

Trabajo Fin de Máster

ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE CAUCE, MODELIZACIÓN DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Y CAMBIO CLIMÁTICO DE UNA CUENCA MEDITERRÁNEA (RAMBLA DE LA VIUDA)

**Intensificación:
ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS**

Autor:

CARLOS ISRAEL MONTALVO MONTENEGRO

Director:

DR. FÉLIX FRANCÉS GARCÍA

JULIO, 2017



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: ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE CAUCE, MODELIZACIÓN DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Y CAMBIO CLIMÁTICO DE UNA CUENCA MEDITERRÁNEA (RAMBLA DE LA VIUDA) |
| Título del TFM en inglés: ESTIMATION OF WATER LOSSES IN THE RIVERBED, SEDIMENT MODELLING AND CLIMATE CHANGE IN A MEDITERRANEAN BASIN (RAMBLA DE LA VIUDA) |
| Título del TFM en valenciano: ESTIMACIÓ DE PERDUES DE LLIT, MODELITZACIÓ DE TRANSPORT DE SEDIMENTS I CANVI CLIMÀTIC D'UNA CONCA MEDITERRANEA (RAMBLA DE LA VIUDA) |
| Alumno: CARLOS ISRAEL MONTALVO MONTENEGRO |
| Director: DR. FÉLIX FRANCÉS GARCÍA |
| Codirector/es: |
| Fecha de Lectura: JULIO, 2017 |

| Resumen |
|--|
| En español: |
| <p>Rambla es un término utilizado en España para denominar a ríos que presentan flujo pocos días al año, siendo el caso de la inmensa mayoría de las cuencas mediterráneas españolas, caracterizadas por tener un cauce efímero, asociado a: su clima único, que presenta un régimen estacional de temperaturas similar al de los climas templados, y la aridez y escasas precipitaciones características de los climas secos; y a su litología marcada por un dominio calcáreo que dificulta la conexión entre río y acuífero y favorece la infiltración de agua en el cauce.</p> <p>En el presente trabajo se implementó el modelo conceptual distribuido TETIS en la Rambla de la Viuda, permitiendo evaluar las particularidades de este tipo de cuencas. Partiendo de una implementación previa del modelo dicha cuenca, se buscó estimar en la misma las pérdidas producidas en cauce debido a su litología particular, buscando obtener una mejor representación de su hidrología, para luego modelizar de manera conjunta su ciclo sedimentológico, y finalmente tratar de estimar los efectos del Cambio Climático pudiera producir sobre ella.</p> <p>Las pérdidas por transmisión en cauce fueron estimadas utilizando información espacial relacionada, como los mapas de zonas kársticas dentro de la cuenca, y de relación entre flujo superficial y subterráneo en el cauce. Identificando en estos las posibles zonas donde se pueda dar el fenómeno, correlacionando la magnitud del mismo al área de las zonas, siguiendo la metodología que varios autores han aplicado previamente. Ponderando la misma en función del fenómeno producido en cada caso, considerando las zonas donde el cauce se encuentra dentro de zonas kársticas, tramos donde se identifica que existe conexión indirecta por efecto ducha, y la combinación de ambos casos. Obteniendo como resultado una magnitud global de pérdidas de 8 m³/s, distribuidas a lo largo de 6.5 Km² de</p> |

área dentro del cauce, donde las zonas con efecto combinado son las más influyentes. La introducción de las mismas de manera distribuida en el modelo, incrementan considerablemente su desempeño, tanto al evaluarlo cualitativamente observando su hidrograma, como cuantitativamente evaluando estadísticos como el coeficiente de correlación de Nash & Sutcliffe.

La modelización del ciclo sedimentológico se llevó a cabo utilizando información sobre la pérdida de la capacidad del embalse de M^a. Cristina que se encuentra dentro de la cuenca, asumiendo que esta se debe al proceso de acumulación de sedimento en el mismo. Utilizando información sobre su capacidad en diferentes años, asumiendo como volumen de sedimento acumulado en el periodo a la diferencia entre la medición inicial y final. Considerando además la variación en el tiempo debido al efecto de consolidación que se da en el material. Este volumen permite calibrar el submodelo sedimentológico de TETIS, obteniendo un sedimentograma simulado de la cuenca, que ofrece una variación temporal del proceso de transporte de sedimento en la misma, así como la variación temporal del proceso de aterramiento en el embalse, concluyéndose que existe una relación estrecha entre estos y los eventos de precipitación de gran magnitud, que generan los caudales necesarios para transportar grandes volúmenes de sedimento, en función del material disponible en el cauce, que es el producido y arrastrado en eventos previos.

