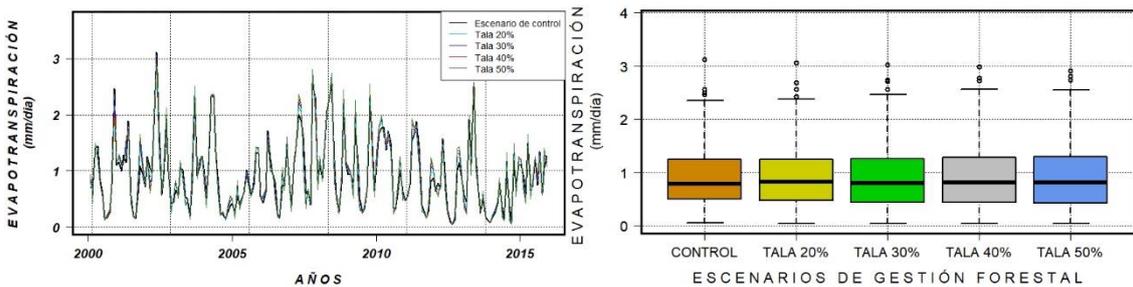


Figura 97. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de evapotranspiración (mm/día) en los escenarios de gestión forestal para rodales de pinos carrasco muy jóvenes.

En las figuras 98, 99 y 100 podemos apreciar que el contenido de humedad en la capa superficial se ve directamente afectado a medida que aumentamos tala. En la zona 2 y zona 4 que se encuentran ocupadas por pino carrasco, la reducción del contenido de humedad oscila entre 6% (tala del 20%) y 10% (tala del 50%). Estas variaciones fueron superiores en el caso de la zona 2 y en ambos casos la dispersión de los datos disminuyó al incrementar la intensidad de la gestión forestal. En la zona 3, la reducción del contenido de humedad no fue tan marcada como las presentadas en las zonas 2 y 4. En las tres zonas se observaron menores contenidos de humedad del suelo en la capa superficial a lo largo de todo el periodo analizado, independientemente de si nos encontrábamos en un periodo húmedo o seco.

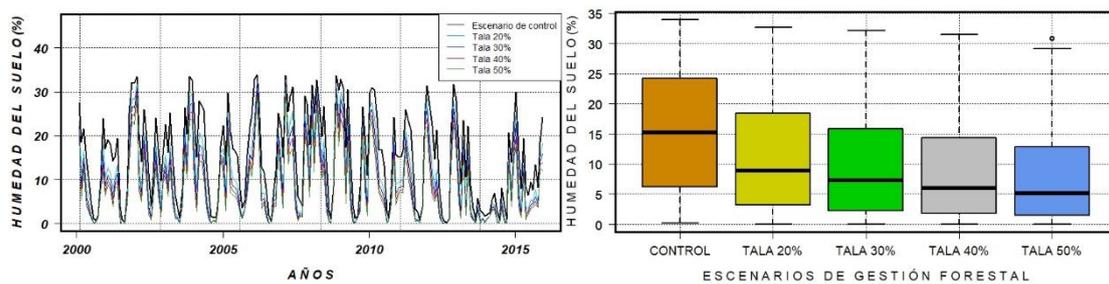
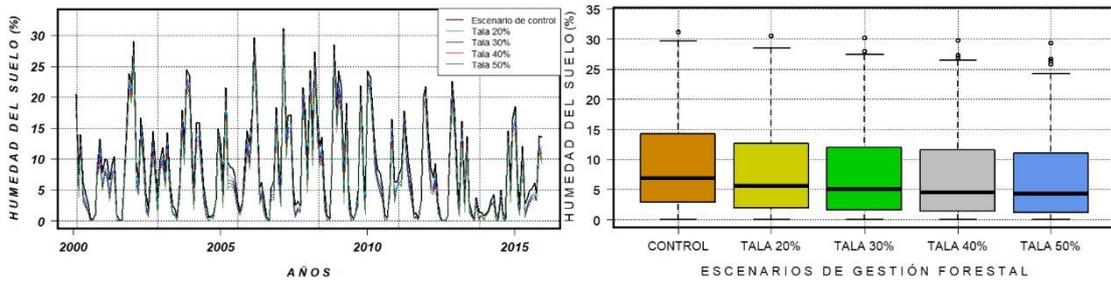
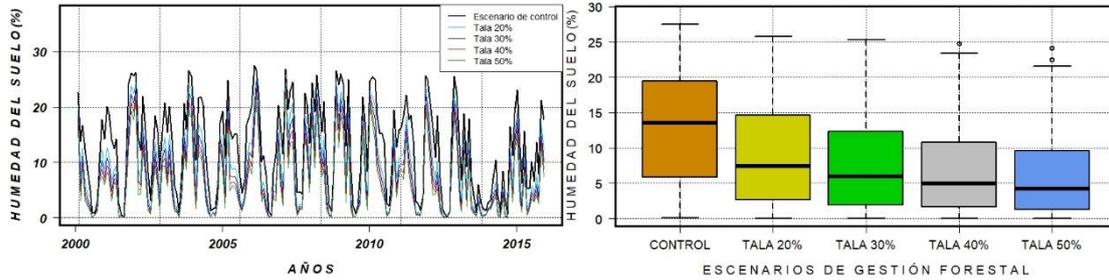


Figura 98. Series (izquierda) y boxplots (derecha) de humedad del suelo de la capa superficial (%) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de pino carrasco.

IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ECO-HIDROLÓGICO PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL CARRAIXET (VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

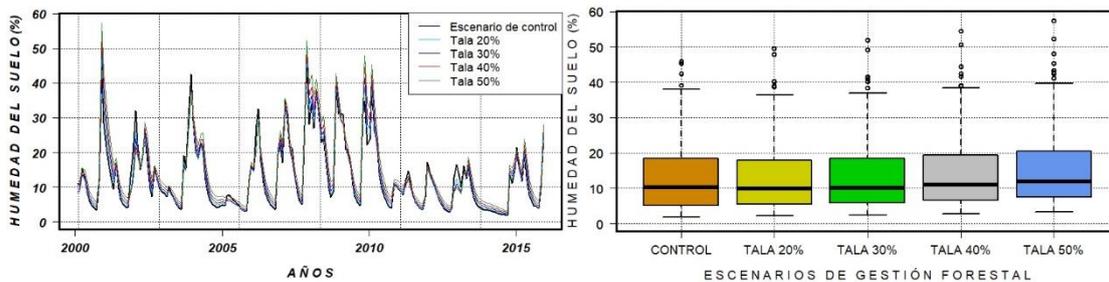


**Figura 99.** Series (izquierda) y boxplots (derecha) de humedad del suelo de la capa superficial (%) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.

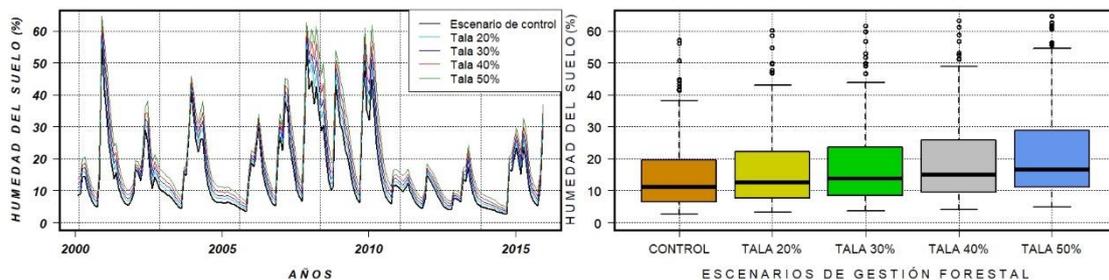


**Figura 100.** Series (izquierda) y boxplots (derecha) de humedad del suelo de la capa superficial (%) en los escenarios de gestión forestal para rodales de pinos carrasco muy jóvenes

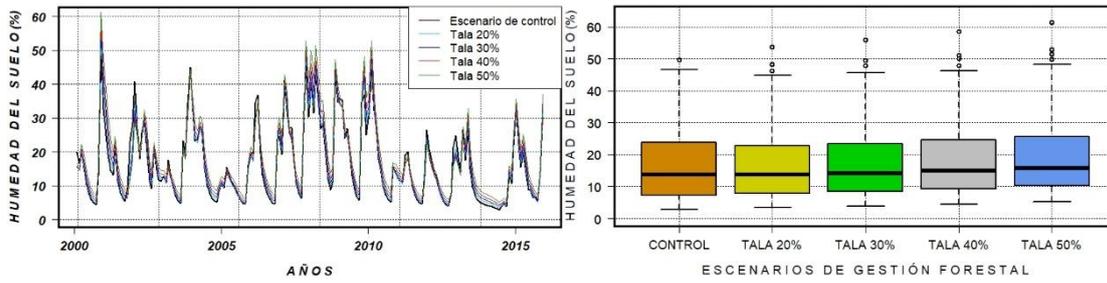
La humedad del suelo en la capa profunda mostró una tendencia creciente a medida que intensificamos la tala. Asimismo, el descenso de la transpiración en las zonas de análisis se traduce en incremento del contenido de humedad en la capa profunda. Si comparamos las figuras 101, 102 y 103 podemos observar que el aumento de la humedad del suelo es más notorio en la zona 3, y esto se debe a que la presencia de una mayor diversidad funcional en las zonas de actuación (frondosas además de las coníferas presentes en las otras zonas), la madurez de los pies y la estructura de los rodales modifica los resultados.



**Figura 101.** Series (izquierda) y boxplots (derecha) de humedad del suelo de la capa profunda (%) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de pino carrasco.

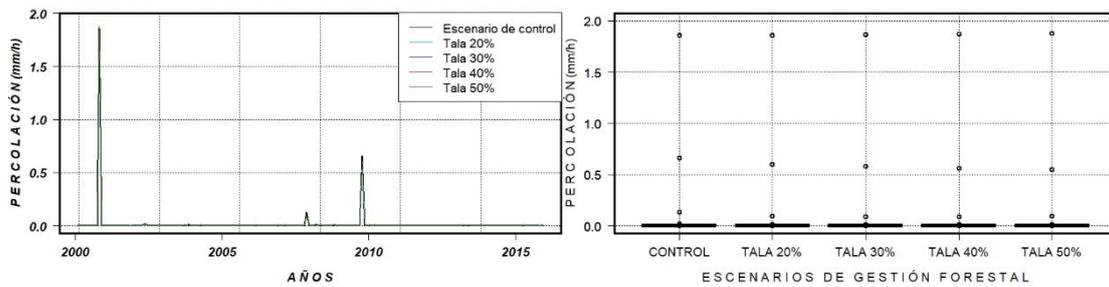


**Figura 102.** Series (izquierda) y boxplots (derecha) humedad del suelo de la capa profunda (%) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.

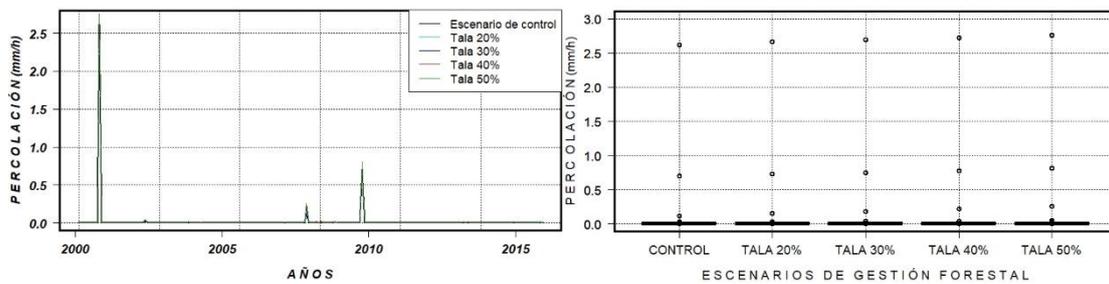


**Figura 103.** Series (izquierda) y boxplots (derecha) de humedad del suelo de la capa profunda (%) en los escenarios de gestión forestal para rodales de pinos carrasco muy jóvenes

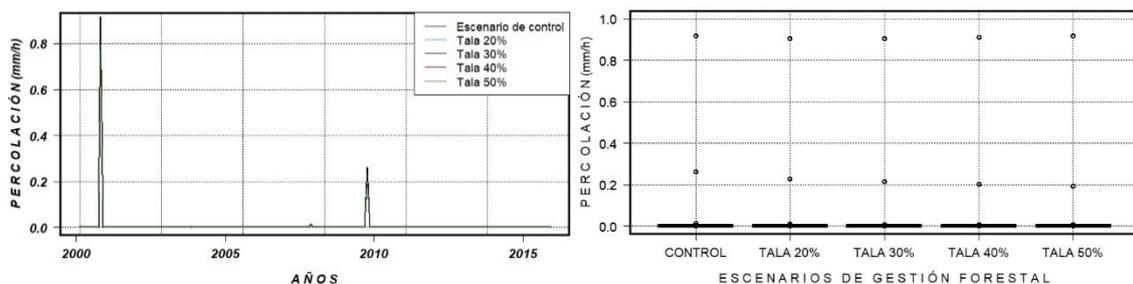
Por último, en las figuras 104, 105 y 106 se muestra que la variación de la percolación ante los diferentes escenarios de gestión forestal fue pequeña y muy puntual en las diferentes zonas de análisis. Sin embargo, se observaron diferencias en la magnitud de los picos, siendo ligeramente superiores en la zona 3 (máxima percolación del periodo analizado aprox. 2.75 mm/h para el escenario de tala 50%) que en la zona 2 (máxima percolación del periodo analizado aprox. 1.88 mm/h para el escenario de tala 50%) y en ambas considerablemente mayores que en la zona 4 (máxima percolación del periodo analizado aprox. 0.92 mm/h).



**Figura 104.** Series (izquierda) y boxplots (derecha) de percolación (mm/h) en los escenarios de gestión forestal, rodales de exclusión de pies de pino carrasco.



**Figura 105.** Series (izquierda) y boxplots (derecha) percolación (mm/h) en los escenarios de gestión forestal para rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.



**Figura 106.** Series (izquierda) y boxplots (derecha) percolación (mm/h) en los escenarios de gestión forestal, Rodales muy jóvenes de pino carrasco.

---

## **CAPITULO 8. CAMBIO CLIMÁTICO**

---

## 8.1. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

El análisis de escenarios de cambio climático consideró las proyecciones de los diferentes escenarios regionales disponibles en la base de datos del proyecto Eurocordex, parte del World Climate Research Program (WRCR), cuyo objetivo es organizar y coordinar a nivel internacional el marco de proyecciones de cambio climático regionales.

Los escenarios, RCPs (Representative Concentration Pathways; Moss *et al.*, 2008) son los escenarios más recientes de cambio climático. Se desarrollaron para el quinto informe AR5 del IPCC, y varían respecto a los anteriores escenarios SRES. Los RCP no son escenarios socioeconómicos, sino que definen rutas de forzamiento o empuje radiativo adicional (additional radiative forcing,  $W.m^{-2}$ ) que la actividad humana causa y causará a lo largo del siglo XXI. El AR5 del IPCC reporta 4 bloques básicos de escenarios que heredan en su denominación el forzamiento radiativo adicional proyectado para el año 2100:

- RCP8.5: Es un escenario de grandes volúmenes de emisión de gases de efecto invernadero. El forzamiento radiativo en RCP8.5 sigue subiendo tras 2100 solo considerando las emisiones del siglo XXI.
- RCP6.0 y RCP4.5: Son escenarios de estabilización en los que los forzamientos se estabilizan al valor definido cerca del final del centenario.
- RCP2.6: Representa un escenario de inversión de tendencia radical hasta alcanzar emisiones negativas considerables.

Según el IPCC el aumento de la temperatura global parece propensa a mantenerse por debajo de los 2 °C relativos al periodo 1850-1900 en los escenarios RCP2.6 Y RCP4.5. Por el contrario, parece propensa a exceder este importante umbral en los escenarios RCP6.0 y RCP8.5.

En base a los diferentes escenarios de emisiones, existen proyecciones climáticas estimadas mediante diferentes modelos de circulación global (GCM) que posteriormente se regionalizaron mediante una batería de modelos climáticos regionales (RCM). Esta regionalización de las proyecciones para el entorno europeo se realizó para dos resoluciones espaciales diferentes: EUR44 de 0.44° (aproximadamente 50km) y EUR11, con una resolución más fina, de 0.11° (aproximadamente 12.5 km), sin perder de vista que los RCM tienen su base en las proyecciones propuestas por los diferentes GCM en los que proyectan el cambio climático que se producirá en resoluciones espaciales grandes, actualmente entre 100 y 500 km, así como su variabilidad.

No solo es importante en el estudio del clima la escala espacial. Además, es importante comprender la escala temporal para poder extraer los cambios en el clima (memoria a largo plazo) de la variabilidad climática. Por ese motivo, las condiciones meteorológicas y sus estadísticos deben considerarse en periodos largos de tiempo, al menos 30 años.

La variabilidad espacial, la variabilidad inter e intra anual (estacional), así como los extremos climáticos se pudieron estimar adecuadamente mediante los modelos regionales disponibles para nuestro caso de estudio. La interpretación y el ajuste del sesgo de los modelos fueron necesarios para su empleo en la modelación del impacto que estas proyecciones producen sobre los resultados del modelo TETIS.

Se estableció como punto de partida el conjunto de series climáticas proyectadas por los modelos RCM que a su vez tomaban como condiciones de contorno diferentes modelos GCM, ver tabla 29.

**Tabla 29. Modelos CORDEX EUR 11° (2018) considerados para la obtención de las proyecciones de los modelos climáticos regionales (RCM) asimilables a la cuenca del Carraixet, en el marco de diferentes modelos de circulación global (GCM).**

	GSM	RCM
CORDEX-EUR-11- ESGF_pts20181218	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CLMcom-CCLM4-8-17
		CNRM-ALADIN53
		RMIB-UGent-ALARO-0
		SMHI-RCA4
	ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E
	IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-INERIS-WRF331F SMHI-RCA4
	MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17 KNMI-RACMO22E (v2) SMHI-RCA4
	MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17 MPI-CSC-REMO2009 SMHI-RCA4 (v1a)
	NCC-NorESM1-M	DMI-HIRHAM5 (v2)

Para la ejecución del modelo ecohidrológico TETIS se utilizó las proyecciones futuras de las siguientes variables climáticas:

- Pr [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]: tasa de precipitación
- Tas [K]: temperatura del aire media
- Tasmin [K]: temperatura del aire mínima
- Tasmáx [K]: temperatura del aire máxima
- Rds [ $\text{W m}^{-2}$ ]: Radiación superficial de onda corta

Se descartó el modelo RMIB-UGent-ALARO-0 por no disponer de datos de temperatura.

Los escenarios analizados fueron los siguientes:

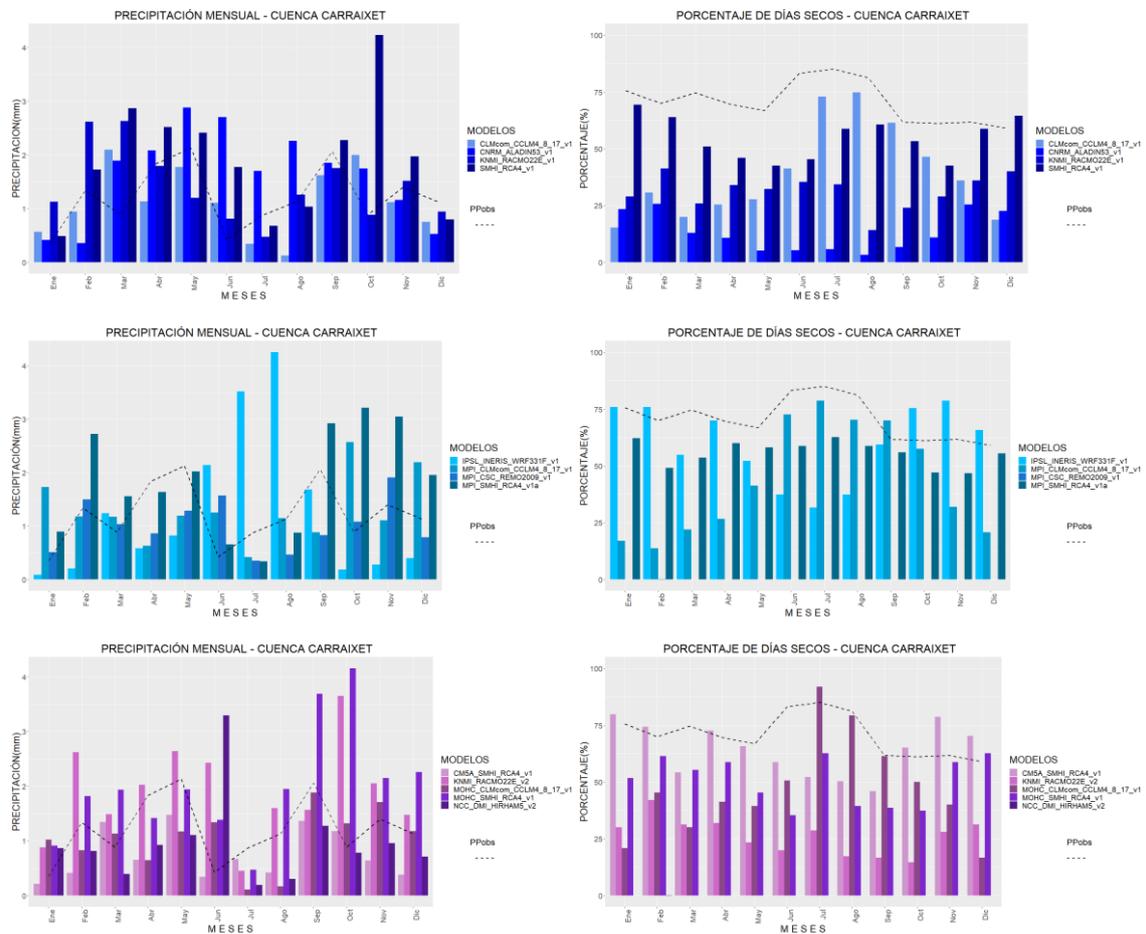
- RCP8.5. Considerado el escenario más pesimista de nuestro análisis. Asimismo, este escenario sirvió como un indicador para prever los impactos negativos del cambio climático sobre las cuencas hidrológicas.
- RCP4.5. Tomado como referencia de un escenario de estabilización de los impactos al final del centenario.
- RCP2.6. Representa el escenario más optimista de nuestro análisis que mostrará una reducción de impactos hasta límites inferiores de los considerados realistas.

## 8.2. DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (CARRAIXET)

Inicialmente, se compararon las proyecciones históricas proporcionadas por los diferentes modelos climáticos con los datos observados para las mismas variables ambientales en la cuenca del Carraixet. Se decidió agregar los datos a escala mensual de manera que se pudiera comprobar que no existían diferencias significativas en la estacionalidad y la dimensionalidad de las series. En la comparación, se encontraron diferencias muy marcadas entre las proyecciones y la serie histórica observada para la cuenca. Por ejemplo, en el caso de la precipitación se

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ECO-HIDROLÓGICO PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL CARRAIXET (VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

observó que los valores medios mensuales y el porcentaje de días secos de las proyecciones históricas eran muy diferentes a los de la serie observada, ver figura 107.



**Figura 107. Precipitación media mensual (izquierda) y porcentaje de días secos (derecha) de los modelos climáticos regionales respecto a los registrados en la cuenca del Carraxet (línea continua).**

Por otro lado, en las figuras 108 y 109, podemos observar que la temperatura promedio mensual proyectada por los modelos climáticos regionales subestimaba en su gran mayoría al valor observado.

IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ECO-HIDROLÓGICO PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL CARRAIXET (VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

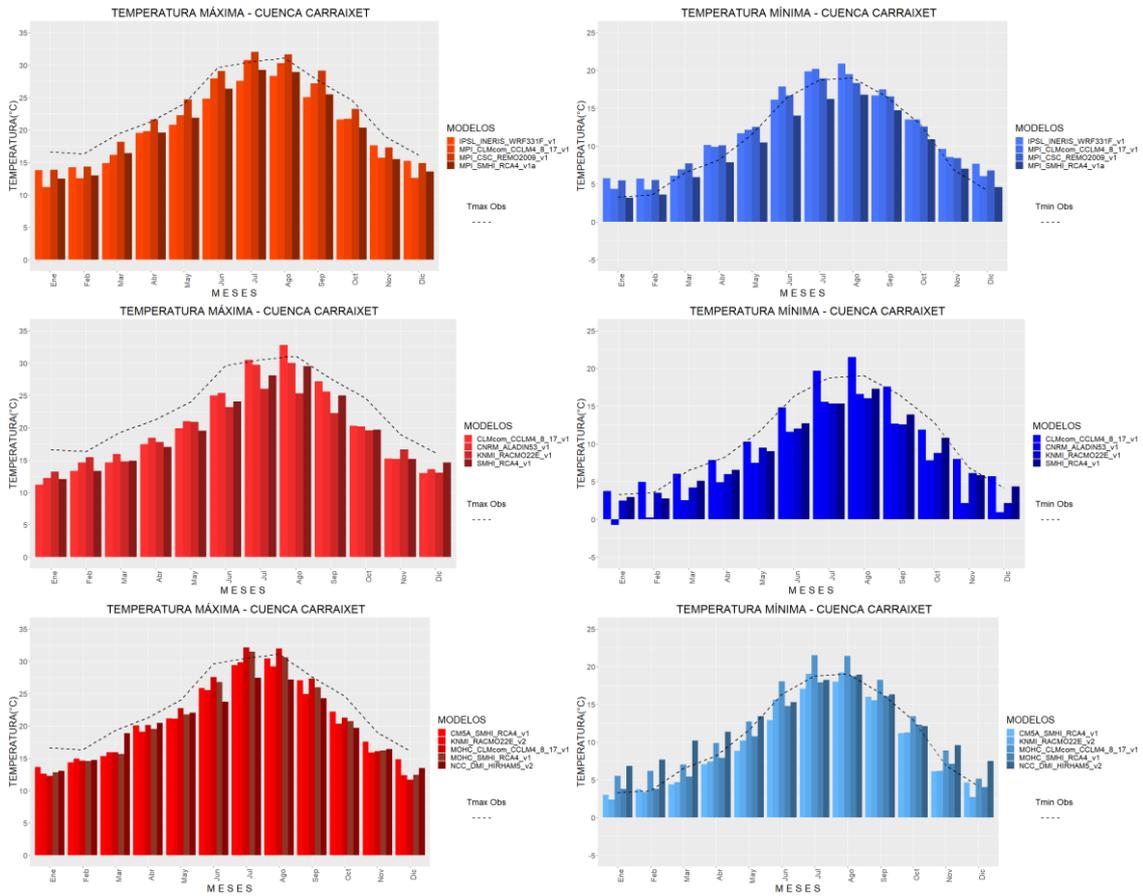


Figura 108. Temperatura promedio mensual máxima (izquierda) y mínima (derecha) de los modelos climáticos regionales respecto a los registrados en la cuenca del Carraixet (línea continua).

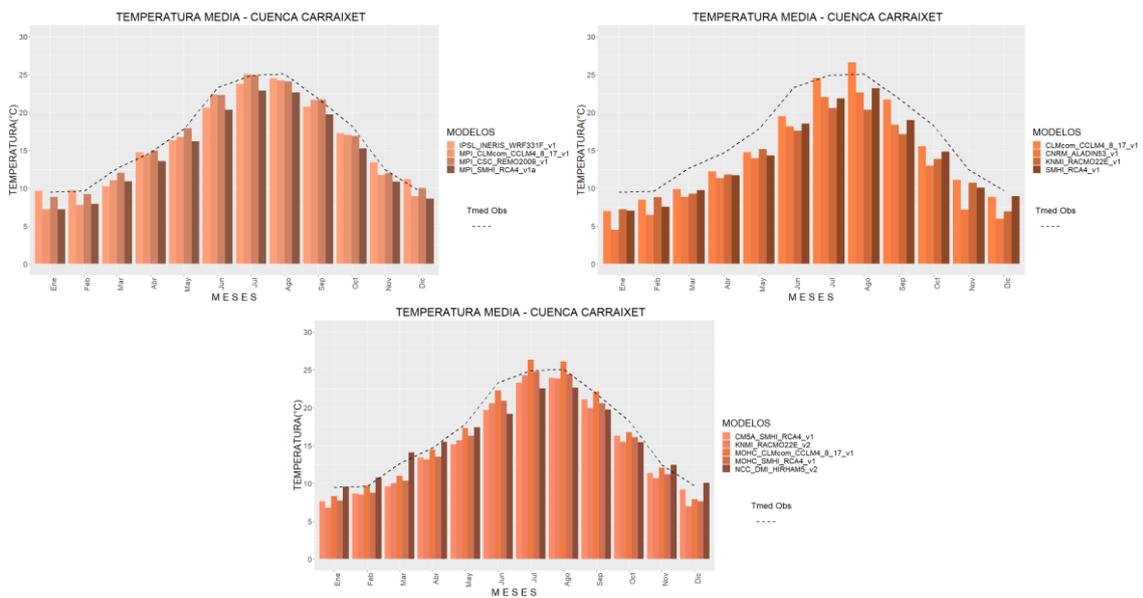


Figura 109. Temperatura media mensual de los modelos climáticos regionales respecto a los registrados en la cuenca del Carraixet (línea continua).

Por ende, se decidió realizar el ajuste de sesgo a las variables meteorológicas obtenidas de los modelos de circulación regional. La metodología empleada para la corrección del sesgo fue el **Quantile Mapping (QM)** que se basa en una corrección estadística de los datos por medio de cuantiles (Li *et al.* 2010). La ventaja de este método es que permite realizar el ajuste de una función de distribución para un periodo futuro en base a la diferencia entre las funciones de distribución de los valores observados y simulados para el periodo de control (García *et al.* 2017), la representación matemática de esta metodología se muestra en la ecuación (8.1).

$$\widehat{X}_m(t) = F_o^{-1}\{F_m[X_m(t)]\} \quad (8.1)$$

Donde:

$\widehat{X}_m(t)$  = Variable climática corregida para un tiempo  $t$ .

$F_o$  = Función de distribución acumulada de la variable climática observados.

$F_m$  = Función de distribución acumulada de la variable climática del RCM.

$X_m(t)$  = Variable climática del RCM para un tiempo  $t$ .

Se utilizó el paquete “*qmap*” de R (lenguaje de programación), para simplificar el proceso de corrección de sesgo de la precipitación y temperatura correspondientes a los modelos de circulación regional.

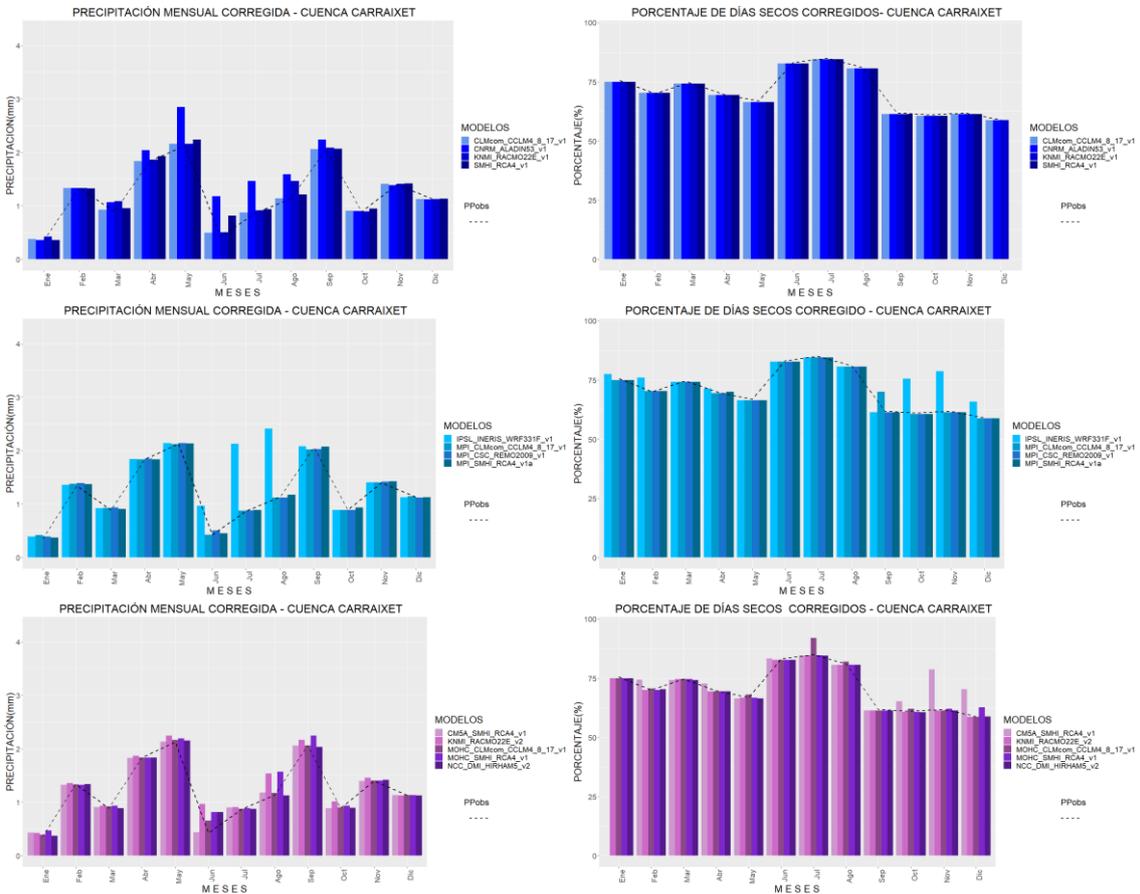
Se consideraron los umbrales mensuales de precipitación para cada uno de los modelos, necesarios para el proceso de eliminación de lluvia espuria de las diferentes proyecciones. Dado que la cuenca se encuentra en un entorno seco, se tuvieron en cuenta los percentiles de días secos para dicha estimación, ver tabla 30.

**Tabla 30. Umbrales mensuales para la eliminación de lluvia espuria en las proyecciones de cambio climático de los diferentes modelos de circulación regional.**

MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PERCENTIL (%)	75.6	70	74.6	69.7	66.8	83.2	85	81.1	61.7	61	61.7	59
PRECIPITACIÓN OBSERVADA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CLMcom_CCLM4_8_17_v1	0.15	0.01	0.59	0.05	0.23	0.86	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
CNRM_ALADIN53_v1	0.08	0.06	1.28	1.43	3.14	5.59	3.43	3.84	0.81	0.18	0.04	0.01
SMHI_RCA4_v1	0.02	0.03	0.79	0.93	0.97	2.95	0.79	0.86	0.04	0.43	0.01	0.00
KNMI_RACMO22E_v1	0.38	0.15	1.65	0.45	0.35	0.57	0.71	1.88	0.26	0.13	0.06	0.03
IPSL_INERIS_WRF331F_v1	0.00	0.00	0.34	0.00	0.16	4.13	9.44	8.84	0.01	0.00	0.00	0.00
MPI_CLMcom_CCLM4_8_17_v1	0.40	0.42	0.41	0.02	0.04	0.08	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04
MPI_CSC_REMO2009_v1	0.25	0.53	0.46	0.21	0.16	0.88	0.25	0.18	0.04	0.07	0.14	0.02
MPI_SMHI_RCA4_v1a	0.10	0.50	0.33	0.05	0.06	0.46	0.41	0.46	0.03	0.23	0.22	0.01
NCC_DMI_HIRHAM5_v2	0.11	0.14	0.01	0.02	0.02	2.87	0.03	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00
CM5A_SMHI_RCA4_v1	0.00	0.00	0.31	0.00	0.00	0.21	0.70	0.48	0.08	0.00	0.00	0.00
MOHC_CLMcom_CCLM4_8_17_v1	0.33	0.00	0.33	0.01	0.02	2.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
KNMI_RACMO22E_v2	0.35	0.24	0.65	0.43	0.80	4.38	0.35	2.22	0.62	0.66	0.39	0.07
MOHC_SMHI_RCA4_v1	0.66	0.07	0.45	0.04	0.42	2.65	0.37	2.43	0.82	0.39	0.03	0.00

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ECO-HIDROLÓGICO PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL CARRAIXET (VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

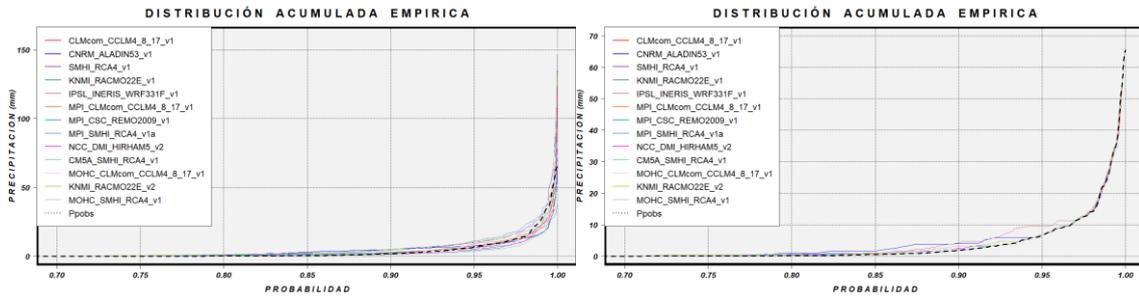
A continuación, la figura 110 muestra los porcentajes de días secos y valores medios mensuales de las series proyectadas de precipitación diaria para los diferentes modelos analizados, una vez eliminada la lluvia espuria y realizadas las correcciones de sesgo.



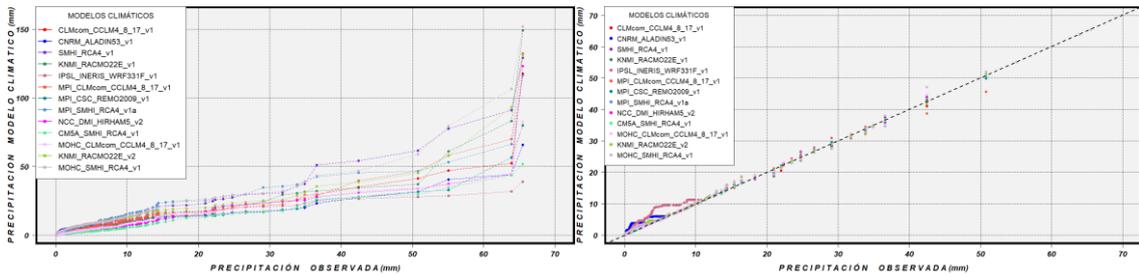
**Figura 110. Distribución de la precipitación y porcentajes de días secos tras la eliminación de lluvia espuria y ajuste de sesgo en los modelos climáticos regionales, variable climática observada (línea continua)**

Como muestran las gráficas 111 y 112, la precipitación máxima diaria de algunos modelos climáticos regionales sobrestima al valor observado en casi el doble su magnitud. Este problema queda solucionado una vez realizado el ajuste de sesgo. Aunque en términos generales todos los modelos climáticos considerados ofrecen unas buenas proyecciones para la cuenca de estudio una vez realizado el ajuste de sesgo, algunos modelos climáticos regionales siguen sobrestimando ligeramente la precipitación observada.

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO ECO-HIDROLÓGICO PARA LA GESTIÓN FORESTAL EN LA CUENCA DEL  
CARRAIXET (VALÈNCIA) CON ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**



**Figura 111. Función de distribución acumulada de precipitación observada y proyectada por los modelos climáticos regionales sin ajuste de sesgo (izquierda) y con ajuste de sesgo (derecha)**



**Figura 112. Cuantiles de precipitación observada y proyectada por los modelos climáticos regionales sin ajuste de sesgo (izquierda) y con ajuste de sesgo (derecha)**

Por otro lado, se utilizó los criterios estadísticos del BIAS y el RMSE para cuantificar el error entre la precipitación observada y la proyectada por los modelos de circulación regional (RCM). Con el fin de elegir el mejor RCM para nuestro análisis de cambio climático. A continuación, se pasa a explicar la metodología del BIAS y el RMSE en las ecuaciones (8.2) y (8.3) respectivamente.

$$BIAS = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (E_i - O_i) \quad (8.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2} \quad (8.3)$$

Donde:

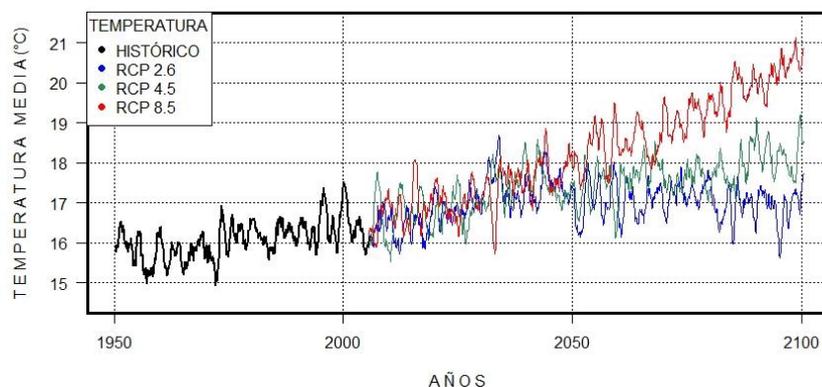
- BIAS* = Sesgo.
- RMSE* = Raíz del error cuadrático medio.
- N* = Numero de datos.
- E* = Variable climática del RCM.
- O* = Variable climática observada.

En la tabla 31, se observa que la precipitación proyectada por el modelo de circulación regional MPI\_CSC\_REMO2009\_v1 es la que presenta mejor ajuste en la estimación de la precipitación observada después de aplicar la metodología del Quantile Mapping.

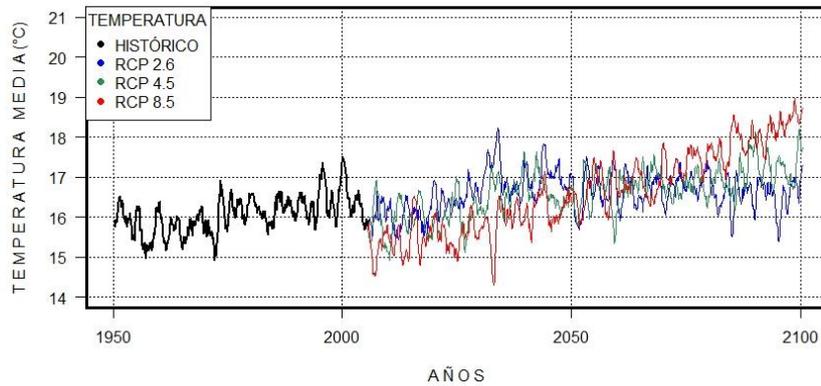
**Tabla 31. Error entre la precipitación observada y la proyectada por los modelos de circulación regional, después de aplicarse el ajuste de sesgo.**

MODELO DE CIRCULACIÓN REGIONAL	CRITERIO ESTADÍSTICO	
	BIAS	RMSE
CLMcom_CCLM4_8_17_v1	0.016	7.310
CNRM_ALADIN53_v1	0.263	7.500
SMHI_RCA4_v1	0.075	7.400
KNMI_RACMO22E_v1	0.071	7.410
IPSL_INERIS_WRF331F_v1	0.274	7.580
MPI_CLMcom_CCLM4_8_17_v1	0.008	7.332
MPI_CSC_REMO2009_v1	0.007	7.305
MPI_SMHI_RCA4_v1a	0.020	7.312
NCC_DMI_HIRHAM5_v2	0.036	7.448
CM5A_SMHI_RCA4_v1	0.012	7.375
MOHC_CLMcom_CCLM4_8_17_v1	0.034	7.327
KNMI_RACMO22E_v2	0.132	7.356
MOHC_SMHI_RCA4_v1	0.109	7.343

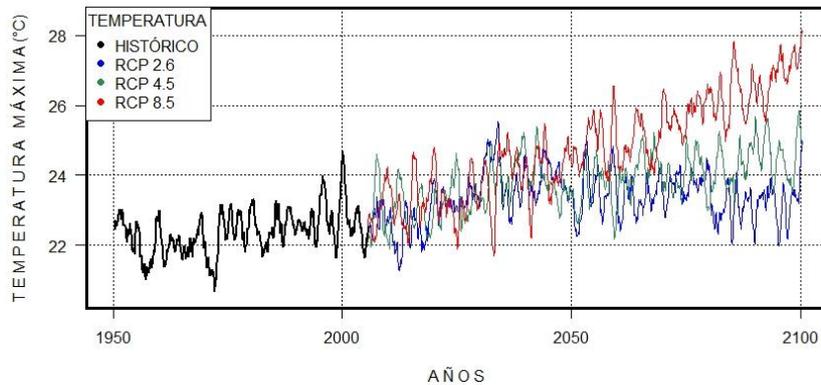
Se analizó a continuación la conveniencia de realizar el ajuste de sesgo sobre las series de temperaturas. Como se puede comprobar en las figuras 113, 114, 115, 116, 117 y 118 la temperatura presenta un comportamiento no estacionario el cual no se logra reproducir en sus diferentes escenarios después de realizar el ajuste de sesgo. Una vez comprobado que las series de temperaturas originales eran asimilables a la cuenca de estudio, se decidió emplear las series de temperaturas máxima, media y mínimas originales sin ajuste de sesgo.



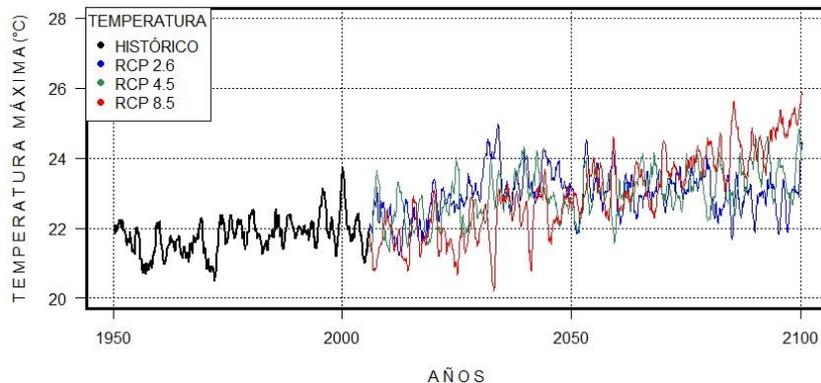
**Figura 113. Series de temperatura media (°C) observadas en el periodo histórico tomado como referencia, años 1950-2005 (negro) y proyectadas por el modelo MPI-CSC-REMO2009-v1, desde el año 2006 hasta finalizar el centenario en los escenarios RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (verde) y RCP 8.5 (rojo).**



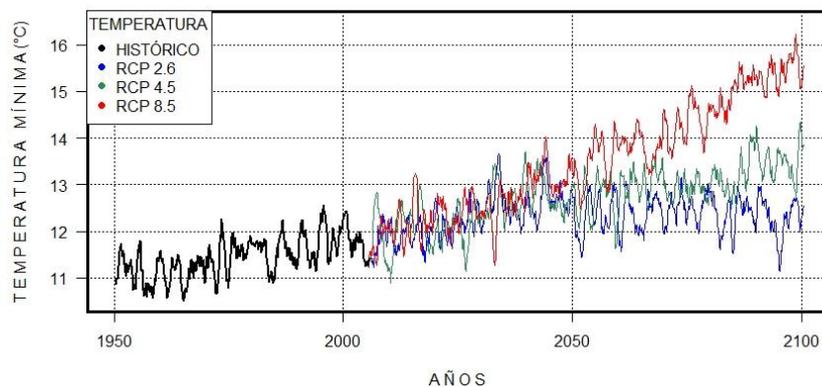
**Figura 114.** Series de temperatura media (°C) observadas en el periodo histórico tomado como referencia, años 1950-2005 (negro) y proyectadas con ajuste de sesgo por el modelo MPI-CSC-REMO2009-v1, desde el año 2006 hasta finalizar el centenario en los escenarios RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (verde) y RCP 8.5 (rojo).