La estimación de los efectos del Cambio Climático se realizó utilizando los escenarios futuros presentados por la AEMET, que brindan información de temperatura y precipitación regionalizada de diferentes Modelos de Circulación Global dentro de la geografía española. Esta información tuvo que ser corregida previamente, debido a que en el periodo de control de la misma, que representa un pasado reciente comparable con información observada, en este caso 1971-2000, no representaba de manera correcta la meteorología de la cuenca. Se utilizaron únicamente los modelos MRI-CGCM3, MPIESM-LR, HadGEM2-CC, CMCC-CC, ACCESS1-1 y ACCESS1-3 por ser los que mejor representaban a la cuenca. Tras corregirse la información de estos, se evaluaron los escenarios futuros RCP 4.5 y RCP 8.5 que representan respectivamente escenarios de estabilización y aumento, en los efectos del Forzamiento Radiactivo, en el periodo 2071-2100. El escenario RCP 4.5 no muestra gran diferencia, con precipitación temperatura similares, que representan una hidrología similar, con un régimen de caudales parecido al del periodo de control. Mientras RCP 8.5 presenta precipitaciones similares, pero un aumento considerable en las temperaturas, que se refleja en un aumento de evapotranspiración, y que deriva finalmente en un incremento en el estrés de la cuenca, reduciendo la magnitud de los caudales en eventos grandes, que son los que caracterizan este tipo de cuencas.

En valenciano:

Rambla és un terme utilitzat a Espanya per a denominar a rius que presenten flux pocs dies a l'any, sent el cas de la immensa majoria de les conques mediterrànies espanyoles, caracteritzades per tindre un llit efímer, associat a: el seu clima únic, que presenta un règim estacional de temperatures semblant al dels climes temperats, i l'aridesa i escassesa de precipitacions característiques dels climes secs; i a la seua litologia marcada per un domini calcari que dificulta la connexió entre riu i aqüífer i afavoreix la infiltració d'aigua en el llit. En aquest treball s'ha implementat el model conceptual distribuït TETIS en la Rambla de la Viuda, permetent avaluar les particularitats d'aquest tipus de conques. Partint d'una implementació prèvia del model de l'esmentada conca, es va buscar estimar en la mateixa les pèrdues produïdes en el llit degut a la seua litologia particular, buscant obtenir una millor representació de la seua hidrologia, per a després modelitzar de manera conjunta el seu

cicle sedimentològic i, finalment, tractar d'estimar els efectes del Canvi Climàtic que es pogueren produir sobre ella.

Les pèrdues per transmissió en el llit van ser estimades utilitzant informació espacial relacionada, com els mapes de zones càrstiques dins de la conca, i de la relació entre flux superficial i subterrani en el llit. Identificant en aquests les possibles zones on es pugui donar el fenomen, correlacionant la magnitud del mateix a l'àrea de les zones, seguint la metodologia que diversos autors han aplicat prèviament. Ponderant la mateixa en funció del fenomen produït en cada cas, considerant les zones on el llit es troba dins de zones càrstiques, trams on s'identifica que hi ha connexió indirecta per efecte dutxa, i la combinació d'ambdós casos. Obtenint com a resultat una magnitud global de pèrdues de $8 \text{ m}^3/\text{s}$, distribuïdes al llarg de 6.5 Km^2 d'àrea dins del llit, on les zones amb efecte combinat són les més influents. La introducció de les mateixes de manera distribuïda en el model, incrementen considerablement el seu exercici, tant a l'avaluar-lo qualitativament observant el seu hidrograma, com quantitativament avaluant estadístics com el coeficient de correlació de Nash & Sutcliffe.

La modelització del cicle sedimentològic es va dur a terme utilitzant informació sobre la pèrdua de la capacitat de l'embassament de M^a . Cristina que es troba dins de la conca, assumint que aquesta es deu al procés d'acumulació de sediment en el mateix. Utilitzant informació sobre la seua capacitat en diferents anys, assumint com a volum de sediment acumulat en el període a la diferència entre el mesurament inicial i final. Considerant, a més, la variació en el temps a causa de l'efecte de consolidació que es dona en el material. Aquest volum permet calibrar el submodel sedimentològic de TETIS, obtenint un sedimentograma simulat de la conca, el qual ofereix una variació temporal del procés de transport de sediments en la mateixa, així com la variació temporal del procés d'aterrament en l'embassament, concloent-se que hi ha una relació estreta entre aquests i els esdeveniments de precipitació de gran magnitud, que generen els cabals necessaris per a transportar grans volums de sediment, en funció del material disponible en el llit, que és el produït i arrossegat en esdeveniments previs.

L'estimació dels efectes del Canvi Climàtic es va realitzar utilitzant els escenaris futurs presentats per l'AEMET, que ofereixen informació de temperatura i precipitació regionalitzada de diferents Models de Circulació Global dins de la geografia espanyola. Aquesta informació va haver de ser corregida prèviament, pel fet que en el període de control de la mateixa, que representa un passat recent comparable amb la informació observada, en aquest cas 1971-2000, no representava de manera correcta la meteorologia de la conca. Es van utilitzar únicament els models MRI-CGCM3, MPIESM- LR, HadGEM2-CC, CMCC-CC, ACCESS1-1 i ACCESS1-3 per ser els que millor representaven a la conca. Després de corregir-se la informació d'aquests, es van avaluar els escenaris futurs RCP 4.5 i RCP 8.5 que representen respectivament escenaris d'estabilització i augment, en els efectes del Forçament Radioactiu, en el període 2071- 2100. L'escenari RCP 4.5 no mostra gran diferència, amb precipitació i temperatura semblants, els quals representen una hidrologia semblant, amb un règim de cabals semblant al del període de control. Per contra, RCP 8.5 presenta precipitacions semblants, però un augment considerable en les temperatures, que es reflecteix en un augment d'evapotranspiració, i que deriva, finalment, en un increment en l'estrès de la conca, reduint la magnitud dels cabals en esdeveniments grans, que són els que caracteritzen aquest tipus de conques.

En anglés:

“Rambla” is a Spanish term used for rivers which only present water flow a few days per year. That is the case with most Spanish rivers. These are characterized by an ephemeral water flow in the riverbed. This is related to Spain’s unique weather, with a seasonal temperatures regime similar to a temperate climate regime, and the aridity and low rainfall typical of dry climate; and its lithology dominated by karst that hinders the connection between river and aquifer and also enables favors water infiltration from riverbed.

For this project, the conceptual distributed model TETIS has been implemented on the “Rambla de la Viuda” basin to assess the distinctive features of this kind of basins. Based on a previous implementation of the said basin model, the work sought to estimate the water losses. This was done for the purpose of trying to obtain a better hydrological representation in order to jointly model the sediment cycle . And finally, the work tried to estimate the effects of Climate Change on the watershed.

Water transmission losses have been estimated using spatial information related with the process, such as maps of the karstic zones inside the basin and of the relationship between surface and groundwater flow. These maps have been used to detect the areas affected by the phenomenon. Its magnitude was related with its area according to methodologies previously applied by various authors. The magnitude was estimated taking into account the three different kinds of phenomena: areas inside karstic zones, river sections with indirect connection between surface-groundwater and the combined case. The results show 8 m³/s global losses distributed around 6.5 Km² of the riverbed area. The introduction of the distributed water losses into the model increases its performance qualitatively evaluating the hydrograph and in quantitatively evaluating the Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient.

The modeling of the sediment cycle was performed using information about the M^a. Cristina dam storage capacity losses related with the sediment accumulation. Information from different years was used to estimate the sediment storage. This was calculated as the difference between the older and the newer measure. The variation over time caused by the consolidation effect was taken into account. The volume of sediment obtained was used to calibrate the TETIS sediment submodel getting as result a simulated sedimentogram for the catchment. This represents the temporal variation in transport of sediment and in siltation on the dam. The results lead to the conclusion that there exists a relation between these and events of great magnitude rainfall that produce enough flow to transport large volumes of sediment. But at the same time these depend on available material in the river produced and transported in previous events.

The estimation of Climate Change effects was performed using the future scenarios provided by AEMET. These provide information on temperature and precipitation downscaled from different General Circulation Models within Spain’s geography. This information had to be corrected because, compared with the observed information, in this case the period of 1971-2000, the Control Period that represents the recent past did not represent the meteorology of the basin correctly. Therefore it did not constitute a reliable representation of the basin weather. Only the models MRI-CGCM3, MPIESM-LR, HadGEM2-CC, CMCC-CC, ACCESS1-1 y ACCESS1-3 have been used because these were the ones better applicable to the basin. Once corrected, the future scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 have been evaluated. These represent stabilization and increase effects of Climate Forcing for the period 2071-2100. The scenario RCP 4.5 does not show a significant difference with regard to the Control Period, with similar precipitations,

temperatures and flow regime, these represent a similar hydrology. The scenario RCP 8.5 shows similar precipitations but with a significant increase in temperatures. This increase leads to an evapotranspiration increase, reducing the flow levels in flood events characteristics from this kind of basins.

Palabras clave español: Modelización hidrológica, Pérdidas en Cauce, Transporte de sedimentos, Cambio Climático, TETIS

Palabras clave valenciano: Modelació hidrológica, Perdues de Llit, Transport de sediments, Canvi Climàtic, TETIS

Palabras clave inglés: Hydrological modeling, Losses in the Riverbed, Sediments transport, Climate Change, TETIS

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Félix Francés por su brillante dirección en el desarrollo del presente proyecto. Al personal del GIMHA por la constante ayuda brindada durante este tiempo. A todos los profesores del MIHMA por los conocimientos brindados, en especial al Dr. Eduardo Cassiraga por toda la ayuda brindada durante su periodo como director del máster.

Un agradecimiento muy especial al Gobierno de la República del Ecuador, que a través de la SENESCYT y el IFTH me han brindado la oportunidad y el financiamiento necesarios para alcanzar esta meta.