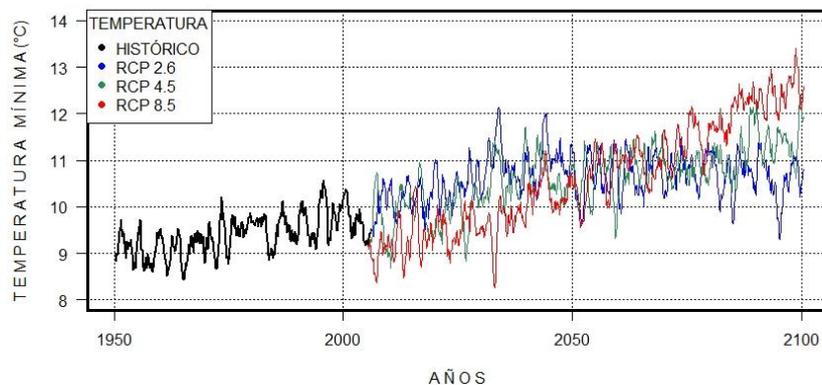
**Figura 115.** Series de temperatura máxima (°C) observadas en el periodo histórico tomado como referencia, años 1950-2005 (negro) y proyectadas por el modelo MPI-CSC-REMO2009-v1, desde el año 2006 hasta finalizar el centenario en los escenarios RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (verde) y RCP 8.5 (rojo).



**Figura 116.** Series de temperatura máxima (°C) observadas en el periodo histórico tomado como referencia, años 1950-2005 (negro) y proyectadas con ajuste de sesgo por el modelo MPI-CSC-REMO2009-v1, desde el año 2006 hasta finalizar el centenario en los escenarios RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (verde) y RCP 8.5 (rojo).



**Figura 117.** Series de temperatura mínima (°C) observadas en el periodo histórico tomado como referencia, años 1950-2005 (negro) y proyectadas por el modelo MPI-CSC-REMO2009-v1, desde el año 2006 hasta finalizar el centenario en los escenarios RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (verde) y RCP 8.5 (rojo).



**Figura 118.** Series de temperatura mínima (°C) observadas en el periodo histórico tomado como referencia, años 1950-2005 (negro) y proyectadas con ajuste de sesgo por el modelo MPI-CSC-REMO2009-v1, desde el año 2006 hasta finalizar el centenario en los escenarios RCP 2.6 (azul), RCP 4.5 (verde) y RCP 8.5 (rojo).

Si bien en el enfoque de mapeo por cuantiles para la corrección de sesgo no se incluyen argumentos de los procesos físicos y se incorporan nuevos niveles de incertidumbre, en este caso se consideró un procesamiento fundamental que dio muy buenos resultados tanto en términos de medias y percentiles de precipitación como en términos de número de días secos/húmedos. Desde el punto de vista espacial, la cuenca de estudio es pequeña y no presentó áreas microclimáticas conflictivas que hicieran pensar que las series proyectadas no fueran aptas para el análisis de impactos.

### 8.3. ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE CAMBIO GLOBAL MEDIANTE EL MODELO ECOHIDROLÓGICO TETIS

La combinación de los escenarios de gestión y de cambio climático proporcionaron lo que en este estudio hemos denominado escenarios de cambio global. Estos escenarios de cambio global permiten realizar el análisis de impactos a través de proyecciones que integran tanto las actuaciones humanas directas (las talas sobre ciertos rodales o usos de suelo) y las afecciones humanas indirectas (más concretamente las relacionadas con los cambios en las señales climáticas).

Recordemos que los escenarios de gestión forestal se seleccionaron a partir de diferentes usos del suelo de interés. Como resultado se obtuvieron cuatro zonas de actuaciones que abarcaban uno (ej. Parcela de experimental) o más rodales distribuidos por la superficie de la cuenca, ver figura 119.

Las actuaciones comprendieron talas del 20%, 30%, 40% y 50% sobre una fracción de cobertura control considerada del 85% de la superficie total de los rodales correspondientes a cada zona, de manera independiente, ver tabla 32.

Estos escenarios se analizaron con los datos de las proyecciones que ofrecía el modelo climático MPI-CSC-REMO2009.v1 para los escenarios de emisión RCP2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5, en diferentes ventanas temporales de 30 años (1975-2005 considerado el periodo de referencia, 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099, año inicial y final incluidos en cada uno de los periodos analizados).

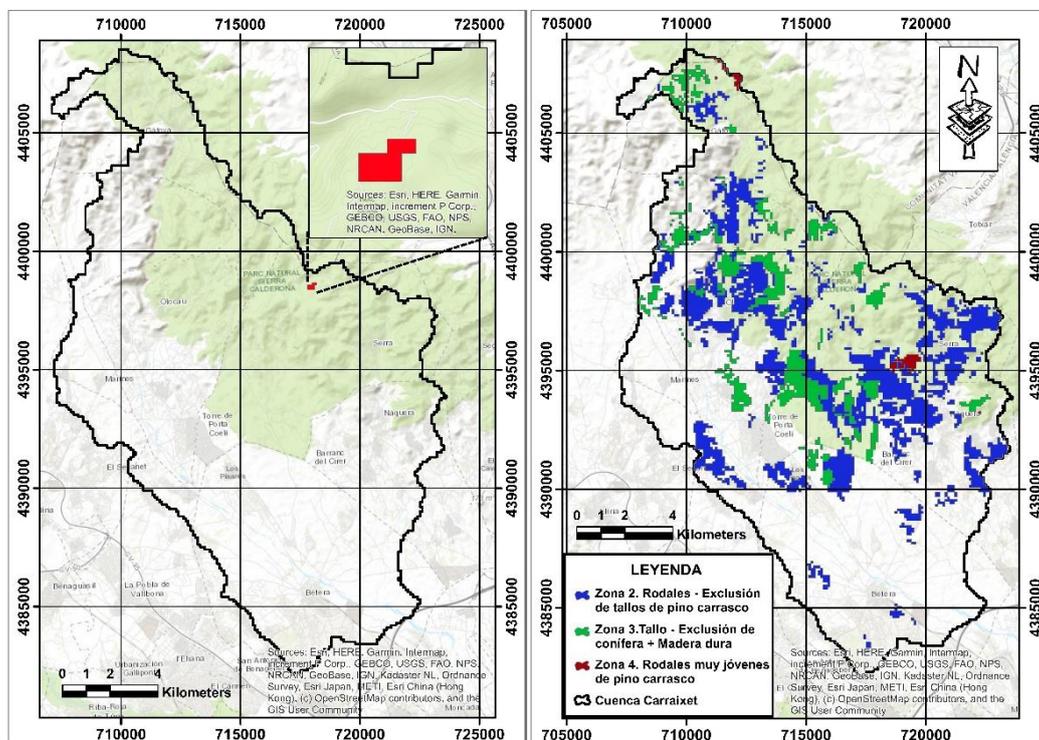


Figura 119. Zonas para el análisis de impactos mediante la modelación de escenarios de cambio global con el modelo ecohidrológico TETIS.

**Tabla 32. Definición de escenarios de cambio global (global change, GC) en diferentes escenarios de gestión forestal (Forest management, FM) y de cambio climático (Climate change, CC) en la cuenca del Carraixet.**

NOMBRE DEL ESCENARIO	ZONA	PORCENTAJE De TALA (%)	PROYECCIONES CLIMÁTICAS (MPI-CSC-REMO2009.v1)
GC-FM00-CC2.6	Zona 1 -Parcela experimental.	0	RCP2.6
GC-FM00-CC4.5			RCP.4.5
GC-FM00-CC8.5			RCP8.5
GC-FM20-CC2.6	Zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco.	20	RCP2.6
GC-FM20-CC4.5			RCP.4.5
GC-FM20-CC8.5			RCP8.5
GC-FM30-CC2.6	Zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.	30	RCP2.6
GC-FM30-CC4.5			RCP.4.5
GC-FM30-CC8.5			RCP8.5
GC-FM40-CC2.6	Zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes.	40	RCP2.6
GC-FM40-CC4.5			RCP.4.5
GC-FM40-CC8.5			RCP8.5
GC-FM50-CC2.6		50	RCP2.6
GC-FM50-CC4.5			RCP.4.5
GC-FM50-CC8.5			RCP8.5

#### 8.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE CAMBIO GLOBAL

La cantidad de escenarios planteados y el gran volumen de resultados generados requirió un esfuerzo importante para su representación. Los diferentes flujos y condiciones de los tanques de contenido hídrico simulados por el modelo ecohidrológico TETIS se analizaron distribuidos en el espacio (un valor para cada píxel) y con una agregación mensual a lo largo de todos los periodos propuestos. A continuación, se explica los resultados obtenidos.

##### ❖ Balance vegetal (biomasa y LAI)

Los resultados mostraron como una gestión de tala en la parcela experimental produce un incremento del índice de área foliar (LAI); esto comportamiento es debido a que cuando disminuimos el factor de cobertura se inicia un proceso de recuperación de la vegetación lo cual ocasiona un aumento de la biomasa foliar y por ende un incremento del LAI. Por otro lado, los incrementos del LAI en los escenarios de cambio climático no fueron tan notables, incluso en algunos casos el LAI descendió respecto al periodo de referencia en todos los escenarios de gestión.

Se volvió a comprobar cómo, a pesar de no ser tan acusado en primera instancia como en el escenario más pesimista, la reducción de fracción de cobertura producía reducciones de LAI en los escenarios optimistas de cambio climático (RCP2.6). Mientras que los escenarios de estabilización no mostraban diferencias representativas al comparar los resultados de la primera ventana temporal con el periodo de referencia del mismo escenario de gestión salvo por una ligera homogenización hacia los valores medios, el pesimista (RCP 8.5) mostró una variabilidad más elevada. Fue en el siguiente periodo, a mitad del centenario, cuando los escenarios de estabilización mostraron incrementos destacables relativos al periodo anterior y los

correspondientes a una proyección optimista de las emisiones de gases de efecto invernadero mostraron una tendencia contraria de descenso de los valores de LAI simulados. En el último periodo, al final del centenario, se pudo comprobar como efectivamente la tendencia de los escenarios de gestión hacia incrementos del LAI (mayores cuanto más agresiva era la gestión) se aceleraba en el tiempo en los escenarios de estabilización y pesimistas respecto al optimista. Se observaron incrementos en RCP2.6 respecto al periodo anterior solo en el último periodo analizado. Por el contrario, la etapa final evidenció disminuciones del LAI respecto al periodo anterior en los otros dos bloques de escenarios. En conclusión, podemos afirmar que mientras los escenarios de gestión modifican las magnitudes de los incrementos del LAI, los escenarios de cambio climático modifican las tendencias en el tiempo, siguiendo un patrón de ligero descenso inicial, seguido de un periodo de incremento que finaliza con nuevos descensos más marcados. En el caso del escenario optimista esta dinámica del LAI se ve suavizada y postergada en el tiempo en varias décadas, ver figura 120.

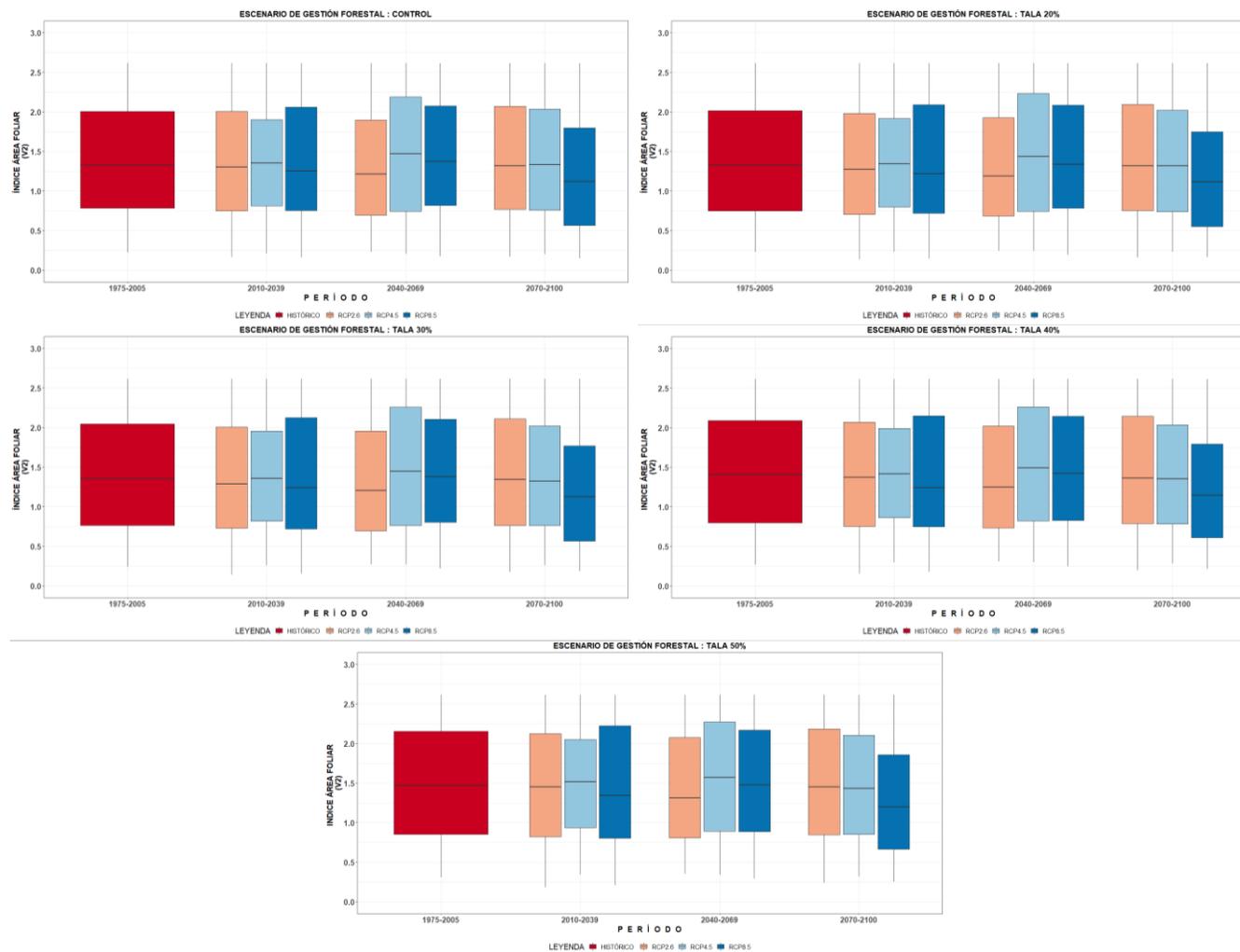


Figura 120. Cambios en el índice de área foliar (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.

❖ **Flujos de salida a la atmosfera (Evaporación, transpiración y evapotranspiración)**

Del mismo modo, los escenarios de gestión mostraron reducciones de la transpiración, siendo más evidentes en el escenario pesimista al final del centenario, ver figura 121.

Los incrementos en la evaporación directa desde la fracción no cubierta del suelo fueron notables al realizar modificaciones en la intensidad de las actuaciones de tala propuestas. De ese modo, los escenarios con clareos más agresivos presentaron mayores tasas de evaporación que los más ligeros, además de presentar valores más dispersos en la distribución temporal de los datos. Pocas diferencias se observaron entre los diferentes escenarios de cambio climático, siendo la tendencia a la disminución de la evaporación desde el suelo desnudo al final del centenario respecto al escenario de control en el periodo de referencia. Este resultado que puede sorprender a priori debido a unas mayores temperaturas proyectadas para dicho periodo se justificó al analizar la variabilidad en el régimen de precipitaciones y su consecuente descenso en la humedad de la capa superficial del suelo. Se concluyó que mientras que los escenarios RCP2.6 y RCP4.5 no presentaban cambios destacables frente al escenario de referencia en cada caso de gestión, el RCP 8.5 mostraba un incremento a mitad del centenario seguido de descensos en el siguiente periodo, ver figura 122.

Los resultados en términos de evapotranspiración global no mostraron apenas diferencias entre los escenarios de gestión por las compensaciones producidas entre los descensos de la transpiración y los incrementos de la evaporación, ver figura 123. Esto implica que la evapotranspiración en si misma puede enmascarar procesos físicos de cambio que se producen en las cuencas como consecuencia de la gestión forestal y debe ser considerada con cautela, siendo altamente recomendable la descomposición en sus elementos fundamentales. Esta conclusión se consideró una de las más importantes de este estudio pues a pesar de que todavía es extraño encontrar balances en hidrológicos en la toma de decisiones respecto a la gestión forestal, parece que la tendencia actual se dirige hacia las consideraciones de la evapotranspiración como variable de referencia (Komatsu y Kume, 2020). En pocas palabras, si se observaron nuevamente los cambios entre los diferentes escenarios de cambio climático, aunque nuevamente enmascarados por las compensaciones entre los descensos de transpiración e incrementos de evaporación desde suelo desnudo.

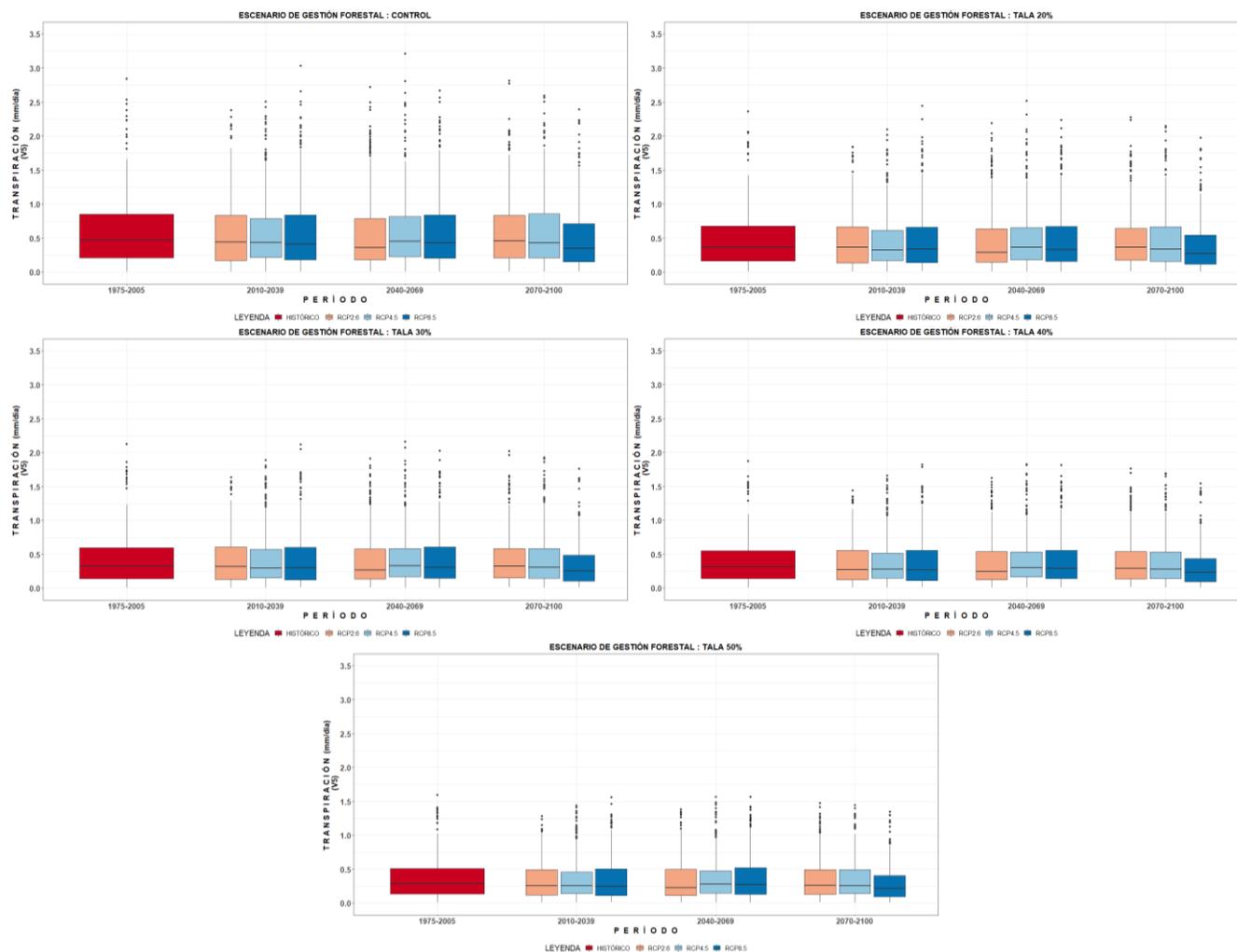


Figura 121. Cambios en la transpiración (mm/d) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados

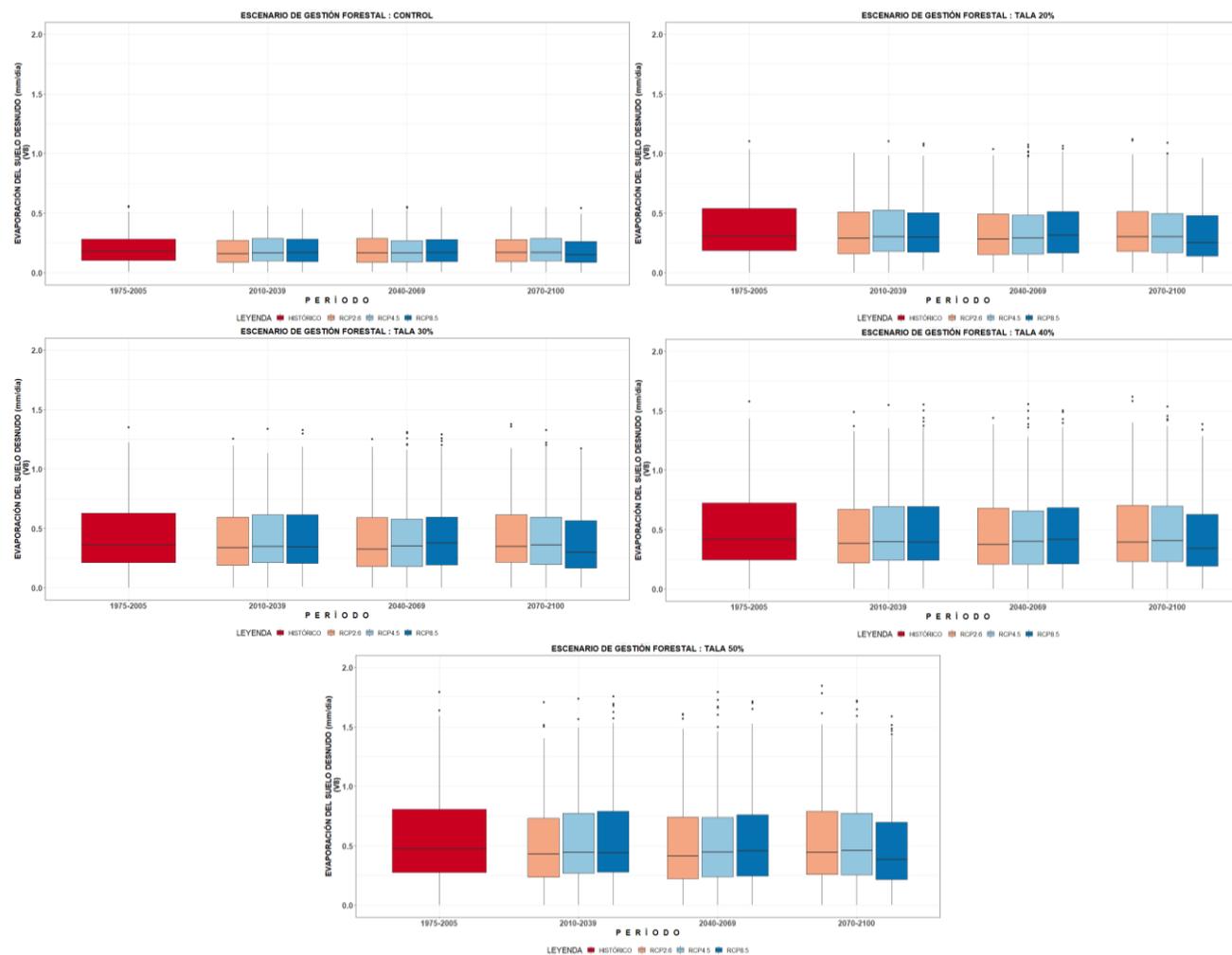


Figura 122. Cambios en la evaporación desde el suelo desnudo (mm/d) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.