DEDICATORIA

A todos mis amigos, a los nuevos, a los viejos y a los que están por venir.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2. Justificación | 2 |
| 1.3. Objetivos | 3 |
| 1.4. Pérdidas en cauce | 4 |
| 1.4.1. Los cauces efímeros | 4 |
| 1.4.2. Pérdidas en cauce | 4 |
| 1.4.3. Las ramblas mediterráneas..... | 5 |
| 1.5. El ciclo de sedimentos | 5 |
| 1.6. Cambio Climático..... | 6 |
| 1.6.1. Modelos climáticos..... | 8 |
| 1.6.2. Métodos de regionalización | 9 |
| 1.7. Metodología | 10 |
| 1.7.1. Estimación de pérdidas en cauce | 10 |
| 1.7.2. Modelización de transporte de sedimentos..... | 11 |
| 1.7.3. Cambio Climático | 11 |
| CAPÍTULO II. CASO DE ESTUDIO | 13 |
| 2.1. Descripción del área de estudio | 13 |
| 2.1.1. Topografía | 13 |
| 2.1.2. Clima | 13 |
| 2.1.3. Suelos | 14 |
| 2.1.4. Uso del suelo | 14 |
| 2.1.5. Geología..... | 14 |
| 2.1.6. Hidrogeología | 15 |
| 2.2. Información meteorológica | 16 |
| 2.2.1. Precipitación y temperatura | 16 |
| 2.2.2. Información hidrológica | 18 |
| 2.3. Información batimétrica | 20 |
| 2.4. Información espacial | 20 |
| 2.5. Escenarios climáticos regionalizados para España..... | 21 |
| 2.5.1. Problemas con los escenarios climáticos regionalizados | 22 |
| 2.6. Modelo TETIS..... | 23 |
| 2.6.1. Formulación del submodelo hidrológico..... | 24 |
| 2.6.2. Parámetros del modelo | 26 |
| 2.6.3. Condiciones iniciales..... | 28 |
| 2.7. Submodelo sedimentológico..... | 29 |
| 2.7.1. Formulación del submodelo | 29 |
| 2.7.2. Parámetros del submodelo | 31 |
| 2.7.3. Condiciones iniciales..... | 31 |
| 2.8. Implementación previa del submodelo hidrológico | 32 |
| 2.8.1. Estimación de variables temporales: Evapotranspiración de referencia..... | 32 |
| 2.8.2. Estimación de parámetros espaciales | 34 |
| 2.8.3. Estimación de parámetros geomorfológicos | 38 |
| 2.8.4. Calibración, validación y resultados del modelo hidrológico | 38 |