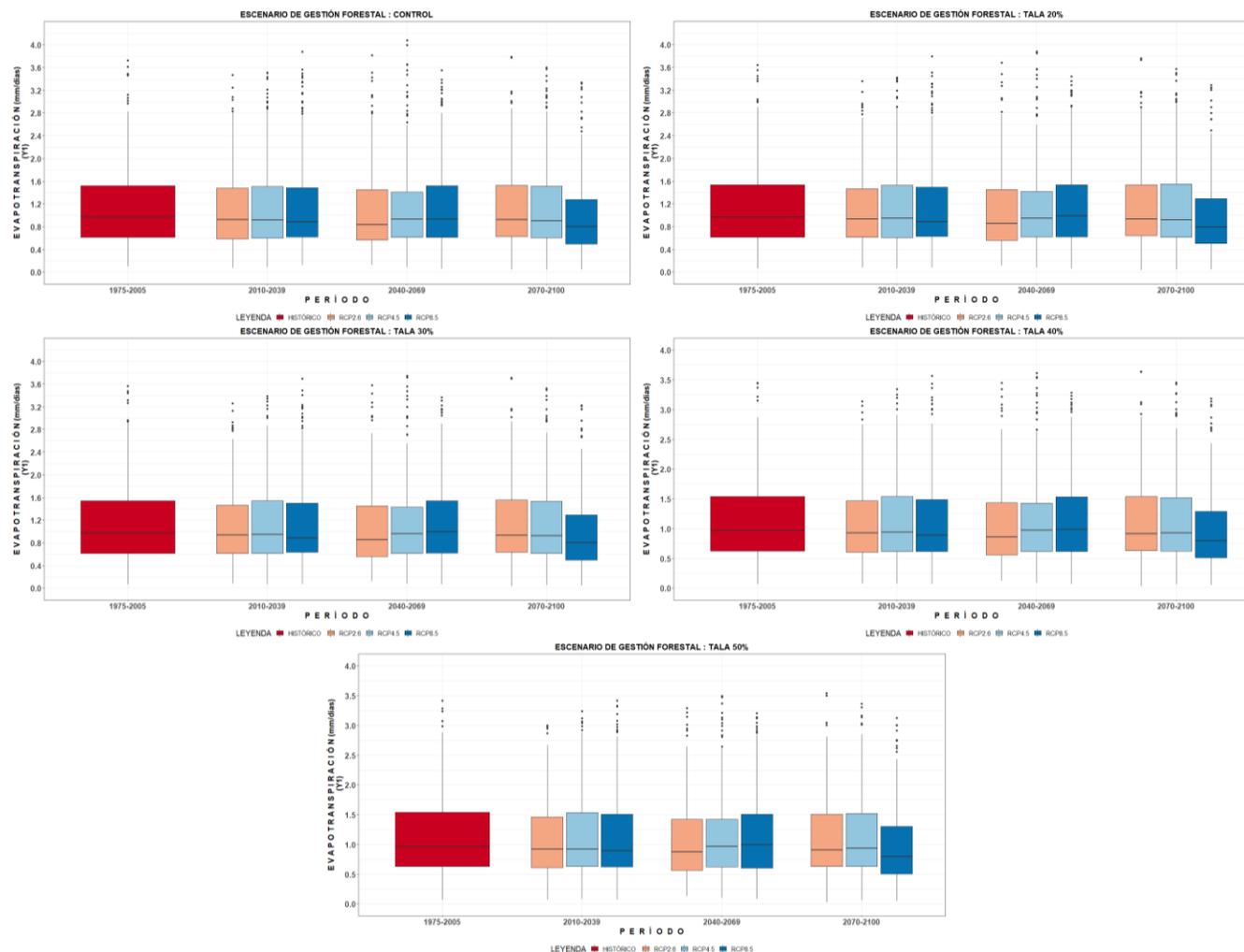


Figura 123. Cambios en la evapotranspiración (mm/d) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.

❖ ***Balance de humedad del suelo (superficial y subterránea)***

Mientras que los incrementos en la evaporación del suelo desnudo provocaban descensos en la humedad de la capa más superficial del suelo (ver figura 124), los descensos en la transpiración produjeron incrementos generalizados de la humedad del suelo en la capa profunda, ver figura 125.

En términos generales, estos cambios se enfatizaron progresivamente a medida que los escenarios de tala proponían una mayor superficie de tala. Aunque la tendencia marcada por los escenarios de gestión forestal se mantuvo en todos los supuestos planteados por las proyecciones de cambio climático, se observaron diferentes distribuciones de los resultados para cada uno de ellos. Así, en los escenarios optimistas (RCP2.6) se observaron impactos suavizados respecto al periodo de control y tendencias ralentizadas en el tiempo respecto a los otros escenarios de cambio climático. En los escenarios de estabilización (RCP4.5) se obtuvieron resultados similares o muy ligeramente modificados respecto a los obtenidos en las simulaciones del periodo de referencia, a excepción de la humedad en el suelo profundo a mitad del centenario que mostró valores incrementados de la humedad en la capa profunda del suelo, no reflejados en términos de una mayor transpiración vegetal. Por último, el escenario pesimista produjo impactos enfatizados, mostrando descensos relativos al periodo de control en la humedad del suelo, tanto en la capa superficial como en la capa profunda.

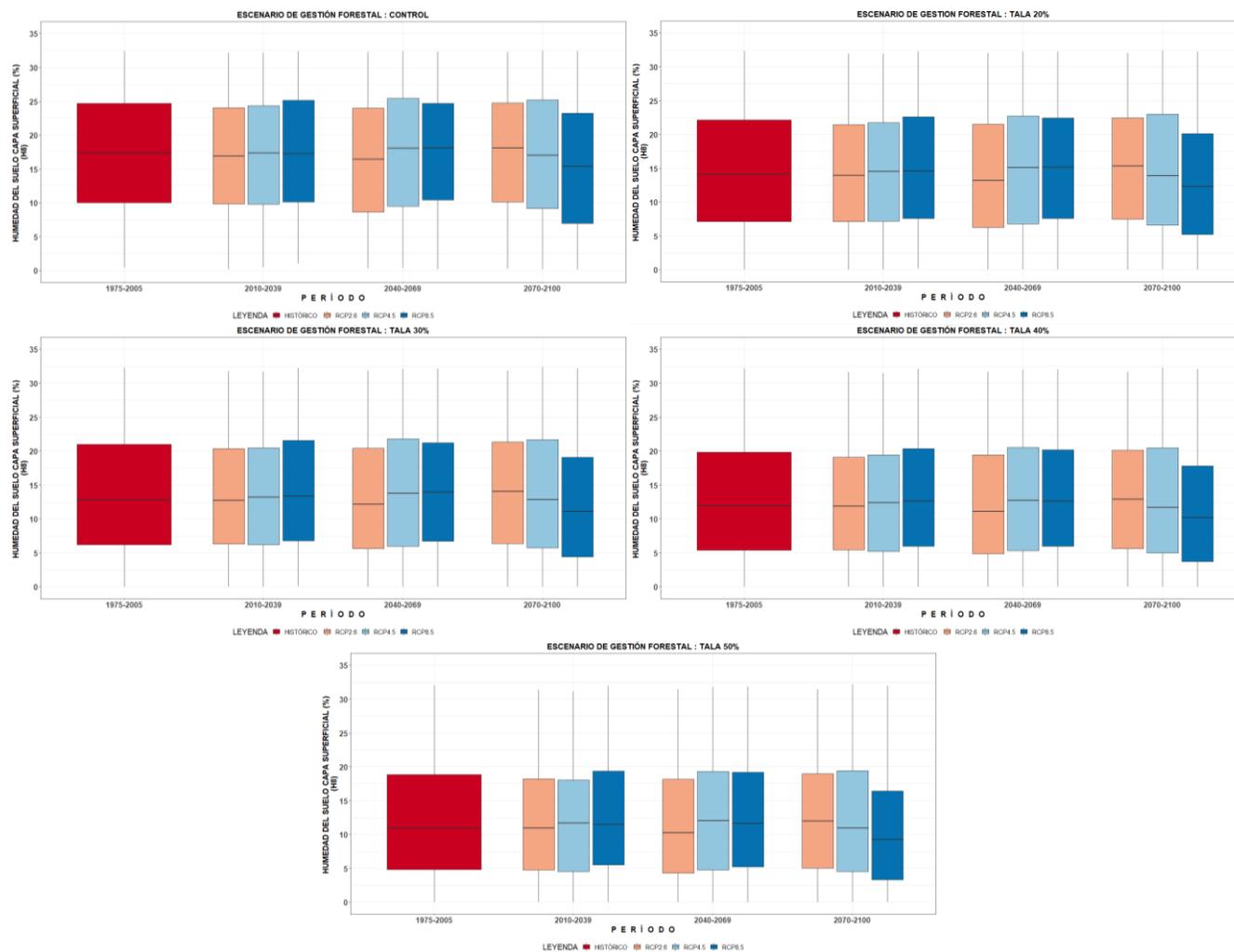


Figura 124. Cambios en la humedad del suelo en la capa superficial (%) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo que los tres periodos futuros seleccionados.

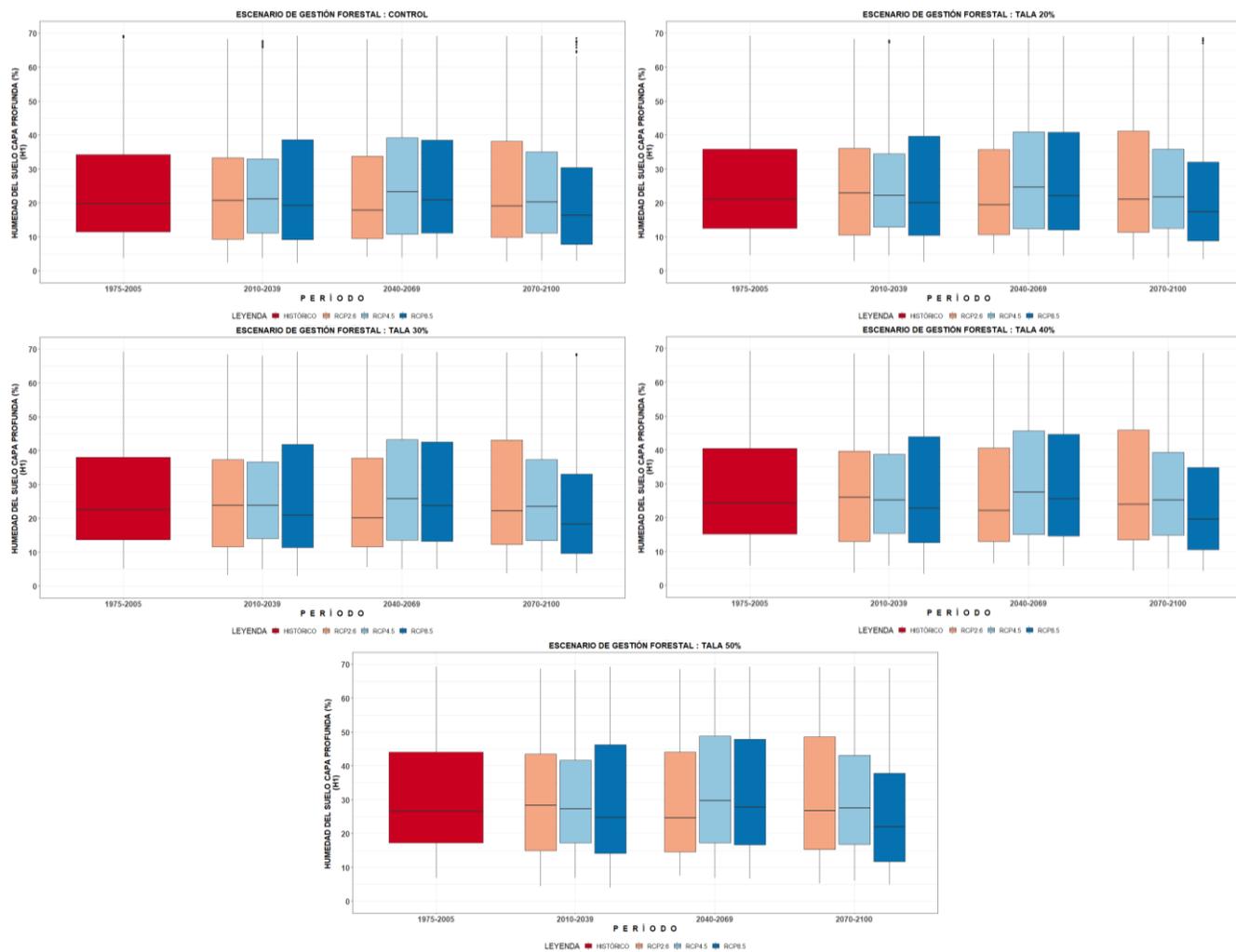
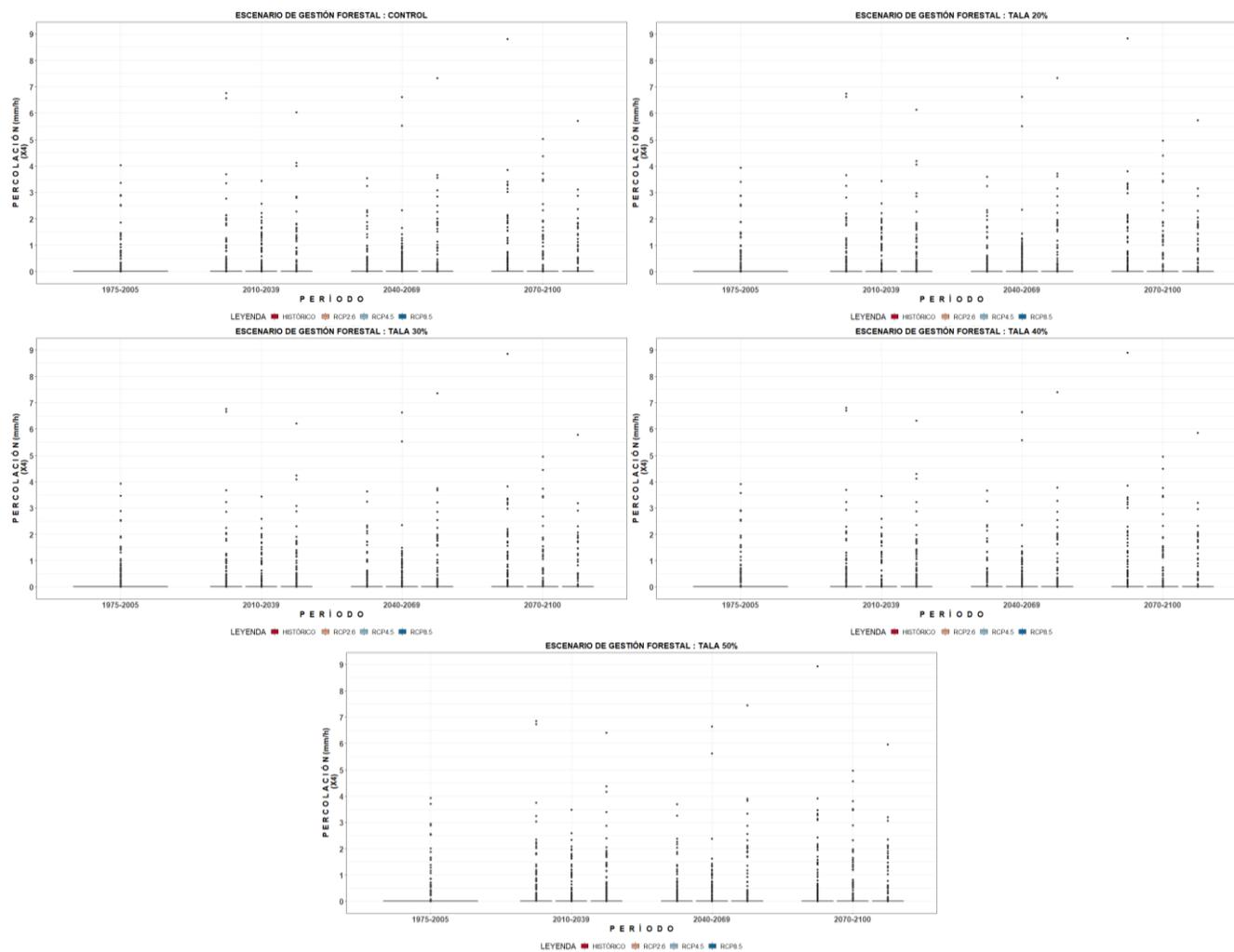


Figura 125. Cambios en la humedad del suelo en la capa profunda (%) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.

❖ **Flujos de percolación**

La percolación mostró ligeras variaciones respecto al escenario control. En general las proyecciones futuras producían un incremento en la magnitud de los valores extremos de percolación, en el escenario optimista e independientemente del escenario de tala analizado, de hasta 5 mm/h de diferencia respecto al escenario control de manera puntual. Se pudo comprobar claramente como la tala producía un incremento en la percolación, mayor cuanto más intenso era el escenario de gestión forestal. Por el contrario, no se pudo definir un patrón claro con relación al nivel de optimismo/pesimismo de los escenarios de cambio climático, siendo el escenario RCP4.5 de estabilización el que nuevamente muestra resultados más similares en comparación con el periodo de referencia. Los comportamientos de RCP2.6 y RCP8.5 no mostraron patrones significativos, ver figura 126.



**Figura 126.** Cambios en la percolación (mm/h) en la parcela experimental, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.

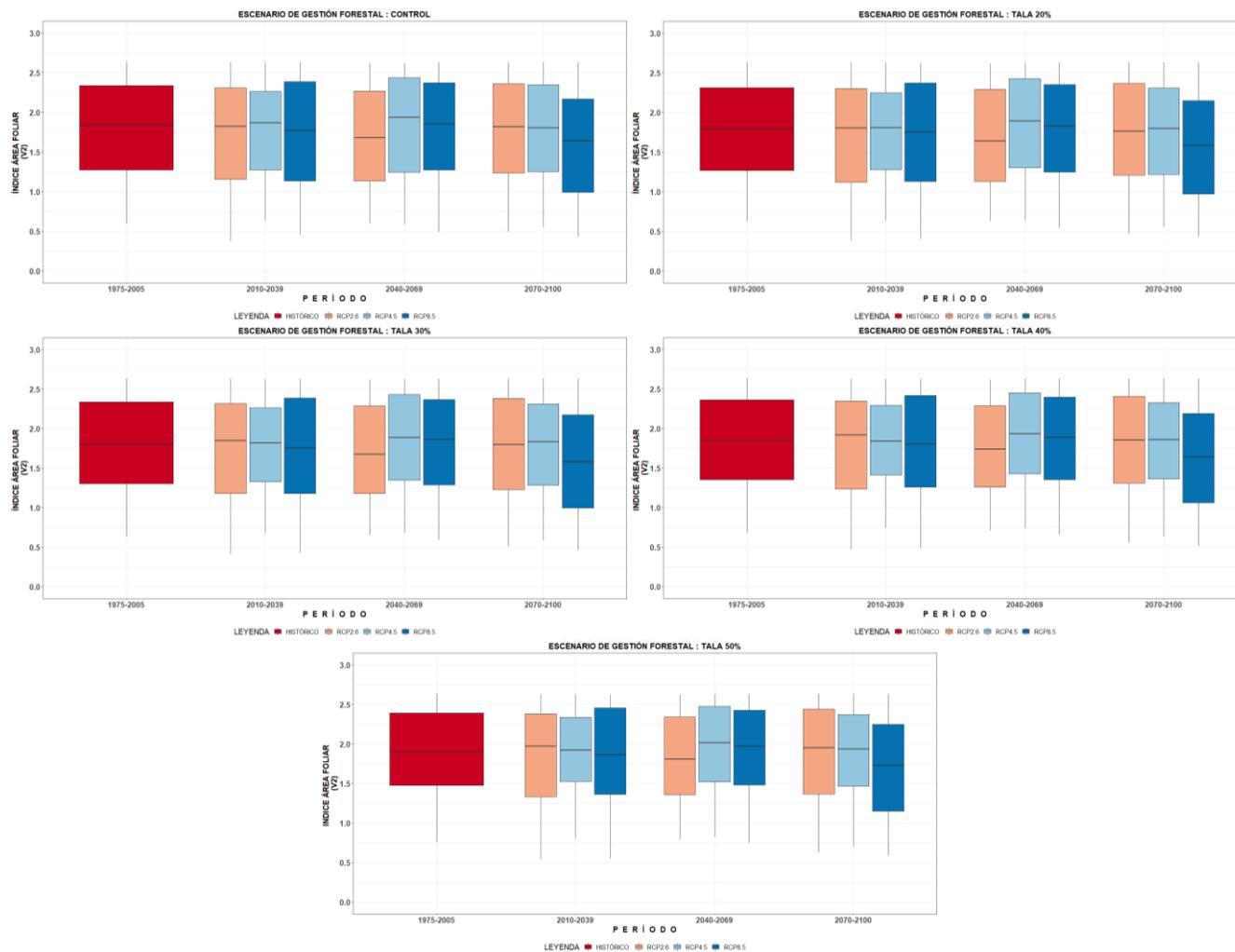
Al analizar las zonas restantes se observaron comportamientos similares. A modo de resumen se planteó la siguiente tabla que permitió conocer las tendencias generales que seguían los comportamientos de las diferentes variables analizadas. La tabla muestra la tendencia ascendente ( $\uparrow$ ), descendente ( $\downarrow$ ) o similar ( $\approx$ ) de la magnitud de cada variable ante mayores intensidades en la gestión forestal (mayor fracción de cobertura talada en comparación con el escenario de referencia y los escenarios de tala menos intensos) y ante un acercamiento pesimista al escenario de mayor impacto de cambio climático al final del centenario (escenario RCP8.5).

**Tabla 33. Tendencia del LAI y de las variables hidrológicas ante escenarios de gestión forestal y cambio climático**

LAI (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Zona 1 – Parcela experimental.	Zona 2 - Rodales de exclusión de pies de pino carrasco.	Zona 3 - Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.	Zona 4 - Rodales de pinos carrasco muy jóvenes.
$\uparrow$ Intensidad de tala	$\uparrow$	$\uparrow$	$\approx$	$\uparrow$
$\uparrow$ Cambio climático (2100)	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
Transpiración (mm/d)	Zona 1 – Parcela experimental.	Zona 2 - Rodales de exclusión de pies de pino carrasco.	Zona 3 - Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.	Zona 4 - Rodales de pinos carrasco muy jóvenes.
$\uparrow$ Intensidad de tala	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
$\uparrow$ Cambio climático (2100)	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
Evaporación directa (mm/d)	Zona 1 – Parcela experimental.	Zona 2 - Rodales de exclusión de pies de pino carrasco.	Zona 3 - Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.	Zona 4 - Rodales de pinos carrasco muy jóvenes.
$\uparrow$ Intensidad de tala	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
$\uparrow$ Cambio climático (2100)	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
Evapotranspiración (mm/d)	Zona 1 – Parcela experimental.	Zona 2 - Rodales de exclusión de pies de pino carrasco.	Zona 3 - Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.	Zona 4 - Rodales de pinos carrasco muy jóvenes.
$\uparrow$ Intensidad de tala	$\approx$	$\approx$	$\approx$	$\approx$
$\uparrow$ Cambio climático (2100)	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
Contenido de humedad en la capa superficial (%)	Zona 1 – Parcela experimental.	Zona 2 - Rodales de exclusión de pies de pino carrasco.	Zona 3 - Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.	Zona 4 - Rodales de pinos carrasco muy jóvenes.
$\uparrow$ Intensidad de tala	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
$\uparrow$ Cambio climático (2100)	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
Contenido de humedad en la capa profunda (%)	Zona 1 – Parcela experimental.	Zona 2 - Rodales de exclusión de pies de pino carrasco.	Zona 3 - Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.	Zona 4 - Rodales de pinos carrasco muy jóvenes.
$\uparrow$ Intensidad de tala	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
$\uparrow$ Cambio climático (2100)	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
Percolación (mm/h)	Zona 1 – Parcela experimental.	Zona 2 - Rodales de exclusión de pies de pino carrasco.	Zona 3 - Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas.	Zona 4 - Rodales de pinos carrasco muy jóvenes.
$\uparrow$ Intensidad de tala	$\uparrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
$\uparrow$ Cambio climático (2100)	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$

En términos generales podemos afirmar que escenarios de gestión más intensos incrementan el LAI, la evaporación directa desde el suelo desnudo, la humedad en la capa profunda del suelo y la percolación. Por el contrario, un clareo más agresivo produce también descensos de la transpiración y de la humedad en la capa de suelo más superficial, manteniendo el balance de la evapotranspiración sin apenas cambios. Estos resultados más diversificados respecto a la consideración de diferentes zonas de interés en la cuenca de estudio confirmaron la hipótesis de que el empleo de la evapotranspiración como indicador del impacto no es aceptable.