| | |
|---|----|
| 2.8.5. Cambios a la implementación previa del modelo hidrológico | 42 |
| CAPÍTULO III. ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS EN CAUCE | 44 |
| 3.1. Estimación inicial de pérdidas globales | 44 |
| 3.2. Estimación de las zonas con pérdidas y magnitud de las mismas | 44 |
| 3.3. Calibración y validación del modelo y los parámetros de estimación de pérdidas | 47 |
| CAPÍTULO IV. MODELIZACIÓN DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS | 52 |
| 4.1. Estimación de la variación volumétrica del sedimento acumulado | 52 |
| 4.2. Estimación del volumen de sedimentos producidos y transportados | 54 |
| 4.3. Implementación del submodelo sedimentológico | 55 |
| 4.4. Variación de la capacidad del embalse de M ^a . Cristina | 59 |
| CAPÍTULO V. CAMBIO CLIMÁTICO | 60 |
| 5.1. Selección de MCG regionalizados | 60 |
| 5.2. Corrección de escenarios climáticos regionalizados | 62 |
| 5.3. Implementación del modelo TETIS utilizando los escenarios de Cambio Climático | 68 |
| CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES | 74 |
| CAPÍTULO VII. REFERENCIAS | 80 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Precipitación media anual en España y Portugal en el periodo de control 1971-2000 | 6 |
| Figura 1.2. Proceso de erosión y transporte en ladera (a) y Fuentes de sedimento en una cuenca (b)..... | 10 |
| Figura 1.3. Resumen de los componentes principales del forzamiento radiactivo del cambio climático | 11 |
| Figura 1.4. Cambio en la temperatura media en superficie (a) y cambio en la precipitación media (b) sobre la base de las proyecciones de la media de múltiples modelos para 2081-2100 en relación con 1986-2005 bajo los escenarios RCP 2.6 (izquierda) y RCP 8.5 | 12 |
| Figura 2.1. Ubicación en España de la cuenca de la Rambla de la Viuda (a). Cuenca de la Rambla de la Viuda (b) | 17 |
| Figura 2.2. Modelo de elevación digital (a) y Mapa de uso de suelos (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda. | 18 |
| Figura 2.3. Mapa geomorfológico (a) (Tomado de: Sos y Sanfeliu, 1983), Mapa hidrogeológico continuo (b) y Esquema geológico regional en la comunidad Valenciana (c) de la zona de ubicación de la Rambla de la Viuda (c) | 19 |
| Figura 2.4. Mapa de zonas kársticas dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda..... | 20 |
| Figura 2.5. Distribución de la información meteorológica proveniente de Spain02 V.04. y estaciones de la AEMET con escenarios de Cambio Climático regionalizado en el área de la cuenca de la Rambla de la Viuda. | 21 |
| Figura 2.6. Precipitación anual media areal para el periodo 1971-2000 en la cuenca de la Rambla de la Viuda. | 21 |
| Figura 2.7. Precipitación diaria media areal máxima anual del periodo 1971-2000 en la cuenca de la Rambla de la Viuda..... | 22 |
| Figura 2.8. Precipitación media mensual media areal (a) y temperatura diaria máxima mensual media areal (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda en el periodo 1971-2000. | 22 |
| Figura 2.9. Aportaciones anuales del embalse de M ^a . Cristina en el periodo 1971-2000..... | 23 |
| Figura 2.10. Aportaciones anuales del embalse de Alcora en el periodo 1980-2000. | 23 |
| Figura 2.11. Aportaciones medias mensuales de los embalses de: de M ^a . Cristina (periodo 1971-2000) (a) y Alcora (periodo 1980-2000) (b). | 24 |
| Figura 2.12. Valores medios mensuales de precipitación (a) y temperatura máxima (b) en el periodo de control (1971-2000) y en los escenarios RCP (2071-2100) del punto 8495 de la AEMET del MCG MRI-CGCM3 regionalizado por métodos análogos. | 26 |
| Figura 2.13. Comparación entre la precipitación media mensual observada en P10 de Spain02 V.04 y 8495 de la AEMET en el periodo de control (1971-2000) de: varios MCG regionalizados con análogos (a); y el MCG MPI-ESM-LR regionalizado con análogos y SDSM (b)..... | 27 |
| Figura 2.14. Comparación entre curvas de probabilidad de excedencia (a) y probabilidad de precipitación nula mensual (b) entre los valores observados en P10 de Spain02 V.04 y los regionalizados en 8495 de la AEMET en el periodo de control (1971-2000). | 27 |
| Figura 2.15. Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS | 29 |
| Figura 2.16. Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS | 30 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.17. Curva de suministros y capacidad de transporte (a). Ciclo de histéresis en la relación caudal líquido – caudal sólido. A un mismo caudal líquido corresponden dos caudales sólidos, uno mayor, en la rama ascendente del hidrograma, y uno menor, en la rama descendente del hidrograma | 33 |
| Figura 2.18. Esquema de los procesos de ladera en TETIS..... | 34 |
| Figura 2.19. Temperatura diaria mínima (a) y Evapotranspiración de referencia media mensual media areal (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda en el periodo 1971-2000 | 37 |
| Figura 2.20. Mapas de: direcciones de flujo (a) y celdas drenantes acumuladas (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda..... | 38 |
| Figura 2.21. Mapas de: pendientes (a) y velocidades de ladera (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda..... | 39 |
| Figura 2.22. Distribución mensual de valores del Factor de vegetación para los usos de suelo de utilizados en la implementación del modelo TETIS en la cuenca de la Rambla de la Viuda. | 40 |
| Figura 2.23. Mapas de: almacenamiento superficial (a) y almacenamiento máximo estático (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda. | 41 |
| Figura 2.24. Mapas de: capacidad de infiltración del suelo (a) y conductividad hidráulica del acuífero (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda..... | 41 |
| Figura 2.25. Hidrogramas observado y simulado en el periodo de calibración (2000-2001) en la estación M ^a . Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda (estimación previa)..... | 44 |
| Figura 2.26. Hidrogramas observado y simulado en el periodo de validación temporal (2003-2004) en la estación M ^a . Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda (estimación previa) | 44 |
| Figura 2.27. Hidrogramas observado y simulado de validación espacio-temporal (2003-2004) en la estación Vall d'Alba de la cuenca de la Rambla de la Viuda (estimación previa)..... | 44 |
| Figura 2.28. Hidrogramas observado y simulado en los periodos de: calibración (2000–2001) (a) y validación temporal (2003–2004) (b) en la estación M ^a . Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda (estimación previa). | 45 |
| Figura 2.29. Distribución horaria de precipitaciones en diferentes pluviómetros y eventos de la cuenca hidrográfica del Jucar | 45 |
| Figura 3.1. Hidrogramas observados y simulados en el periodo 2003–2004 en la estación M ^a . Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con corrección de desfase temporal. | 48 |
| Figura 3.2. Hidrogramas observados y simulados en el periodo 2000–2001 en la estación M ^a . Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con corrección de desfase temporal. | 49 |
| Figura 3.3. Mapa de zonas kársticas, y de tramos de río con efecto ducha dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda..... | 49 |
| Figura 3.4. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de calibración (2003-2004) en la estación M ^a . Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas.... | 52 |
| Figura 3.5. Hidrogramas observado y simulados en los periodos de: calibración (2003–2004) (a) y validación temporal (2002–2003) (b) en la estación M ^a . Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas | 52 |