Como se puede observar en los gráficos de cajas y bigotes mostrados a continuación, se observaron ligeras diferencias en el comportamiento de los diferentes usos del suelo, así como entre los diferentes escenarios de cambio climático en las diferentes ventanas temporales analizadas, manteniéndose las tendencias generales planteadas en la tabla anterior para todas las zonas analizadas. Aunque con reservas por ser estos resultados provisionales, podemos concluir que el uso del suelo en los diferentes píxeles de la cuenca va a determinar la resiliencia de la cuenca frente a diferentes posibles futuros en el marco del cambio climático. En este caso, la combinación de coníferas con frondosas (zona 3) muestra una respuesta más suavizada, indicando que una mayor diversidad de especies forestales no solo es deseable desde un punto de vista ecológico, además lo es desde la perspectiva hidrológica



**Figura 127.** Cambios en el índice de área foliar ( $m^2/m^2$ ) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.

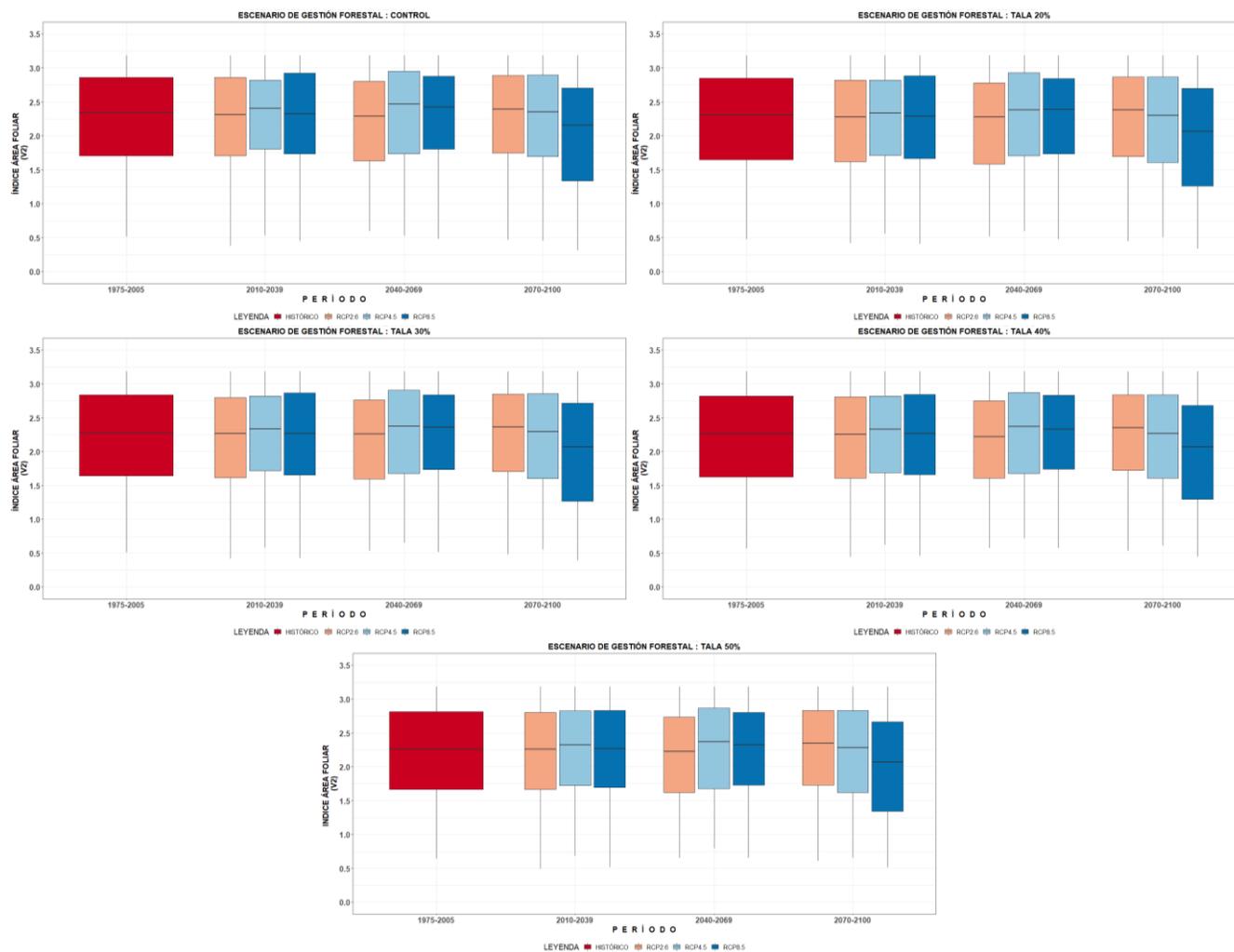
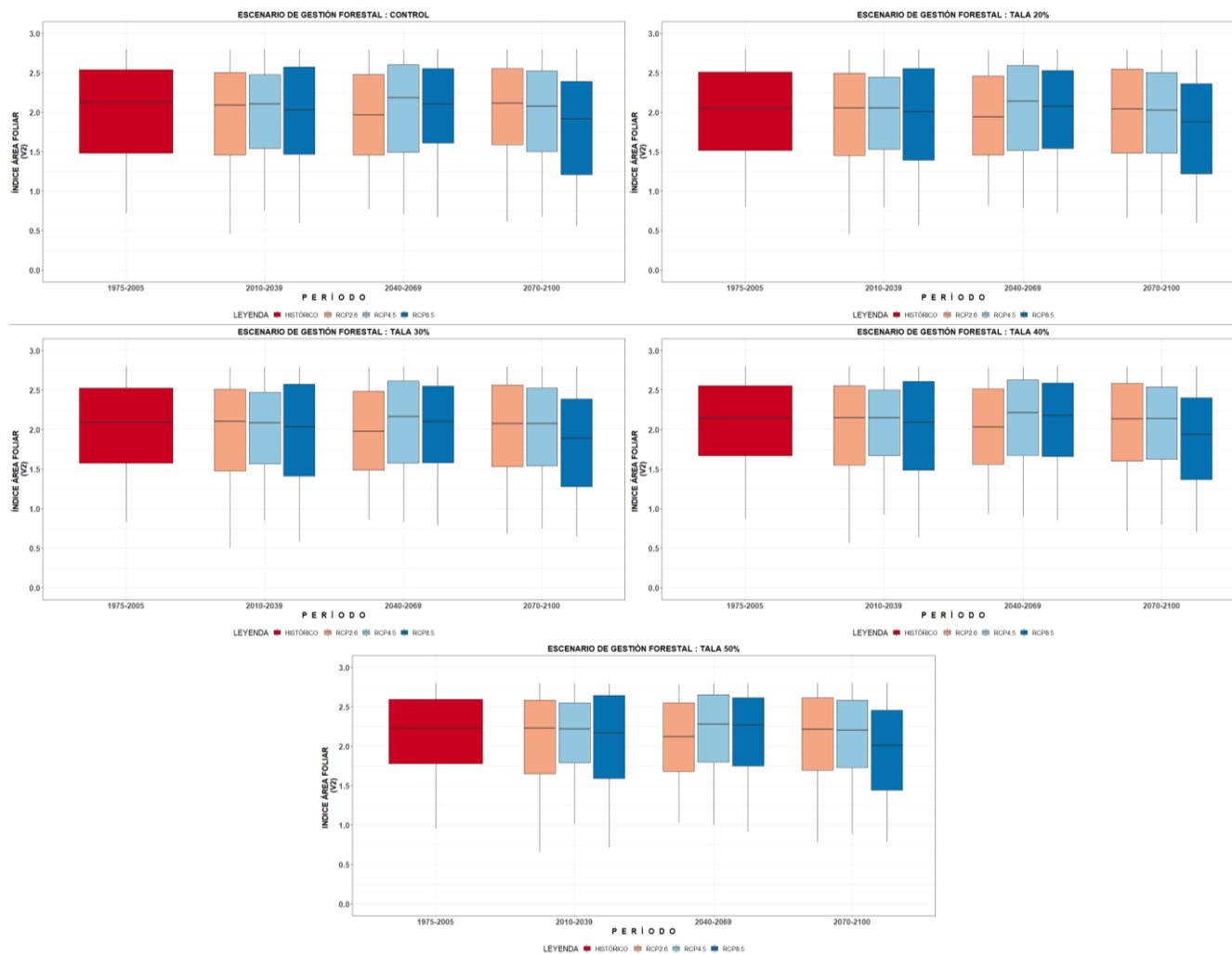
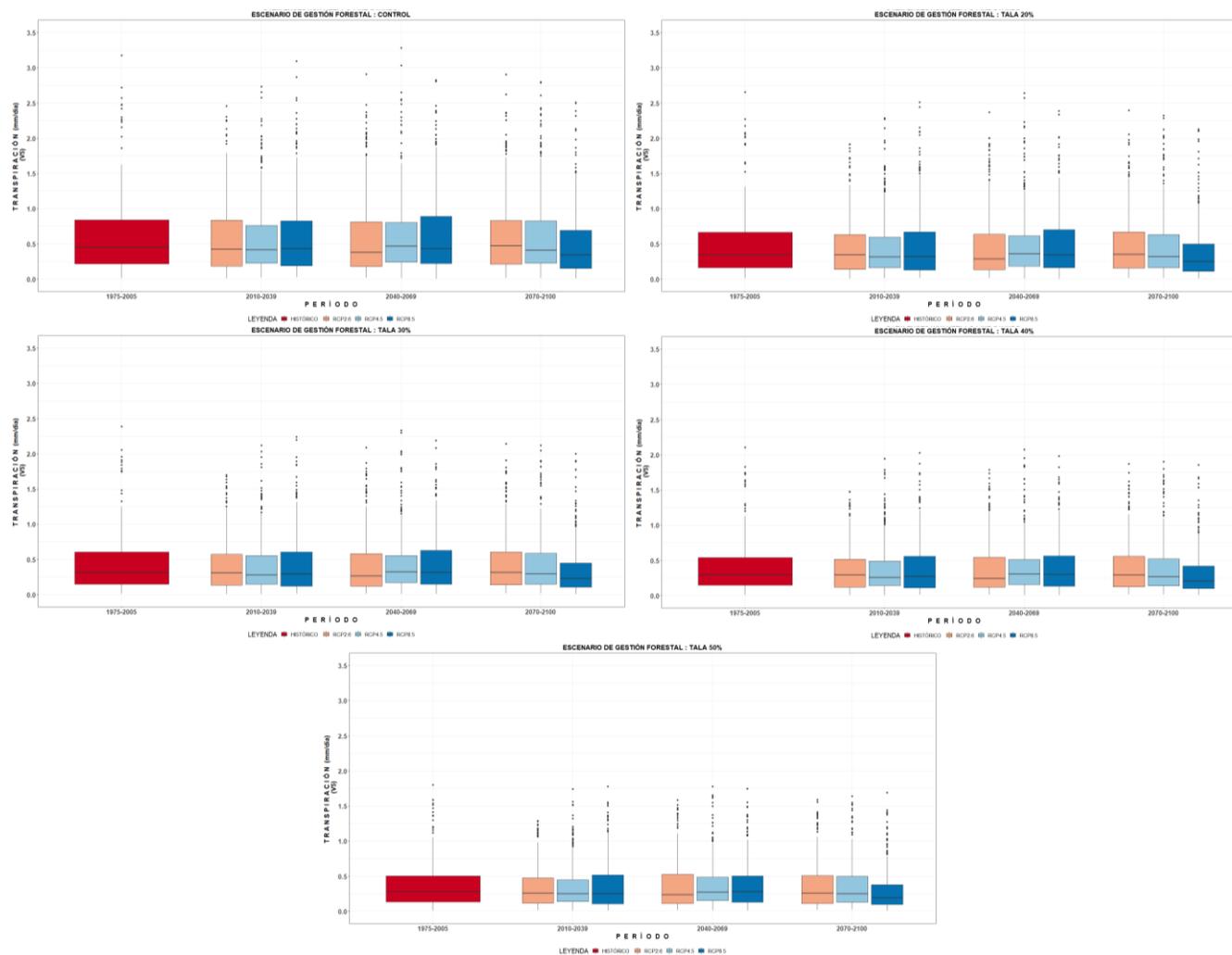


Figura 128. Cambios el índice de área foliar ( $m^2/m^2$ ) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.



**Figura 129.** Cambios en el índice de área foliar ( $m^2/m^2$ ) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.



**Figura 130. Cambios en la transpiración (mm/d) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados**

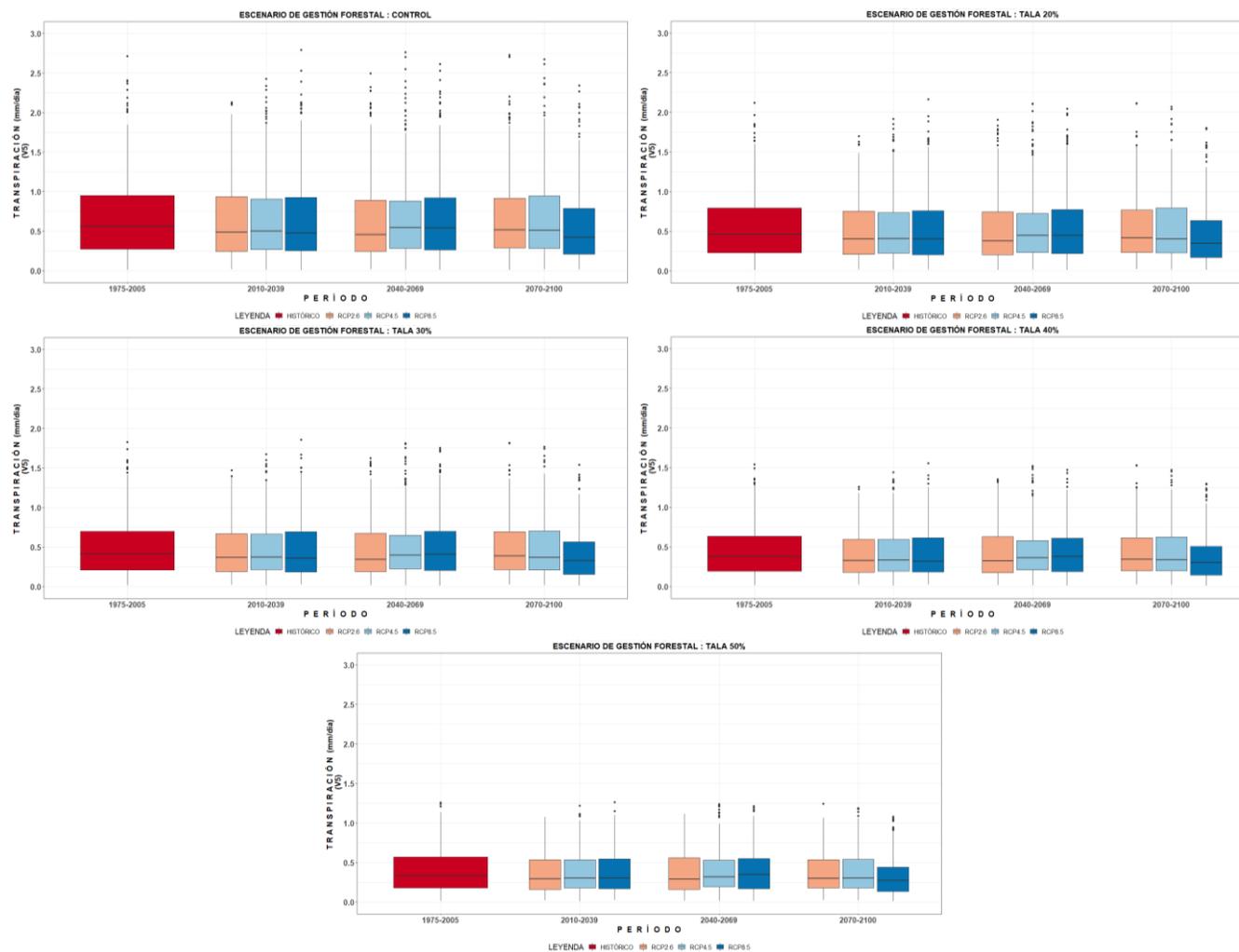
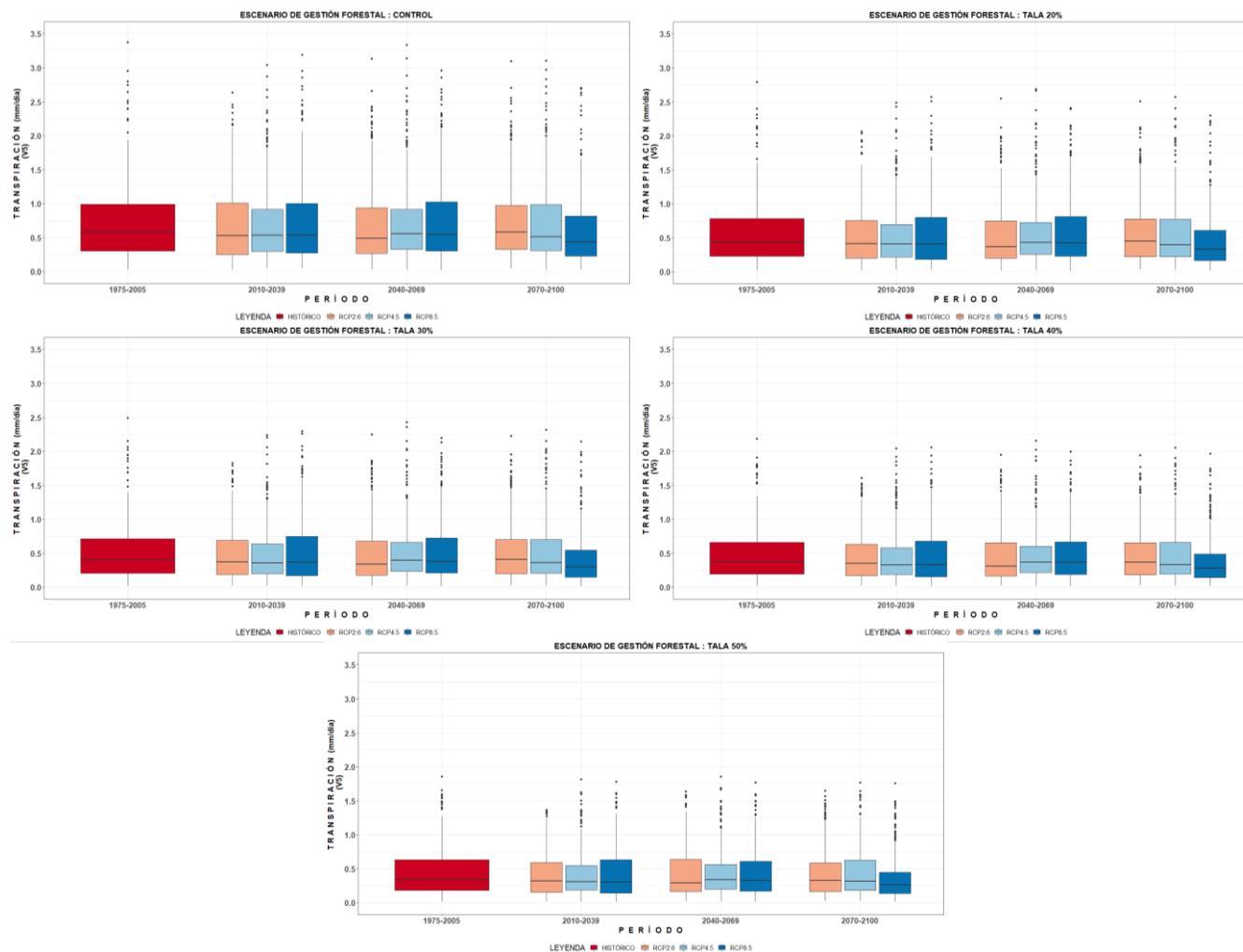


Figura 131. Cambios en la transpiración (mm/d) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.



**Figura 132.** Cambios en la transpiración (mm/d) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados

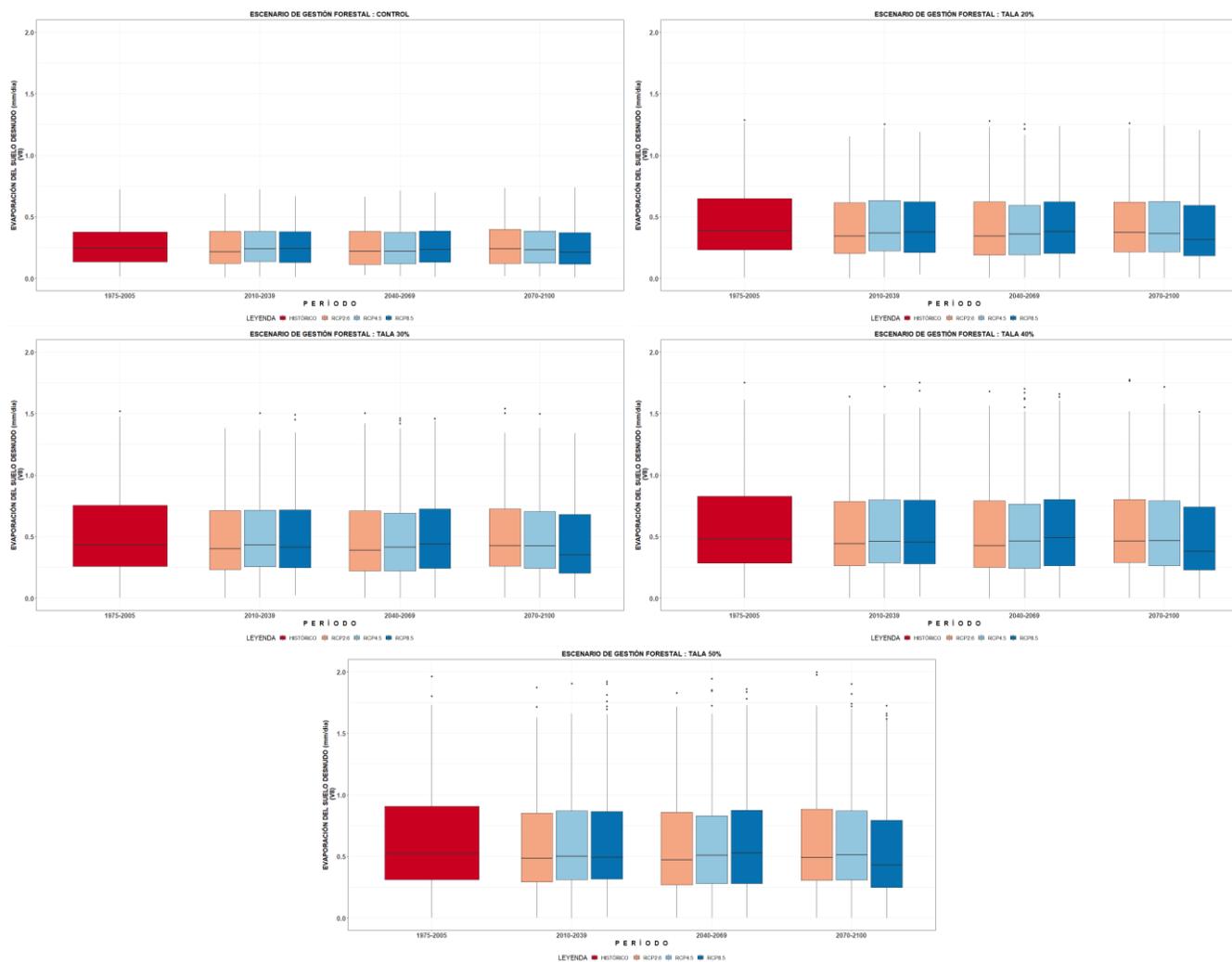


Figura 133. Cambios en la evaporación desde el suelo desnudo (mm/d) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizado a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.

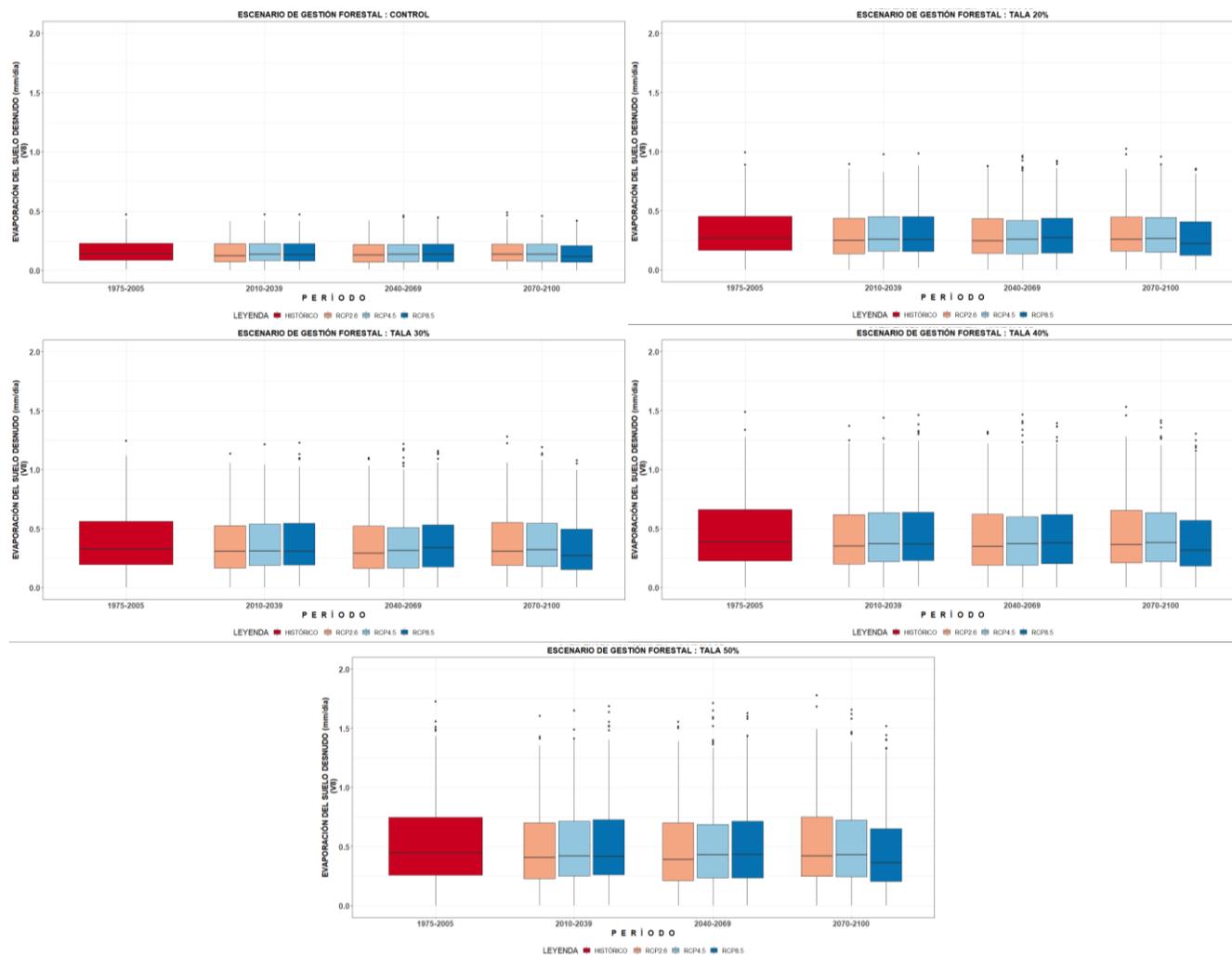


Figura 134. Cambios en la evaporación desde el suelo desnudo (mm/d) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.

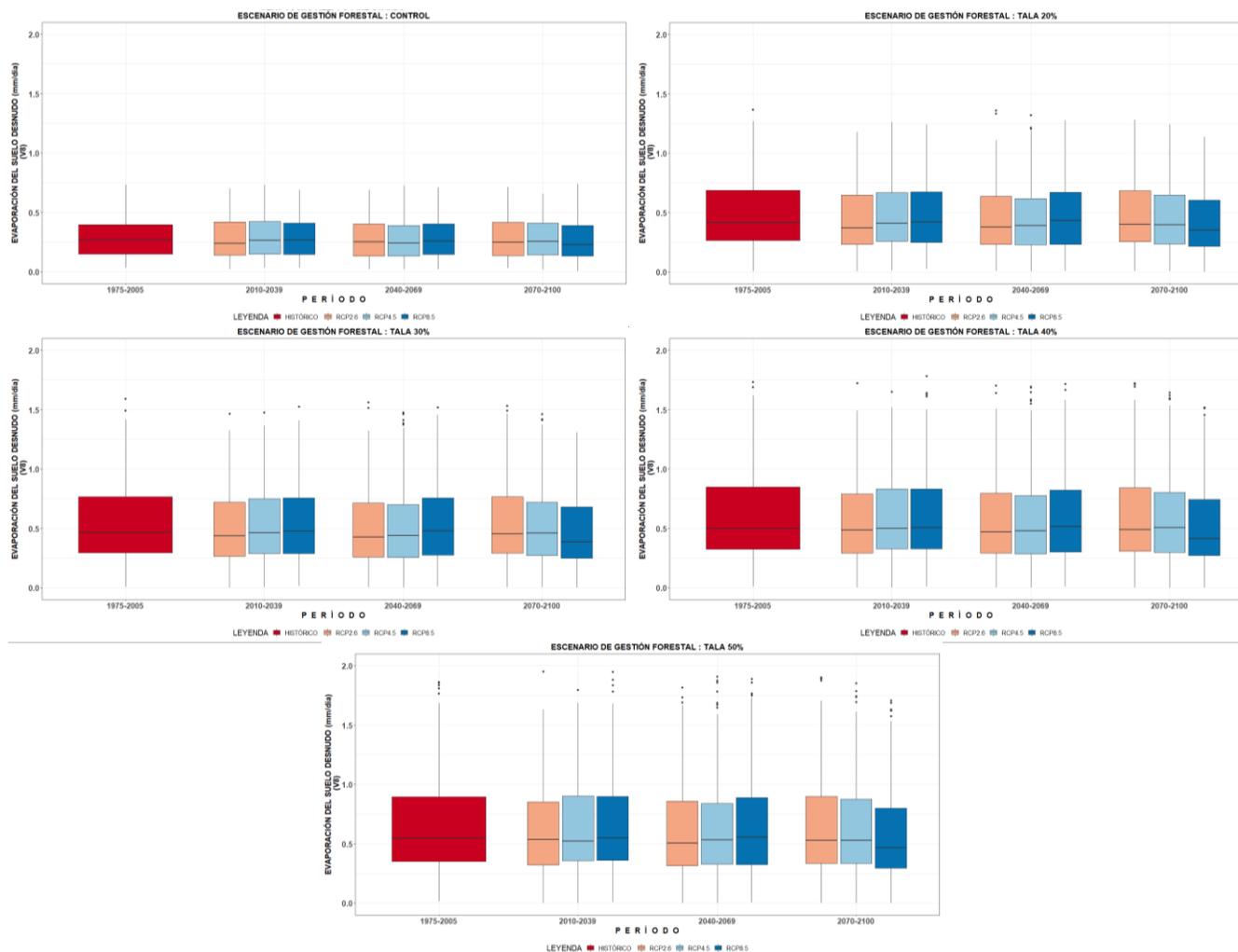
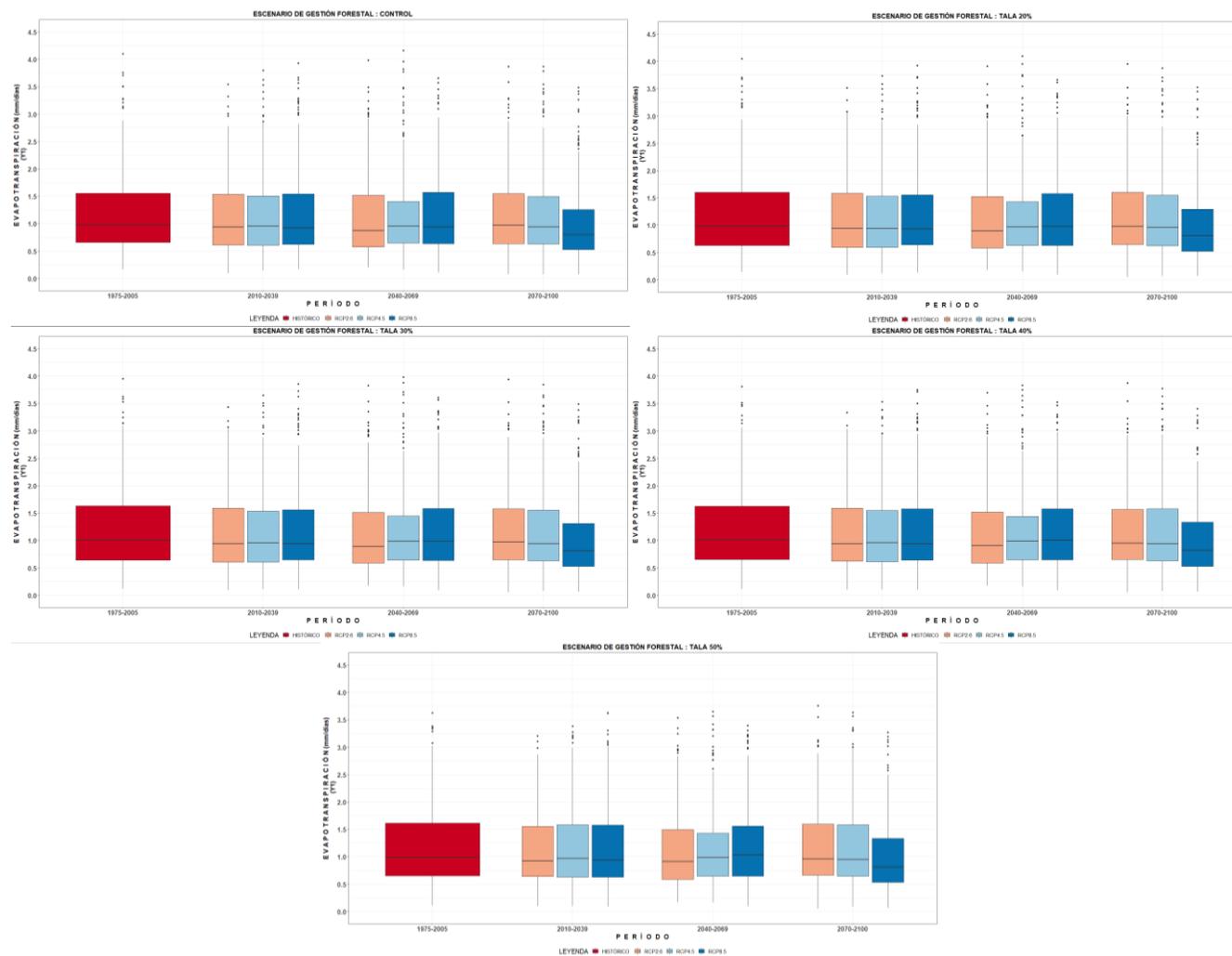


Figura 135. Cambios en la evaporación desde el suelo desnudo (mm/d) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo que los tres periodos futuros seleccionados.



**Figura 136.** Cambios en la evapotranspiración (mm/d) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.

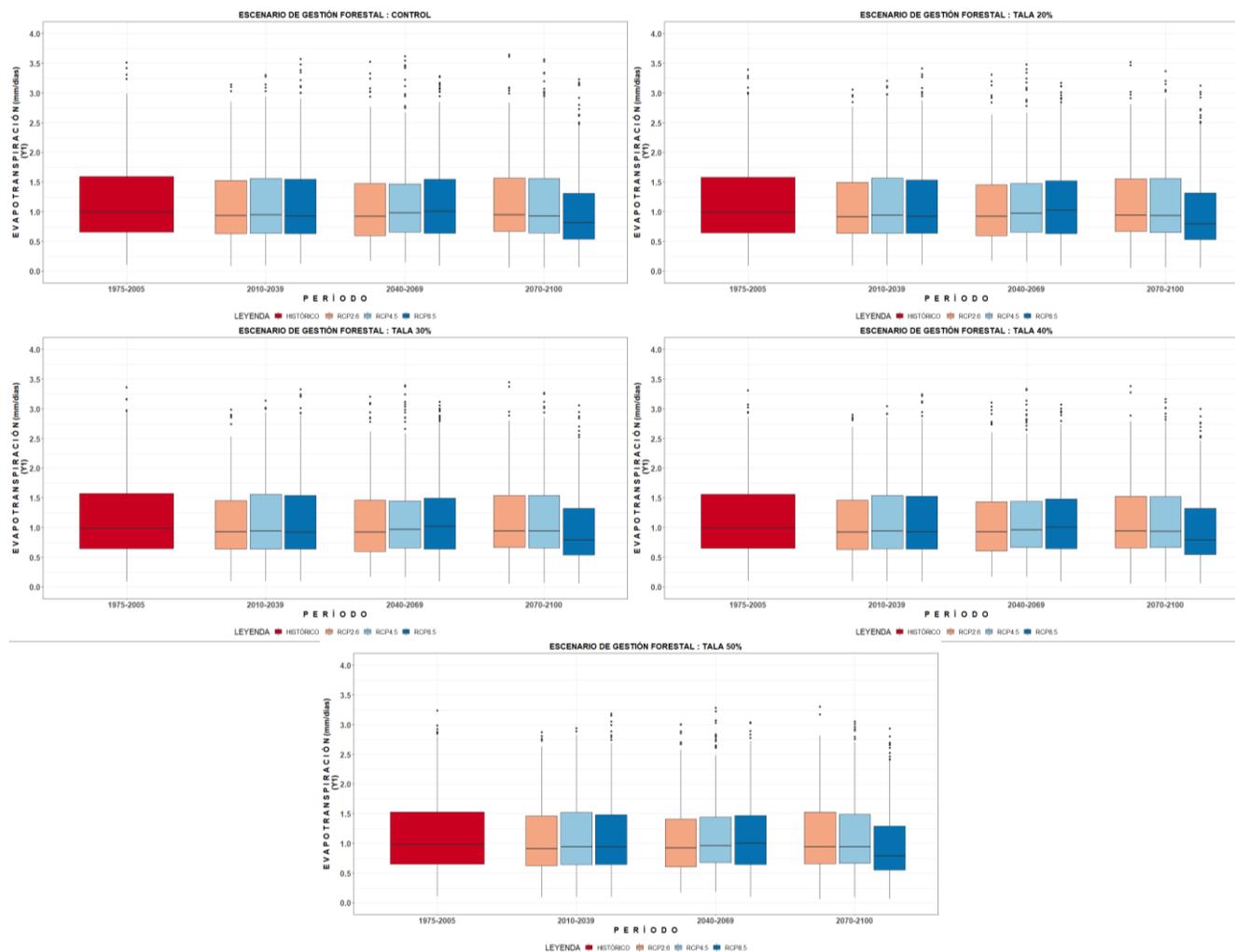
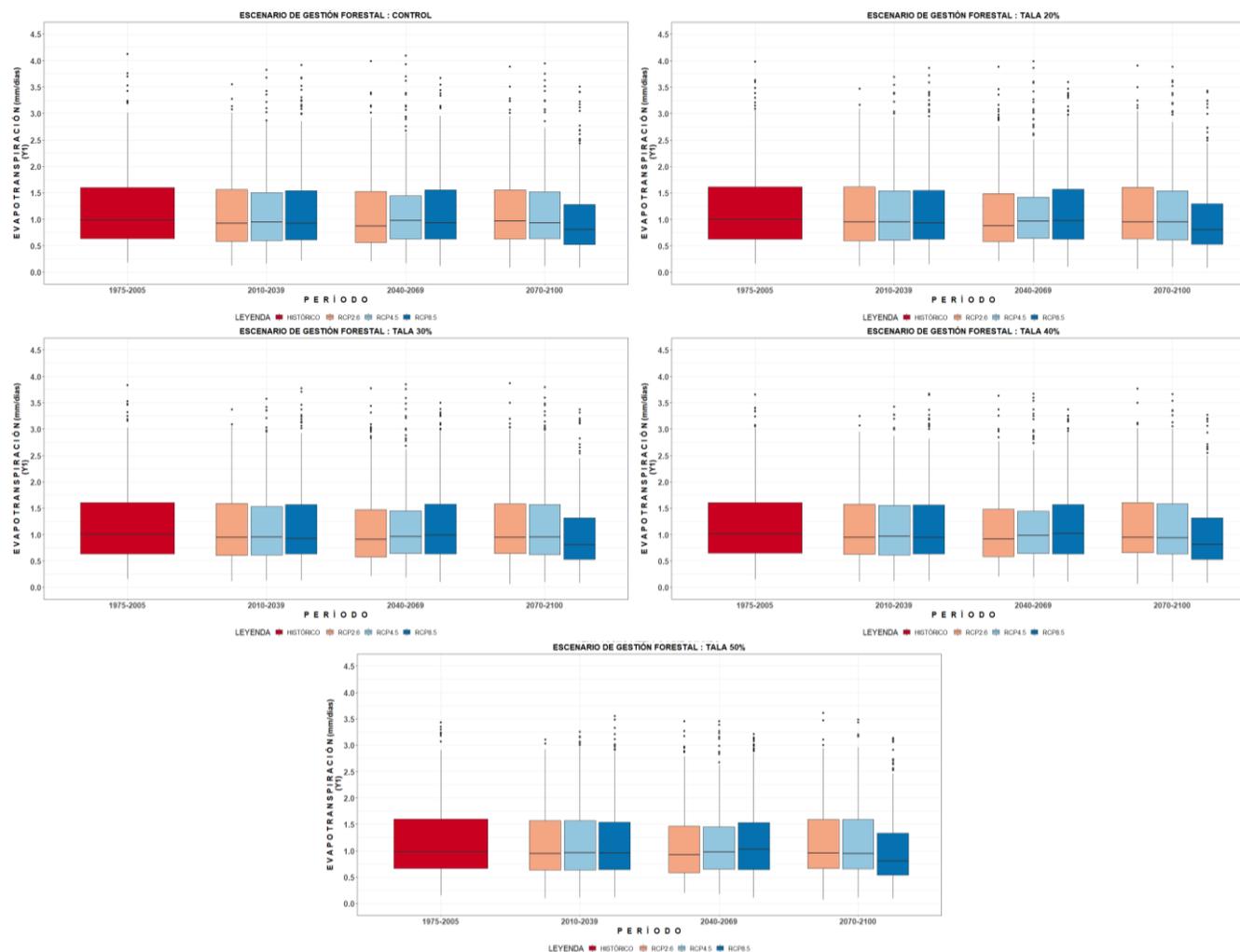


Figura 137. Cambios en la evapotranspiración (mm/d) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.



**Figura 138.** Cambios en la evapotranspiración (mm/d) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.

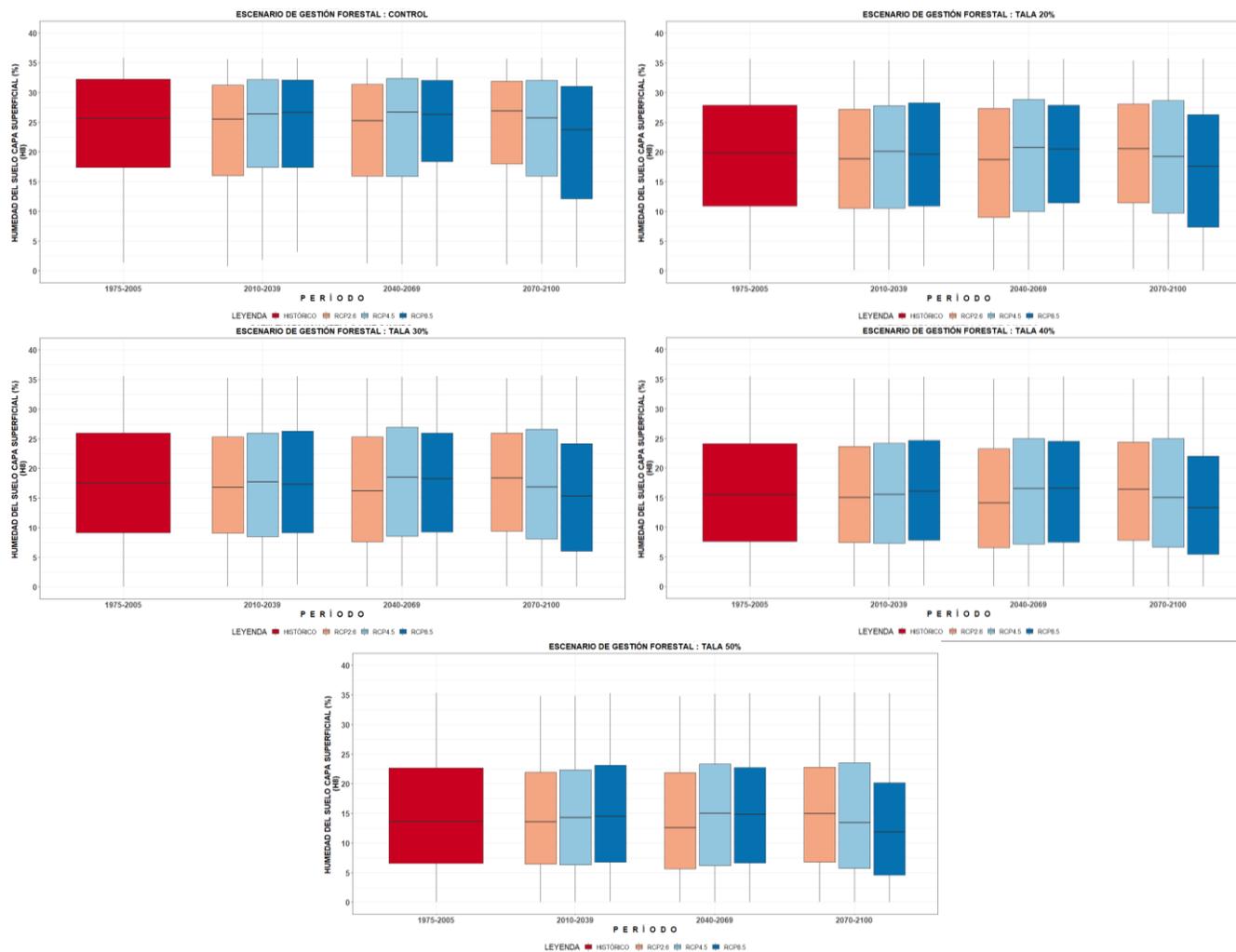
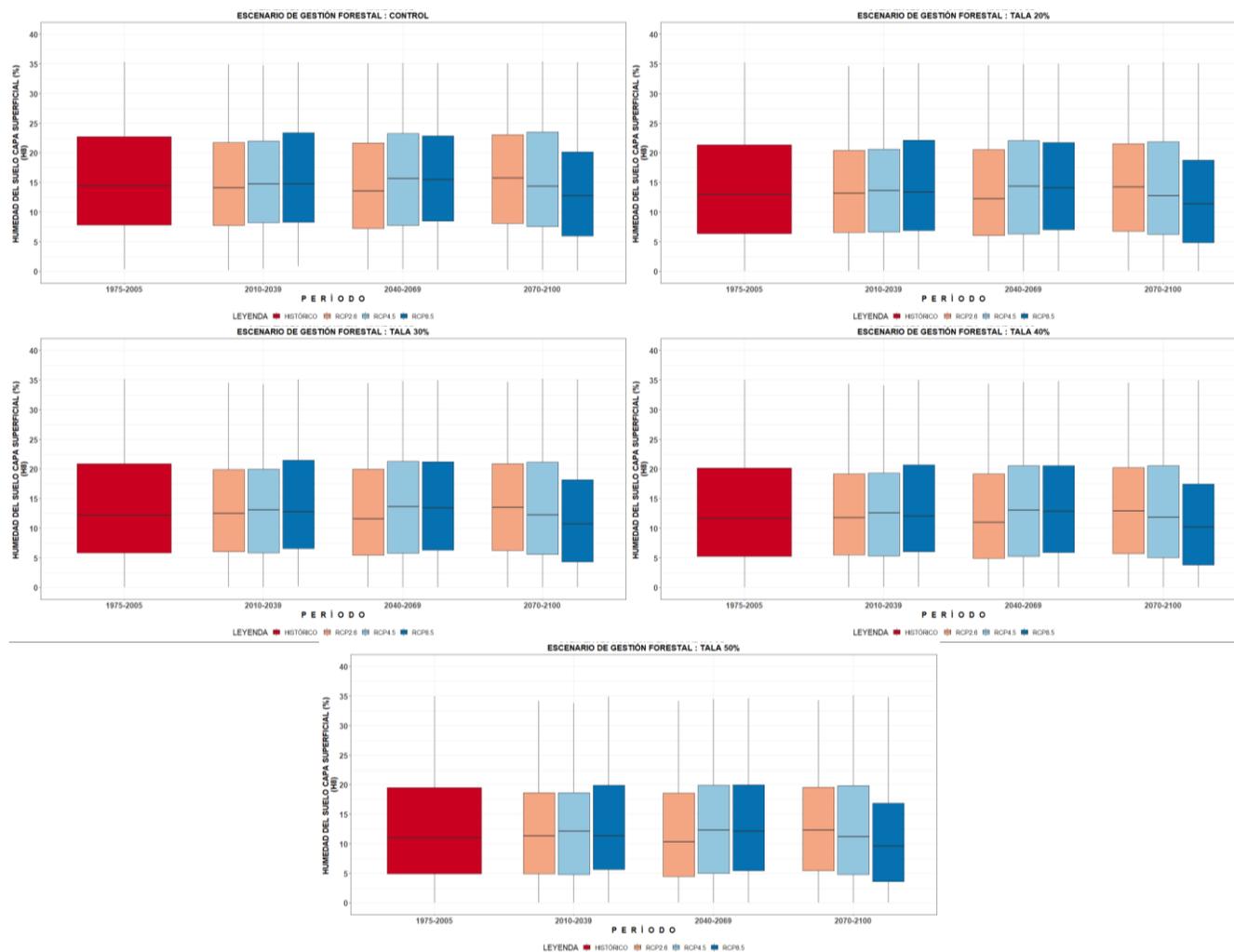


Figura 139. Cambios en la humedad del suelo en la capa superficial (%) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.