| Figura 3.6. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de validación temporal (2001-2002) en la estación M ^a . Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas. | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.7. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de validación temporal (2002-2003) en la estación M ^a . Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas | 53 |
| Figura 3.8. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de validación temporal (2004-2005) en la estación M ^a . Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas | 54 |
| Figura 3.9. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de validación espacial (2003-2004) en la estación Vall d'Alba de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas | 54 |
| Figura 3.10. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de validación espacio-temporal (2005-2006) en la estación Vall d'Alba de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas | 55 |
| Figura 3.11. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de validación espacio-temporal (2004-2005) en la estación Vall d'Alba de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas | 55 |
| Figura 4.1. Curva de Brune para la estimación del índice de eficiencia de atrapamiento | 58 |
| Figura 4.2. Mapas de factores USLE: C (a) y K (b) para la cuenca de la Rambla de la Viuda .. | 60 |
| Figura 4.3. Mapas de: factor USLE P (a) y contenido de arena (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda | 60 |
| Figura 4.4. Mapas de contenido de: limo (a) y arcilla (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda | 61 |
| Figura 4.5. Sedimentograma e hidrograma simulados en la cuenca de la Rambla de la Viuda en el periodo junio de 1991 – octubre de 2000 | 61 |
| Figura 4.6. Sedimentograma e hidrograma simulados en la cuenca de la Rambla de la Viuda en los periodos: diciembre de 1992 – febrero de 1993 (a) y octubre de 1994 – noviembre de 1994 (b). | 62 |
| Figura 4.7. Sedimentograma e hidrograma simulados en la cuenca de la Rambla de la Viuda en los periodos: enero de 1996 – febrero de 1996 (a) y octubre de 2000 – noviembre de 2000 (b)..... | 62 |
| Figura 4.8. Curva simulada de disminución de capacidad del embalse de M ^a . Cristina, dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda. | 63 |
| Figura 5.1. Comparación entre la precipitación media mensual observada en P10 de Spain02 V.04 y 8495 de la AEMET en el periodo de control (1971-2000) de los MCG regionalizados: MPI-ESM-LR (a) y CMCC-CM (b)..... | 65 |
| Figura 5.2. Probabilidad de precipitación nula mensual entre los valores observados en P10 de Spain02 V.04 y los regionalizados en 8495 de la AEMET en el periodo de control (1971-2000) para los MCG regionalizados: MPI-ESM-LR (a) y CMCC-CM (b). | 65 |
| Figura 5.3. Comparación entre la precipitación media mensual observada en P10 de Spain02 V.04 y 8495 de la AEMET en el periodo de control (1971-2000) para los MCG regionalizados estadísticamente: seleccionados (a) y parte de los descartados (b) | 66 |
| Figura 5.4. Curva de probabilidad de excedencia de precipitación de los valores observados en P10 de Spain02 V.04 y los regionalizados en 8495 de la AEMET en el periodo de control (1971-2000) para los MCG regionalizados: MPI-ESM-LR (a) y HadGEM2-CC (b)..... | 67 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.5. Diagrama cuantil-cuantil de precipitación en otoño en el periodo de control (1971-2000) entre: MCG regionalizado sin corrección y la información observada y su curva de ajuste polinomial (a) y; la información observada y el MCG regionalizado corregido y su curva de ajuste perfecto (b)..... | 68 |
| Figura 5.6. Precipitación media mensual (a) y Probabilidad media mensual de precipitación nula (b): Observada en el punto P10 de Spain02 V04 y; simulada en el punto 8477 de la AEMET del MCG regionalizado MRI-CGCM3 corregida y sin corregir..... | 68 |
| Figura 5.7. Temperatura media mensual, máxima (a) y mínima (b): Observada en el punto P10 de Spain02 V04 y; simulada en el punto 8477 de la AEMET del MCG regionalizado MRI-CGCM3 corregida y sin corregir | 69 |
| Figura 5.8. Precipitación (a) y temperatura (b) media mensual, media areal: observada y del MCG regionalizado MRI-CGCM3 corregido en los escenarios RCP | 69 |
| Figura 5.9. Precipitación media mensual, media areal: observadas y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control, escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5..... | 70 |
| Figura 5.10. Periodo de retorno de precipitación diaria máxima anual: observada y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control, escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5..... | 71 |
| Figura 5.11. Temperatura máxima media mensual, media areal: observadas y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control, escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 | 72 |
| Figura 5.12. Temperatura mínima media mensual, media areal: observadas y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control (azul), escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 | 72 |
| Figura 5.13. Evapotranspiración de referencia. media mensual media areal: observadas y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control (azul), escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5..... | 73 |
| Figura 5.14. Caudal diario medio mensual en M ^a . Cristina: observado y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control, escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5..... | 74 |
| Figura 5.15. Periodo de retorno de caudal medio diario máximo anual: observado y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control, escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5..... | 75 |
| Figura 5.16. Caudales diario máximo anual ordenados: observados y simulados a partir de la información del MCG MRI-CGCM3 en la estación M ^a . Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda..... | 75 |
| Figura 5.17. Curva de disminución de capacidad del embalse de M ^a . Cristina, dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda en un periodo de 30 años. Simulada con información observada y proveniente de los MCG en el escenario RCP 4.5. | 76 |
| Figura 5.18. Curva de disminución de capacidad del embalse de M ^a . Cristina, dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda en un periodo de 30 años. Simulada con información observada y proveniente de los MCG en el escenario RCP 8.5. | 77 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1. Mapas utilizados para la estimación de parámetros espaciales de TETIS. | 21 |
| Tabla 2.2. MCG y sus escenarios disponibles | 22 |
| Tabla 2.3. Tamaño medio del grano y velocidad media de sedimentación en TETIS | 30 |
| Tabla 2.4. Valores mensuales de R_0 para la latitud 40° | 33 |
| Tabla 2.5. Valores de permeabilidad adoptados en función de la categoría cualitativa. | 38 |
| Tabla 2.6. Coeficientes y exponentes utilizados en la OCG. | 38 |
| Tabla 2.7. Valores de los factores correctores obtenidos en la estimación previa. | 39 |
| Tabla 2.8. Resultados de la implementación previa del modelo. | 39 |
| Tabla 2.9. Resultados de la implementación del modelo, con corrección de desfase temporal. | 43 |
| Tabla 3.1. Tramos de pérdidas en la cuenca de la Rambla de la Viuda. | 46 |
| Tabla 3.2. Valores de los parámetros y factores correctores calibrados en la implementación con pérdidas. | 47 |
| Tabla 3.3. Resultados de la implementación del modelo con introducción de pérdidas. | 48 |
| Tabla 4.1. Propiedades de los componentes del sedimento. | 53 |
| Tabla 4.2. Variación de los sedimentos en el embalse de M ^a . Cristina en el tiempo. | 53 |
| Tabla 4.3. Cálculo del volumen de sedimentos producidos y transportados por la cuenca de la Rambla de la Viuda. | 55 |
| Tabla 4.4. Factores correctores del modelo sedimentológico calibrados. | 57 |