**Figura 140.** Cambios en la humedad del suelo en la capa superficial (%) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.

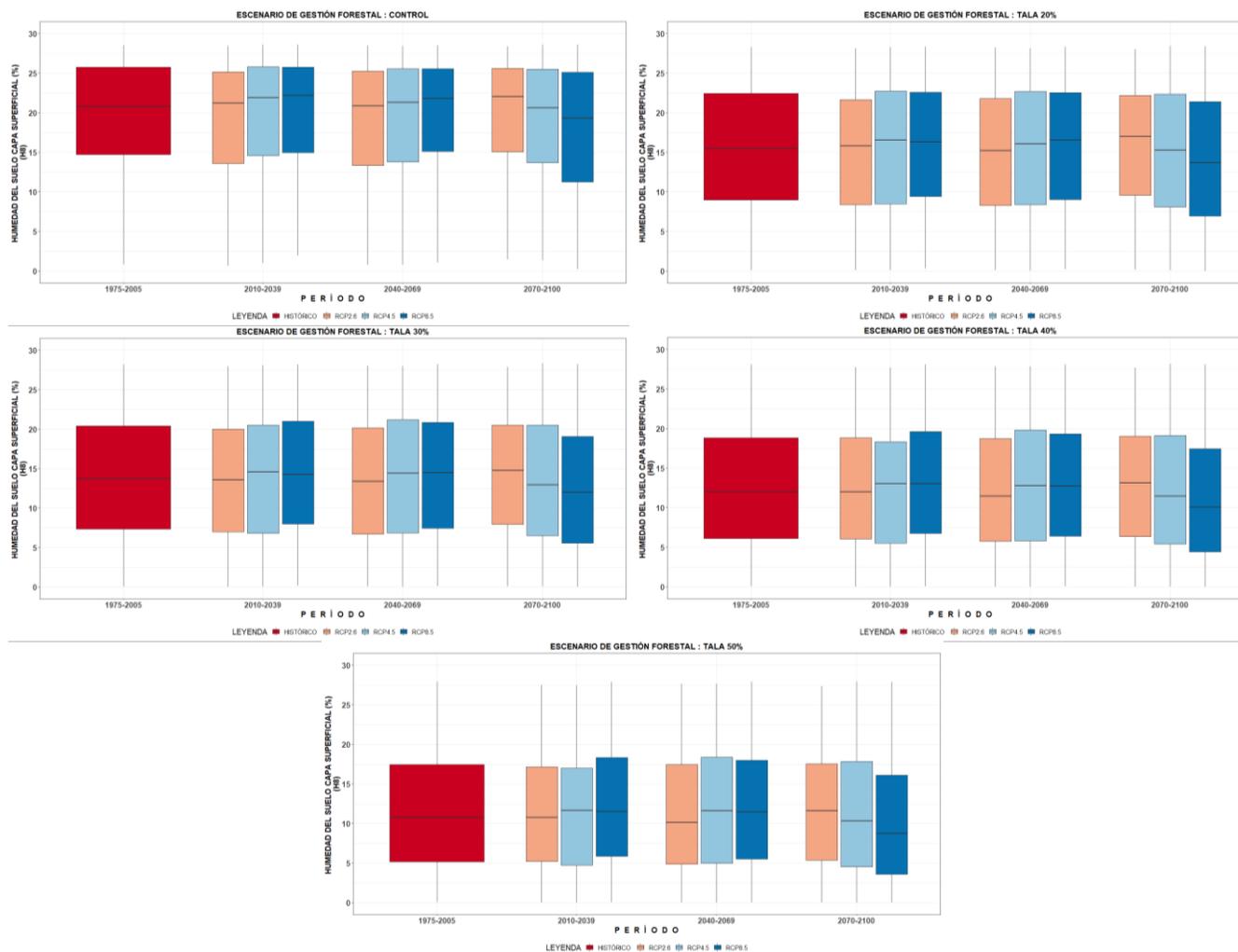


Figura 141. Cambios en la humedad del suelo en la capa superficial (%) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.

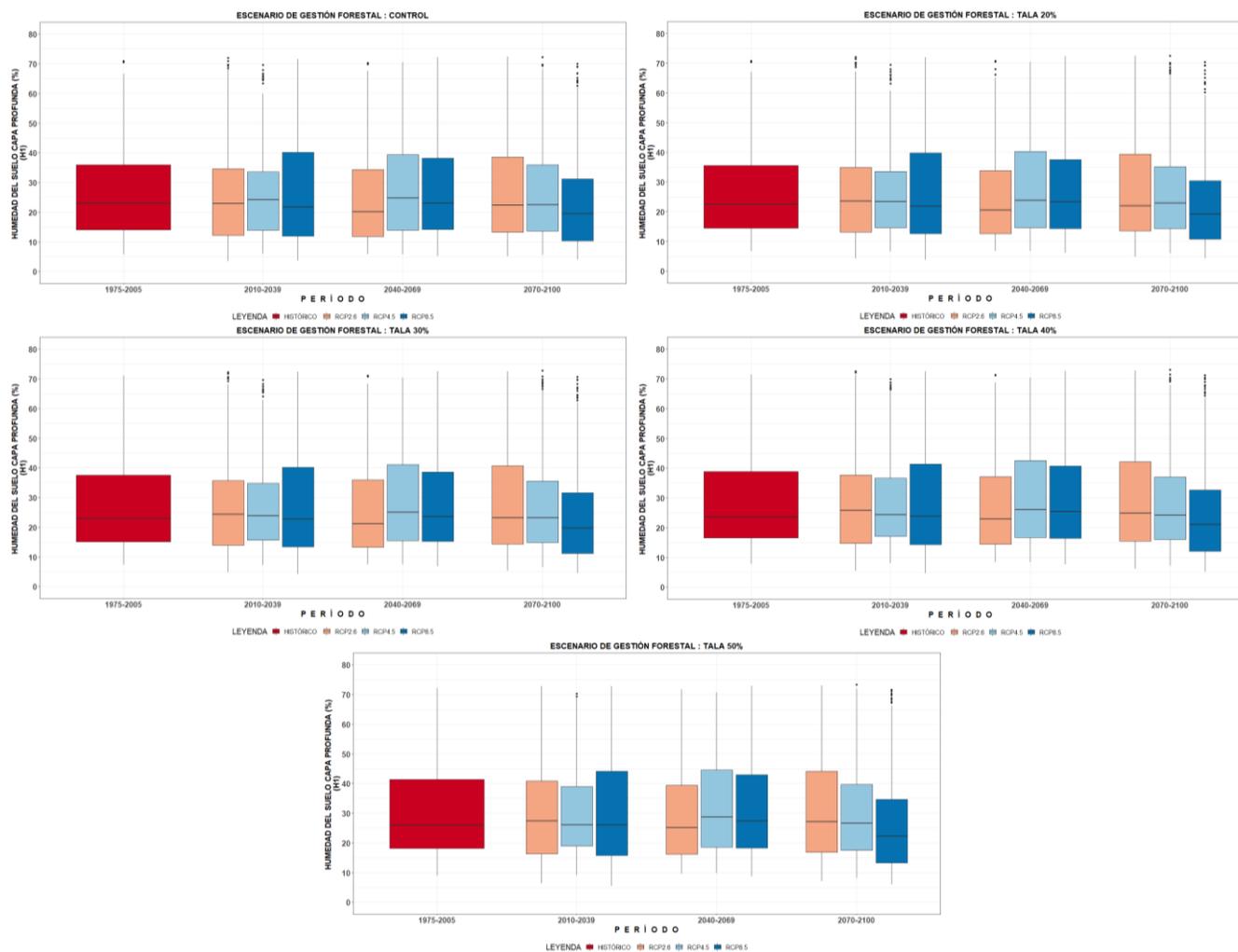
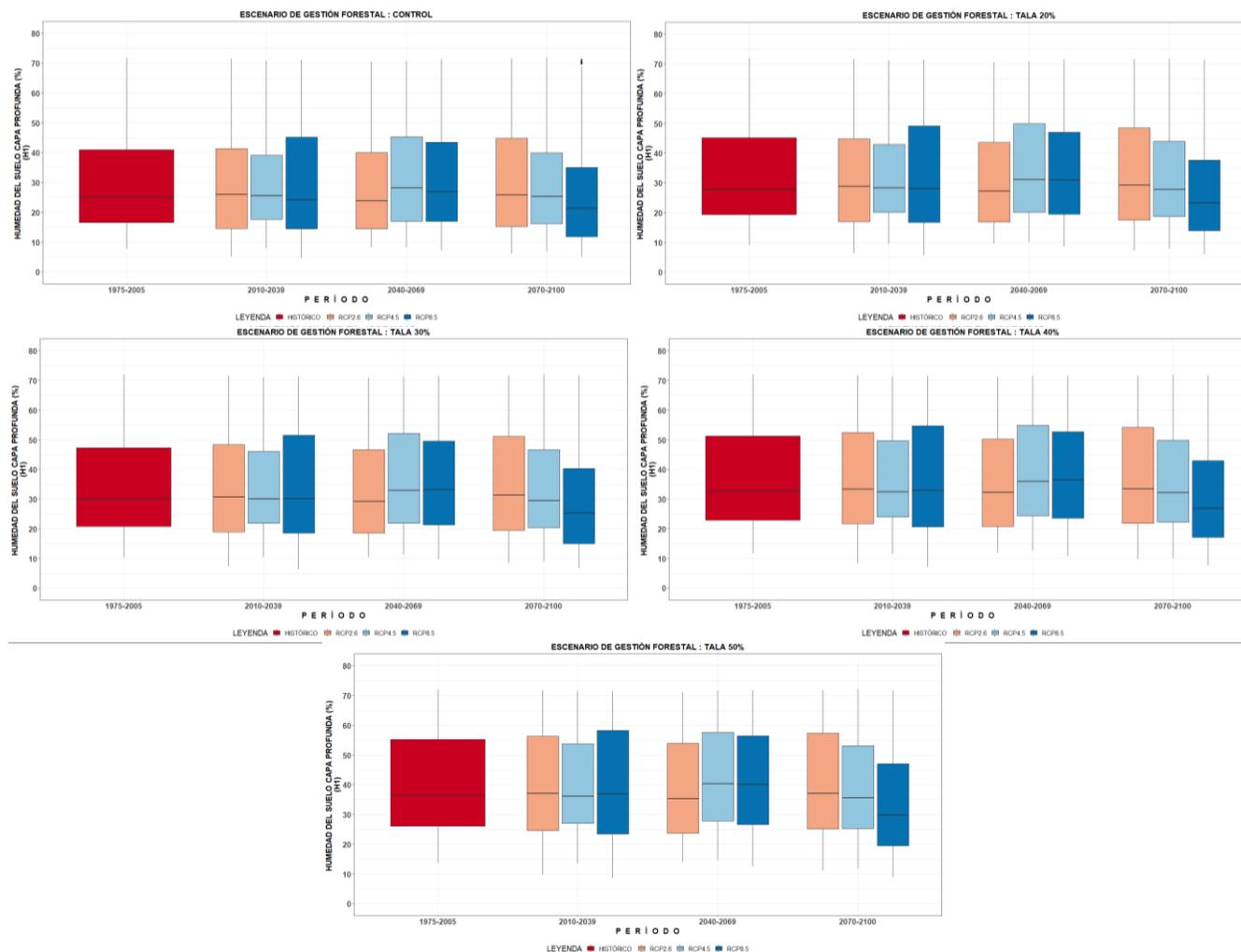
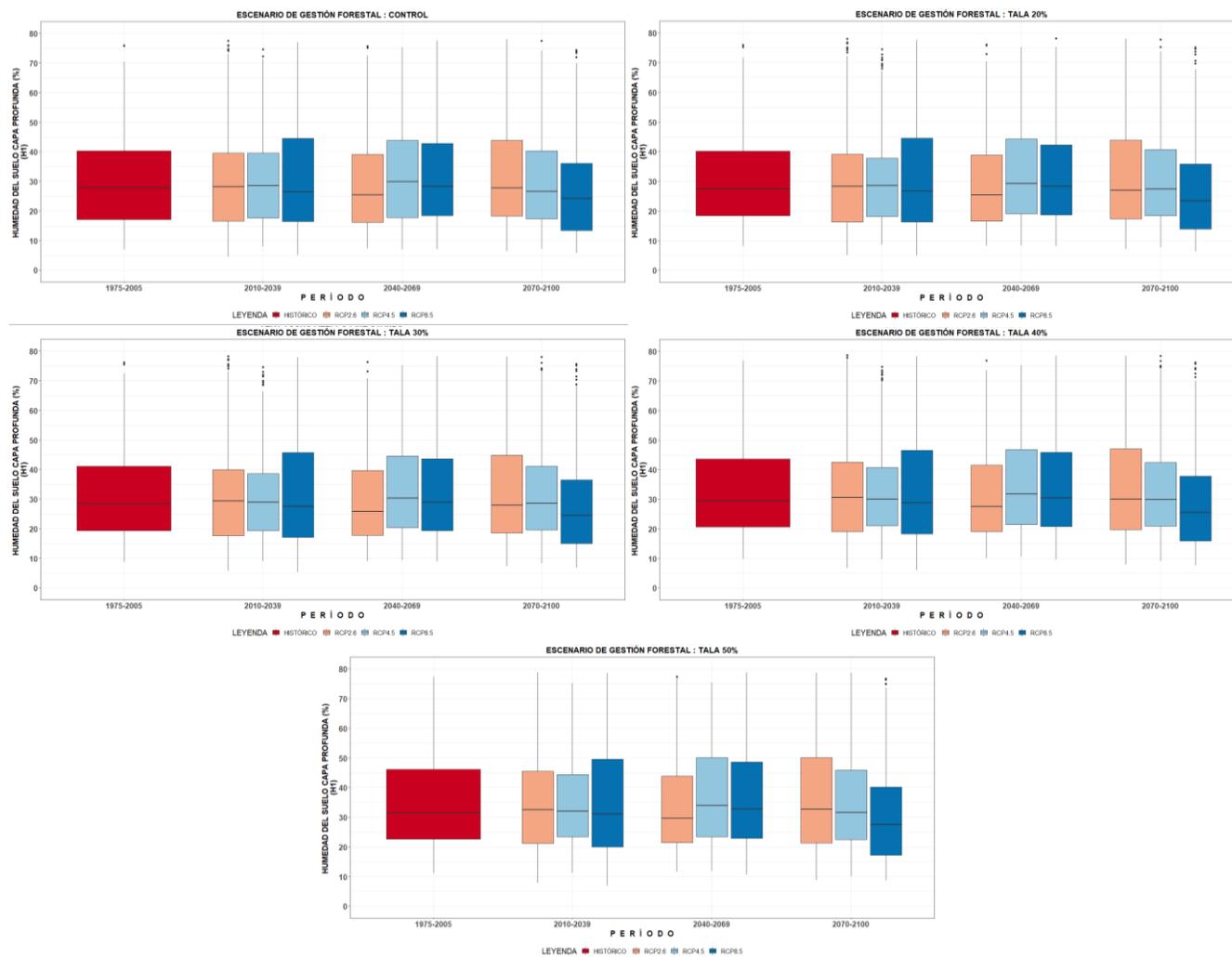


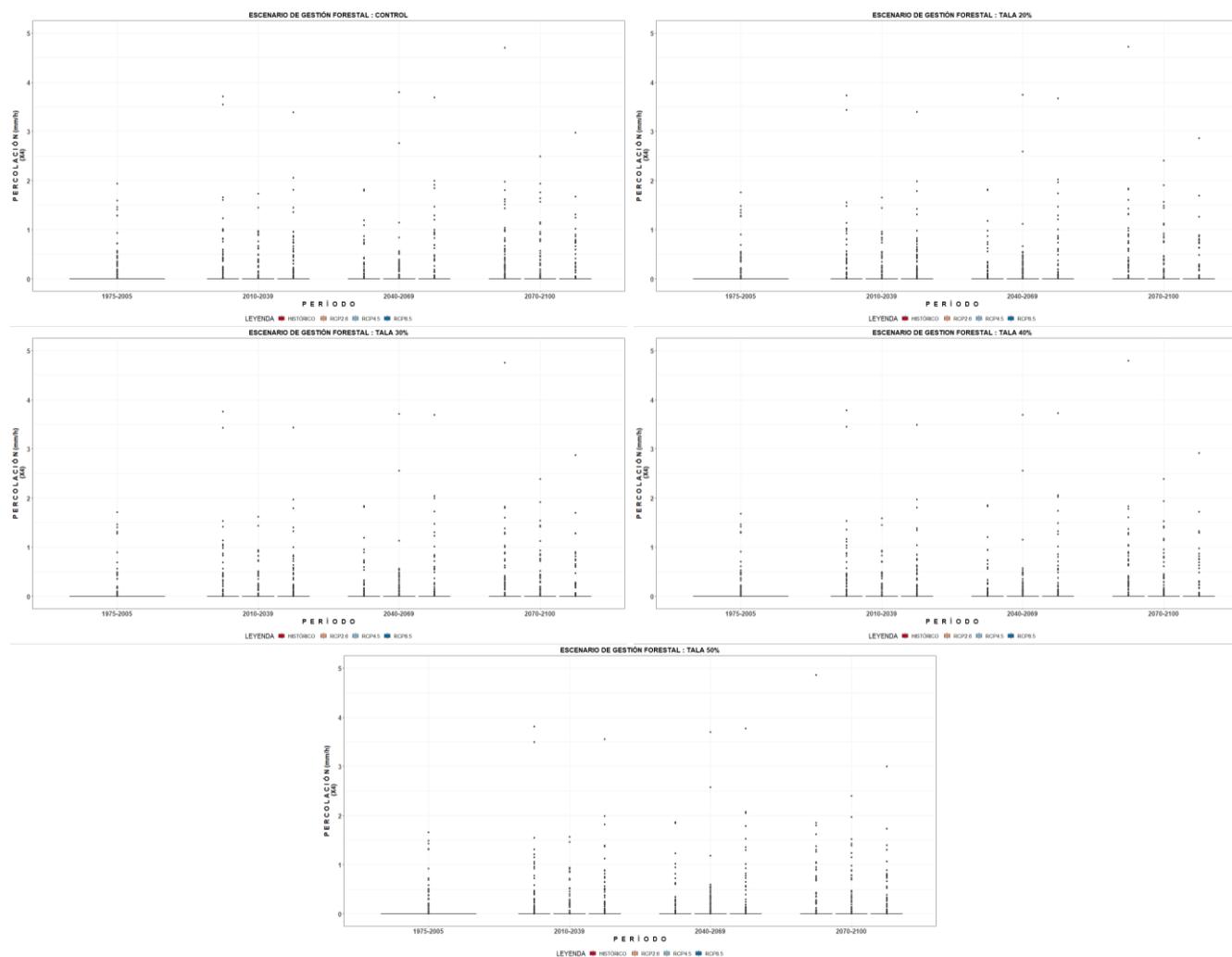
Figura 142. Cambios en la humedad del suelo en la capa profunda (%) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizado a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.



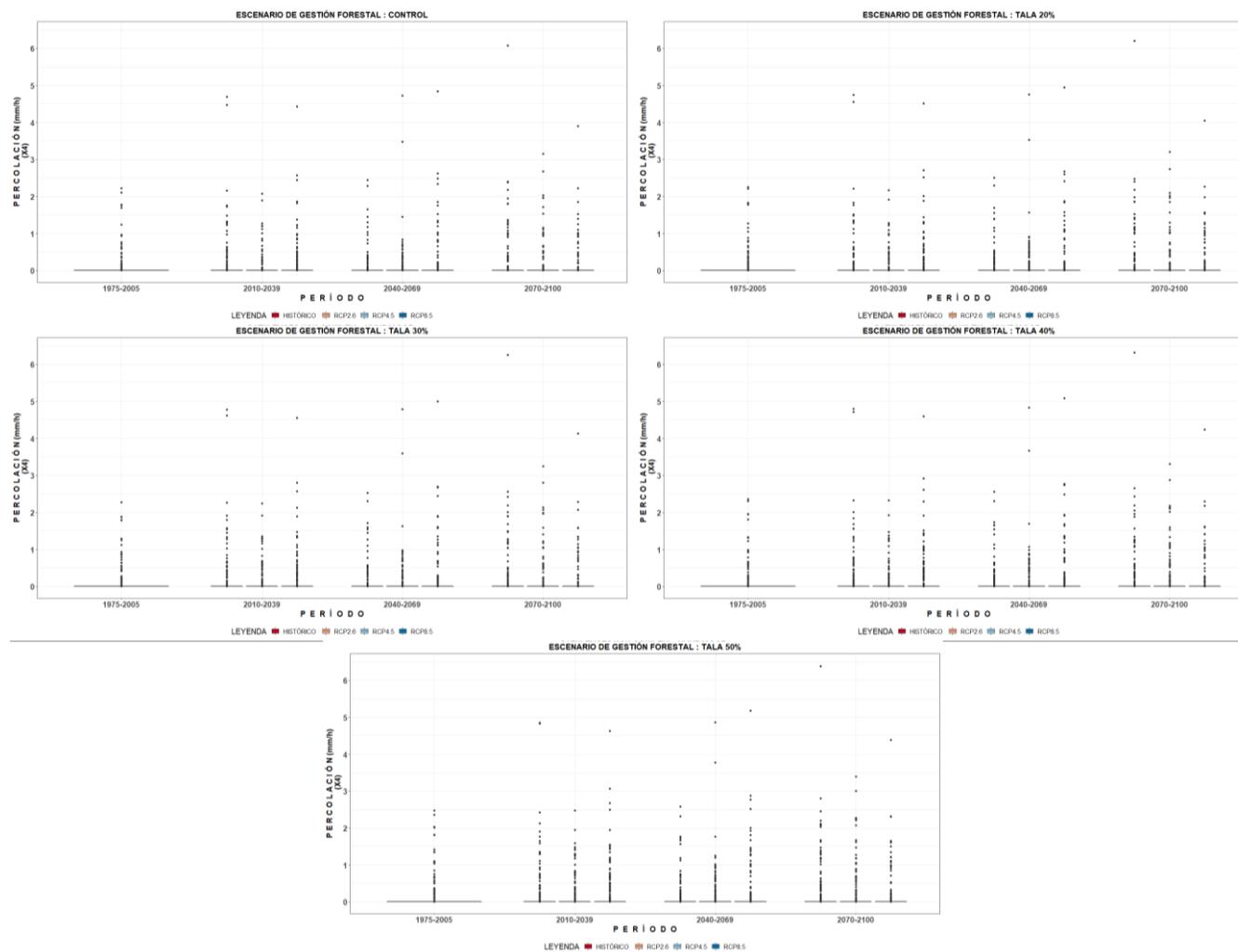
**Figura 143.** Cambios en la humedad del suelo en la capa profunda (%) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.