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El agua es un elemento fundamental para la vida de todos los seres que habitan el planeta, incluido el hombre, que a lo largo de la historia ha venido invirtiendo tiempo y esfuerzo en estudiarla, así como el llamado ciclo hidrológico. Siendo este un concepto académico que representa el movimiento, presencia y estado del agua en la Tierra; moviéndose sobre y dentro de su superficie, y a través de la atmósfera que la rodea; cambiando entre los estados: sólido, líquido y gaseoso, en función de las condiciones del medio (Perlman, 2012). La Hidrología es la ciencia encargada de estudiarlo, esta ha evolucionado a lo largo de los siglos, partiendo de sus inicios que únicamente abarcaban procesos de observación y medida, evolucionando luego de la mano de la experimentación hidráulica de autores como Bernoulli, Manning o Chézy, que serían la base del desarrollo de los primeros conceptos hidrológicos, como los de Darcy. Planteando a comienzos del siglo pasado relaciones empíricas que buscaban explicar procesos como la relación precipitación-escorrentía, que luego a mediados del mismo siglo, investigaciones como las de Horton empezarían a conceptualizar física y matemáticamente (Aranda, 1984; Sala y Villanueva, 1996).

En la segunda mitad de siglo pasado, la aparición y rápida evolución de los ordenadores permitiría el desarrollo de los modelos matemáticos, que son representaciones simplificadas de un sistema complejo (Refsgaard, 1997), como el ciclo hidrológico. Debido a la gran cantidad de procesos que lo componen, para su representación se han planteado conceptualizaciones de diferentes tipos, que a su vez requieren una gran cantidad de parámetros, sujetos a una gran variabilidad, necesitando realizar abstracciones para simplificar dichos procesos. Lo que ha generado una amplia gama de modelos que se pueden agrupar en dos ramas principales: Modelos Determinísticos, que tratan de representar los procesos del sistema, ya sea de forma empírica, conceptual o física, considerando al sistema de manera agregada o distribuida; y Modelos Estocásticos, que tratan la información temporal disponible estadísticamente, para en función de ello intentar reproducir el comportamiento del sistema bajo ciertas características de probabilidad (Refsgaard y Abbott, 1996).

España es un país con múltiples problemas de recursos hídricos (Iglesias y col., 2005), cuenta con dos zonas hidrológicas claramente marcadas, como se aprecia en la Fig. 1.1 teniendo al norte y noroeste del país una zona lluviosa, donde la disponibilidad del recurso no representa un problema; mientras que el resto del país se muestra como una zona seca (De Castro y col., 2005). Esta diferencia climática es el motivo por el cual el nivel de gestión en el país sea elevado, mediante un control permanente de las diferentes demandas, para alcanzar niveles de garantía óptimos, buscando suplir las deficiencias del recurso en las zonas secas. Muchas veces a través de la construcción de elementos estructurales: como embalses, para almacenar el recurso en las temporadas de mayor disponibilidad; transvases que buscan redistribuir el agua disponible en las zonas más húmedas transportándola a las más secas; o incluso buscando fuentes alternas que suplan la necesidad como pozos de extracción de aguas subterráneas o desalación en las zonas costeras.

La mayor parte de la zona seca del país se rige por un clima mediterráneo, caracterizado por ser una transición entre las zonas templadas y cálidas. Provocando que, por su régimen estacional de temperaturas se parezca a los climas templados, mientras que por su aridez y escasas lluvias presente semejanzas a los climas tropicales secos. Generando una dualidad

climática que tiene una fuerte influencia hidrológica, que debido a la escases e irregularidad de las lluvias dificulta muchas veces la formación de cauces permanentes en la zona, lo que la diferencia de otros lugares de clima semejante (Segura, 1987a). A lo anterior se suma el factor geológico, que tiene gran influencia en los procesos de formación de escorrentía, debido a que la litología de las rocas determina sus propiedades, como la permeabilidad; y su estructura condiciona procesos como la infiltración y circulación subterránea. Que dentro del territorio mediterráneo está marcado por un dominio calcáreo que dificulta la conectividad entre río y acuífero, favoreciendo a la infiltración del agua en el cauce, llegando muchas veces a secar el mismo (Segura, 1987a). Por estos motivos, la gran mayoría de cuencas mediterráneas españolas suelen presentar un cauce efímero, estas son conocidas localmente como ramblas.