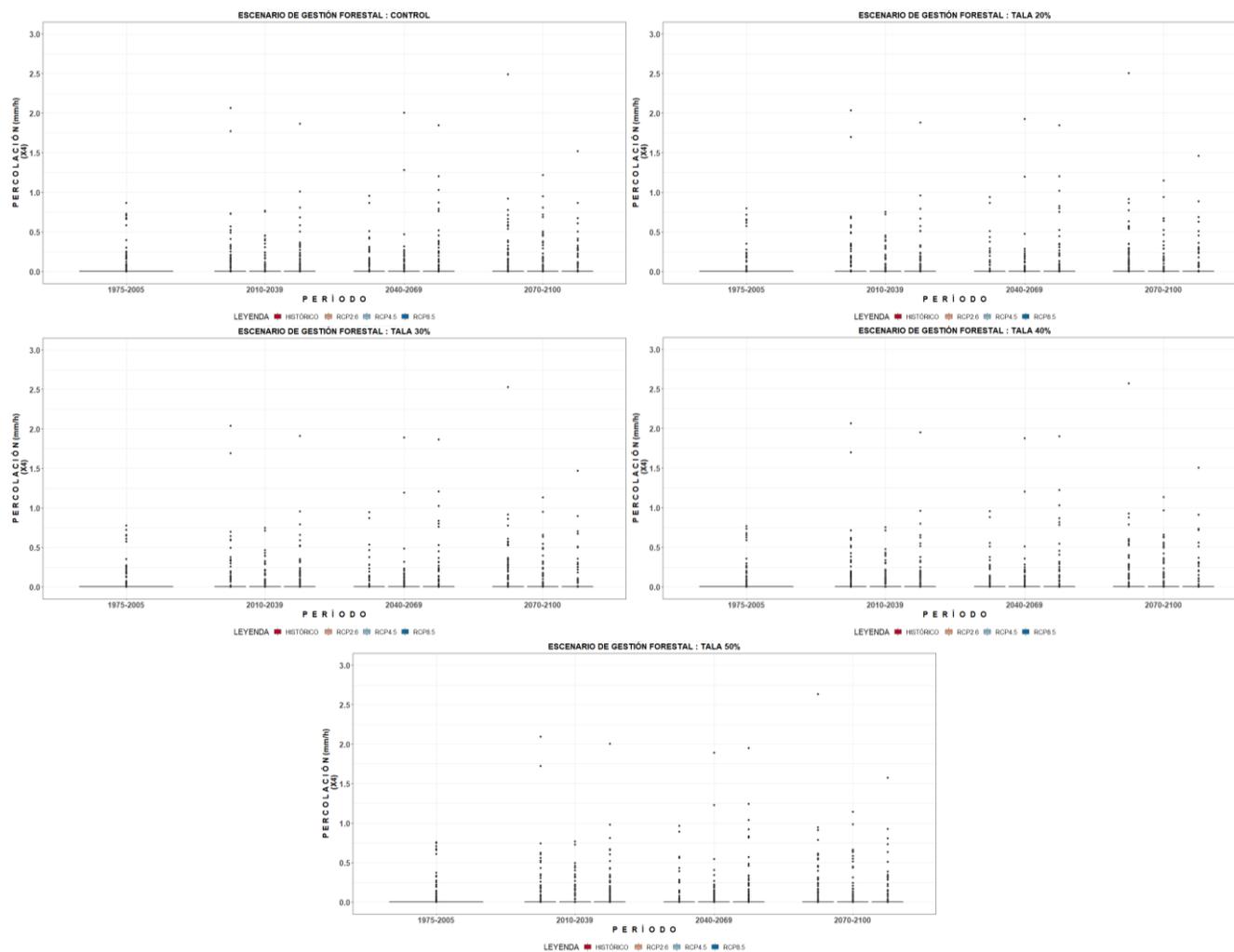
**Figura 144.** Cambios en la humedad del suelo en la capa profunda (%) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.



**Figura 145. Cambios en la percolación (mm/h) en la zona 2 – Rodales de exclusión de pies de pino carrasco, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.**



**Figura 146. Cambios en la percolación (mm/h) en la zona 3 – Rodales de exclusión de pies de coníferas + frondosas, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.**



**Figura 147. Cambios en la percolación (mm/h) en la zona 4 – Rodales de pinos carrasco muy jóvenes, en función del escenario de gestión forestal analizado para el periodo histórico de referencia y los diferentes escenarios de cambio climático analizados a lo largo de los tres periodos futuros seleccionados.**

---

## **CAPITULO 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

## 9.1. CONCLUSIONES

Para la implementación del modelo ecohidrológico **TETIS se ha elegido los factores correctores y parámetros de vegetación efectiva encontrados en la calibración espacio - temporal multiobjetivo** (variables de estado: caudal y la humedad del suelo). Debido a que esta calibración representa adecuadamente el comportamiento de los caudales y dinámica de la vegetación en la cuenca. En el proceso de implementación del modelo se analizaron 4 configuraciones de calibración diferentes. En la primera configuración (es decir, la alternativa monobjetivo temporal) se logró representar adecuadamente los caudales observados siendo el NSE en su etapa de calibración y validación 0.9417 y 0.6215 respectivamente. En la segunda configuración (es decir, la alternativa multiobjetivo temporal, en la que se utilizaron NSE (Q) y VE (Q) como parte de las funciones objetivas) se logró representar más eficientemente los caudales medios y bajos del río. Sin embargo, el caudal máximo fue ligeramente subestimado por el modelo. En la tercera configuración (la alternativa monobjetivo espacio – temporal, basada en calibrar el SM y LAI) se consiguió representar aceptablemente el SM y LAI en la cuenca, siendo el STE (SM) en calibración y validación 0.6123 y 0.5524 respectivamente. Asimismo, el STE (LAI) en la etapa de calibración y validación fue de 0.4824 y 0.3128, respectivamente. Finalmente, la cuarta configuración (la alternativa multiobjetivo espacio - temporal) optimizó el modelo para las siguientes combinaciones: caudal - humedad del suelo, caudal – índice de área foliar y humedad del suelo – índice de área foliar. De todas estas combinaciones **la que se consideró más representativa y la que presento mejor eficiencia fue la combinación caudal – humedad del suelo**. Siendo el índice de NSE para la etapa de calibración y validación igual a 0.8331 y 0.7125 respectivamente. Asimismo, el STE (LAI) en la etapa de calibración y validación fue de 0.4525 y 0.3965 respectivamente.

En general, **los escenarios de gestión forestal más intensos incrementan el índice de área foliar** debido al proceso de recuperación de la vegetación, ocasionando un **incremento de la biomasa foliar** y por ende un aumento del LAI. Análogo a lo anterior, la **humedad en la capa profunda de suelo y la evaporación directa aumentan** a medida que intensificamos la tala. En contraste, se produce un **descenso de la transpiración y humedad en la capa superficial de suelo**, manteniendo el **balance de la evapotranspiración sin apenas cambios**. Por tal motivo, **la evapotranspiración no debe considerarse como indicador de impacto en la gestión forestal**.

Existen **diferencias en el comportamiento de los diferentes usos del suelo ante escenarios de gestión forestal homólogos**. Los resultados evidenciaron también **diferencias entre los escenarios de cambio climático en las diferentes ventanas temporales** analizadas dentro de cada una de las alternativas de gestión analizadas.

- Por ejemplo, la combinación de coníferas con frondosas (zona 3) muestra una respuesta más suavizada a los impactos del cambio climático, indicando que una **mayor diversidad de especies forestales no solo es deseable desde un punto de vista ecológico, si no también desde la perspectiva hidrológica**.

- En los 4 usos de suelo analizados, la combinación de cambio climático y gestión forestal muestra que **el LAI tendrá una tendencia a incrementarse a medida que aumentemos la gestión forestal en términos de tala. Los efectos del cambio climático modifican claramente las tendencias presentando diferentes resultados en función del escenario analizado.** En el caso del escenario optimista (RCP 2.6), el valor promedio del LAI tiende a disminuir a mitad del centenario. En el escenario de estabilización (RCP 4.5) el LAI tendrá una ligera tendencia ascendente hasta finales del 2069 luego su valor medio y dispersión se mantendrán casi invariables hasta finales del centenario. En el Escenario pesimista (RCP 8.5), el valor del LAI tendrá una tendencia constante hasta un futuro a medio plazo, luego el valor tiende a descender hasta finales del centenario.
- En el caso de La **transpiración** esta tendrá **una tendencia a decrecer a medida que aumentemos el escenario de gestión forestal.** Asimismo, en el escenario optimista (RCP 2.6) y de estabilización (RCP 4.5) la transpiración tendrá un comportamiento estable tanto en sus medias como en la dispersión de sus datos. **En el escenario pesimista (RCP 8.5) la transpiración también tendrá un comportamiento estable hasta finales del 2069, luego sus valores disminuirán hasta finales del centenario.**
- La **evaporación de suelo desnudo** presentó **una tendencia a aumentar a medida que aumentáramos el escenario de gestión forestal.** En el escenario optimista (RCP 2.6) y de estabilización (RCP 4.5) la transpiración tendrá un comportamiento estable hasta finales del centenario tanto en sus medias como en la dispersión de sus datos. En el escenario pesimista (RCP 8.5)
- La **humedad del suelo en la capa superficial (HSCS)** tendrá **una tendencia a disminuir a medida que aumentemos el escenario de gestión forestal.** Asimismo, **en el escenario optimista (RCP 2.6)** el valor promedio del HSCS disminuiría a media que nos aproximásemos a un futuro de mediano plazo; sin embargo, en el periodo 2070 – 2100 **recuperaría sus tendencias actuales** conteniendo valores ligeramente superiores al valor medio del periodo de control. El escenario de estabilización (RCP 4.5) la HSCS presenta un comportamiento ligeramente ascendente hasta finales del 2069 luego desciende hasta finales del centenario. En **el escenario pesimista (RCP 8.5)**, el valor de la HSCS muestra una tendencia constante hasta un futuro a medio plazo, luego el valor medio **tiende a descender por debajo de la media histórica, hasta finales del centenario.**
- El análisis de la **humedad del suelo en la capa profunda (HSCP)** **mostró una tendencia creciente a medida que se intensificaba el escenario de gestión forestal.** Por contra, en el escenario optimista (RCP 2.6) el valor promedio del HSCP disminuye a media que nos aproximamos a un futuro de mediano plazo; sin embargo, en el periodo 2070 – 2100 la HSCP se incrementará conteniendo valores ligeramente superiores al valor medio del periodo de control. En el escenario de estabilización (RCP 4.5) la HSCP tendrá un comportamiento ligeramente ascendente hasta finales del 2069 luego desciende hasta finales del centenario. En el escenario

pesimista (RCP 8.5), el valor de la HSCP tiene una tendencia descendente hasta finales del centenario. En consecuencia, **podemos esperar que la disponibilidad hídrica para la vegetación se vea reducida de manera más intensa cuanto más pesimista sea el escenario de cambio climático.**

- La **percolación presenta una tendencia creciente a medida que aumenta la superficie talada y la magnitud de sus valores extremos se incrementará en los diferentes escenarios de cambio climático.**

Mediante este trabajo ha quedado nuevamente y más ampliamente demostrado lo que ya avanzaban Sanchís *et al* (2019). Por una parte, que el modelo TETIS es una herramienta ideal para el análisis de las variables ecohidrológicas ante diferentes alternativas de gestión y en un marco de clima futuro cambiante. En segundo lugar, que la gestión forestal produce otros beneficios además de la disponibilidad de agua, lo cual tiene una importancia destacable en clima semiárido como es el caso de la cuenca del Carraixet; también incrementan el LAI como consecuencia de un incremento de la biomasa vegetal.

## 9.2. RECOMENDACIONES

- Es recomendable, estimar los mapas de parámetros del modelo ecohidrológico TETIS con información lo más precisa posible para evitar la sobrestimación de los factores correctores.
- En la presente tesina se utilizó el **STE** para medir el rendimiento de espacio - temporal de la información de satélite. Sin embargo, se propone evaluar otros indicadores con el fin de mejorar la calibración del modelo ecohidrológico TETIS.
- Aunque los resultados de calibración y validación del modelo han mejorado las implementaciones realizadas hasta el momento, se recomienda seguir considerando a la cuenca del Carraixet en futuros esfuerzos de implementación y verificar si incorporando varias variables obtenidas por teledetección es posible mejorar la implementación del modelo. En la presente tesina se ha implementado el modelo mediante la optimización con un enfoque multiobjetivo de dos funciones objetivo (FO). Se propone llevar a cabo una optimización utilizando tres funciones objetivo, pudiendo ser algunas combinaciones, entre otras: a) dos FO temporales y una espacio - temporal, b) dos FO espacio - temporales y una temporal, c) tres FO espacio -temporales, d) tres FO temporales.
- Se sugiere realizar adaptaciones al modelo ecohidrológico TETIS para que sea capaz de estimar no solo la biomasa foliar sino la producción de carbono total. Estas mejoras serían muy interesantes desde el punto de vista de la industria maderera y para los gestores responsables en materia de prevención de incendios.

---

## **CAPITULO 10. BIBLIOGRAFÍA**

---

Alarcon, D. (2018). Estudio de aseguramiento del caudal ecológico del río mijares en el tramo del Montanejos (Castellón), por combinación de las descargas de sus manantiales termales y sueltas del embalse de cirat. Tesis de Máster. Universidad Politécnica de Valencia.

Alva, H.D. (2017). Influencia de los cambios históricos del uso del suelo en el régimen hídrico del barranco del Carraixet. Tesis de Máster. Universidad Politécnica de Valencia.

Arora V. (2002). Modeling vegetation as a dynamic component in soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and hydrological models. *Reviews of Geophysics*, 40(2), 1-26, doi:10.1029/2001RG000103

Ballestaros et al. (2007). Comportamiento de los acuíferos ante actuaciones de sequía en los sistemas de explotación Júcar y Turia. Informe final. Instituto Geológico y Minero de España – Confederación hidrográfica del Júcar. Fondo Documental del IGME.

Beven, K., Freer, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *J. Hydrol.* 249, 11–29. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00421-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00421-8)

Bussi, G.(2014).Implementation of a distributed sediment model in different data availability scenarios. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Buendia, J. L. S. (1972). El Barranc del Carraixet. Estudio granulométrico y morfométrico. *Cuadernos de Geografía*, (10), 67–92.

Camarasa, B. (1991). Génesis de crecidas en pequeñas cuencas semiáridas: barranc de Carraixet y Rambla de Poyo. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia.

Campos, A. (1998). Proceso del ciclo hidrológico. Ciudad de México. México: Universitaria Potosina.

Chow, Ven te, David R. Maidment, and Larry W. Mays.(1994). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá. Colombia.

Crooks, S.M. and Naden, P.S.(2007). A semi - distributed rainfall - runoff modelling system. *Hydrology & Earth System Sciences*. 11, 516-531.

Domenico, P. y Schwartz,F. (1998). *Physical and chemical hydrogeology*. New York: John Wiley & Sons Inc.

DIHMA. (2001). Un Modelo de Predicción de Crecidas para el SAIH de la Confederación Hidrográfica del Tajo. Informe Final para UTE SAIH TAJO.

Drusch et al. (2001). Vegetative and Atmospheric Corrections for the Soil Moisture Retrieval from Passive Microwave Remote Sensing Data: Results from the Southern Great Plains Hydrology Experiment 1997. *Journal of Hydrometeorology*, abril 2001 (2):181-192.

Duan, Q., et al. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.* 28, 1015–1031. <https://doi.org/10.1029/91WR02985>

Echevarría, M. (2020). Uso de la humedad del suelo superficial obtenida por satélite para la implementación de un modelo eco-hidrológico distribuido. caso de estudio: cuenca de la rambla de la viuda (España). Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.

Ekhuemelo, D.O., S et al. (2016). Importance of forest and trees In sustaining water supply and Rainfall. *Nigeria Journal of Education, Health and Technology Research (NJEHETR)*. 8, 273-280.

Fang, Z. et al. (2015). Spatio-temporal validation of long-term 3D hydrological simulations of a forested catchment using empirical orthogonal functions and wavelet coherence analysis. *Journal of Hydrology*, 529: 1754-1767.

Francés, F., et al. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*. 332: 226–240.

García, M. et al. (2017). Cambio climático y planificación hidrológica: ¿es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación?. *Ingeniería del agua*. 21.1: 35 - 52.

Grayson, R. y Blöschl, G. (2001). *Spatial Patterns in Catchment Hydrology. Observations and modelling*, United Kingdom: Cambridge University Press.

Gómez, J. J., & Goy, A. (1979). Las unidades litoestratigráficas del Jurásico medio y superior en facies carbonatadas del Sector Levantino de la Cordillera Iberica [España]. *Estudios Geológicos*.

Guerra and Gonzales. (1994). Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela. *Geoenseñanza*, vol. 7, núm. 1-2, 2002, pp. 88-108.

Herman, M et al. (2018). Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability. *Journal of Hydrology*, 556, 39–49. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169417307631>

IPCC 2013 Cambio climático, Quinto informe de evaluación. Cambridge University Press, London, UK. <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/ipcc-en-espanol-publications/>

Kaczmarek. (1976). Applications of stochastic models in hydrology. *Hydrological Sciences Journal*. 21, 5-11.

Komatsu, H. y Kume, T. (2020). Modeling of evapotranspiration changes with forest management practices: A genealogical review. *Journal of Hydrology*. 585: 1-14.

Li, H., Sheffield, J., Wood, E. F. (2010). Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 115(D10). doi:10.1029/2009JD012882

Leopold, L.B., y Maddock, T. (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *USGS Professional Paper*. 252: 1-57. <https://doi.org/10.3133/pp252>.

Leopold, L.B., Wolman, M.G. y Miller, J.P. (1964) *Fluvial Processes in Geomorphology*. Freeman, San Francisco, 522 p.

Lindner, M et al. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259, 698–709. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112709006604>

Loustau al. (2005). Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. *Tree Physiology*. 25, 813–823. <https://academic.oup.com/treephys/article/25/7/813/1673660>

Morais, D et al. (2014). Estimativas de índice de área foliar de uma pastagem por sensoriamento remoto no Pantanal Mato-grossense. *Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM*, 36, 373 – 384.

Montaldo et al. (2005). Parsimonious modeling of vegetation dynamics for ecohydrologic studies of water-limited ecosystems. *Water Resources Research*, 41, W10416, doi: 10.1029/2005WR004094

Martin, M.J., et al. (2009). Verificação da Eficiência e Eficácia de um Algoritmo Evolucionário Multi-objetivo na Calibração Automática do Modelo Hidrológico IPH II. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.4: 37-50.

Malago et al. (2016). Regional scale hydrologic modeling of a karst-dominant geomorphology: The case study of the Island of Crete. *Journal of Hydrology* 540: 64 -81

Muzylo, A. et al. (2009). A review of rainfall interception modelling. *Journal of Hydrology*.370: 191 -206. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169409001383>.

Ocio, et al. (2019). Fully distributed hydrological modelling for catchmentwide hydrological data verification. *Hydrology Research*. 50.6, 1520–1534.

O’Callaghan, J. F., and D. M. Mark (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Comput. Vision Graphics Image Process.*, 28, 323 – 344.

Orozco, I et al. (2019). Parsimonious Modeling of Snow Accumulation and Snowmelt Processes in High Mountain Basins. *Water*, 11, 1- 19.

Pascual Aguilar, J. A. (2002). Cambios del suelo y régimen hídrico en la rambla de poyo y el barranc de Carraixet, Tesis Doctoral, Universidad de Valencia.

Pasquato, (2013). Comparison of parsimonious dynamic vegetation modelling approaches for semiarid climates. PhD Thesis, Universidad Politécnica de Valencia.

Pasquato, M et al. (2015). Comparing two approaches for parsimonious vegetation modelling in semiarid regions using satellite data 1036, 1024–1036. <https://doi.org/10.1002/eco.1559>

Pedrajas, G.J. (2017). Caracterización del régimen temporal de masas de agua no permanentes mediante la implementación del modelo hidrológico TETIS y la herramienta TREHS. Aplicación en la demarcación hidrográfica del Júcar. Tesis de Máster. Universidad Politécnica de Valencia.

Peñuelas, J. and I. Filella. (2001). Phenology: responses to a warming world. *Science*,294:793–795.

Pilgrim, M.et al. (1988). Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions, *Hydrological Sciences Journal - des Sciences Hydrologiques*, 33, 379-400.

Polley, H. W., Phillips, R. L., Frank, A. B., Bradford, J. A., Sims, P. L., Morgan, J. A., Kiniry, J. R. (2011). Variability in light-use efficiency for gross primary productivity on Great Plains grasslands. *Ecosystems*, 14(1), 15-27.

Puricelli (2003). Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Ramos, F.L. y Francés, F. (2014). Modelación hidrológica distribuida aplicada a la cuenca hidrográfica del río Júcar. *Anales Científicos*. 75 (2): 324-333.

Ruiz-Pérez, R. (2016). On the use of satellite data to calibrate a parsimonious ecohydrological model in ungauged basins PhD Thesis, Universidad Politécnica de Valencia.

Ruiz-Pérez, G. et al. (2017). Calibration of a parsimonious distributed ecohydrological daily model in a data-scarce basin by exclusively using the spatio-temporal variation of NDVI. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21: 6235–6251.

Rosenbrock, H.H. (1960). An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function. *Comput. J.* 3, 175–184. <https://doi.org/10.1093/comjnl/3.3.175>

Sanchis, M. et al. (2019). Managing low productive forests at catchment scale: Considering water, biomass and fire risk to achieve economic feasibility. *Journal of Environmental Management*. 231:653–665.

Segura, M. (2017). Análisis comparativo de modelos agregados de balance hídrico en la España peninsular y su sensibilidad a la incertidumbre climática. Tesis doctoral, Universidad católica de Murcia.

Singh. (1986). *Flood Hydrology*. Louisiana. U.S.A: Reidel Publishing Company.

Sitch, S et al. (2003). Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 9,2, 161-185.

Snyder et al. (2000). Estimating evaporation from bare and nearly bare soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126, 399-403.

Sorooshian et al. (2002). *Hydrological modelling and the water cycle*. Texas. U.S.A: Advisory Board.

Thomas, W., et al. (2008). Comparison of Three Multiobjective SOIL PHYSICS Optimization Algorithms for Inverse Modeling of Vadose Zone Hydraulic Properties. *Soil Science Society of America Journal* . 72: 305-319.

Tóth, B. et al. (2017). 3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution. *Hydrological Processes*. 31:2662–2666.

Tóth, B. et al. (2015). New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science*, 66, 226–238.

Velez, U. (2003). Desarrollo de un modelo distribuido de predicción en tiempo real para eventos de crecidas Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.

Velez, J et al. (2009). Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrology and Earth System Sciences*. 13.2, 229 - 246.

Vlassova L. (2016). Land Surface Temperature (LST) estimated from Landsat images: applications in burnt areas and tree-grass woodlands (dehesas). PhD Thesis, Universidad de Zaragoza.

Wullschleger, et al. (2002). Plant water relations at elevated CO<sub>2</sub>—implications for water-limited environments. *Plant Cell and Environment*. 25, 319–331.

Zalewski, M. (2010). Ecohydrology for compensation of Global Change. *Res*. 70, 689 - 695. <https://www.scielo.br/pdf/bjb/v70n3s0/01.pdf>