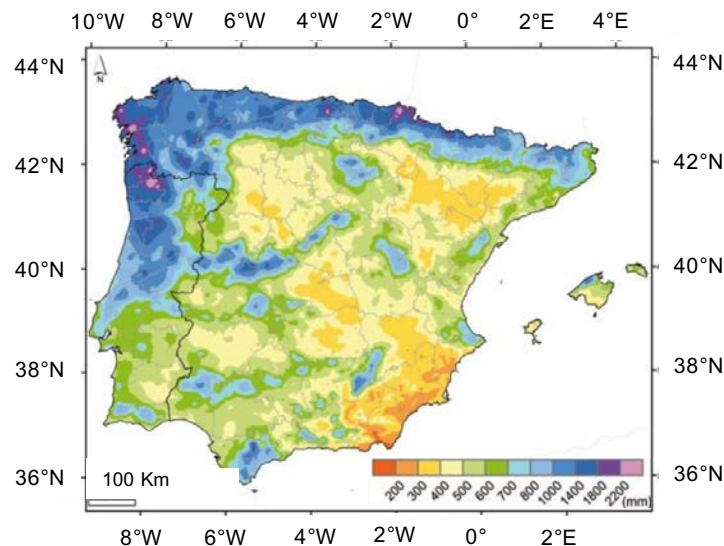


Figura 1.1. Precipitación media anual en España y Portugal en el periodo de control 1971-2000 (Tomado de: AEMET y IMP, 2011).

1.2. Justificación

La creciente necesidad de agua, la variabilidad del ciclo hidrológico y los climas particulares como el mediterráneo, han hecho que el hombre trate de gestionar los recursos disponibles. Sin embargo, esta gestión conlleva modificaciones a los sistemas hidrológicos, que sumadas a otros cambios externos en el medio, como los efectuados en los usos de los suelos, y la emisión de gases de carbono a la atmósfera, producto de la actividad humana, alteran en gran medida el normal comportamiento del ciclo. En la actualidad, el Cambio Climático, asociado a dichas alteraciones, es un tema muy debatido, debido a la alta incertidumbre que hay al tratar de estimar su efecto real. Por ello, la utilización de modelos hidrológicos es esencial, tanto para identificar sus efectos actuales, como para plantear posibles escenarios futuros bajo condiciones específicas, que permitan tomar medidas adecuadas a tiempo, principalmente en lugares que ya presentan un elevado estrés hídrico, como la península ibérica.

En España, los modelos hidrológicos se han venido utilizando como herramientas de gestión y al mismo tiempo, para investigar las particularidades de sus sistemas hidrológicos, como el caso de las ramblas mediterráneas, que debido a sus condiciones particulares que las diferencian de otros ríos, y a las abstracciones de los modelos tradicionales, no se suelen captar la totalidad de sus procesos. Su modelización es el primer paso en su estudio, que debe ser complementado con otros que profundicen en sus problemas particulares, como su cauce

efímero y las pérdidas de transmisión que se presentan en el mismo.

El ciclo hidrológico está estrechamente relacionado con los otros procesos que tienen que ver con el agua: hidráulicos, hidrodinámicos, biológicos, de transporte, entre otros. Debido a la limitada capacidad de los ordenadores en sus inicios, los modelos numéricos solían limitarse a modelizar cada proceso de manera separada, lo que dejaba mucha incertidumbre en medio, en los últimos años, la capacidad de los ordenadores ha aumentado en gran medida, facilitando la modelización conjunta de dichos procesos, permitiendo hacer una estimación conjunta de resultados y ayudando a una mejor comprensión del medio. Es por ello que los modelos hidrológicos se han ido complementando con otro tipo de modelos, implementando procesos paralelos, permitiendo usar diferente información de partida y brindando una mayor gama de resultados, resaltando sus procesos locales, por ello la implementación de esta nueva generación de modelos en las cuencas de las ramblas mediterráneas es algo fundamental e indispensable.

1.3. Objetivos

El presente trabajo busca englobar la importancia de la aplicación de los modelos hidrológicos y de procesos relacionados en las cuencas mediterráneas, considerando las particularidades de su clima y litología, así como los cambios naturales y antrópicos que en ellas se dan. Utilizando como herramienta el modelo distribuido TETIS (Francés y col., 2007) y partiendo de un trabajo previo realizado en la cuenca de la Rambla de la Viuda, en el que se implementó el modelo (Sánchez, 2015). Se busca: mejorar los resultados obtenidos en dicho trabajo, tratando de representar de una mejor manera las pérdidas de transmisión existentes, debido a las propiedades particulares de la cuenca; para luego modelizar de manera conjunta a su hidrología su ciclo sedimentológico, utilizando el submodelo de sedimentos que tiene incorporado el software de TETIS, basado en el modelo CASC-2D de la Universidad Estatal de Colorado (Bussi y col., 2014; Julien y Rojas, 2002); y finalmente estimar los efectos que el cambio climático puede tener en este tipo de cuencas, utilizando para ello las proyecciones climáticas que brinda la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET) para los diferentes escenarios planteados por el Panel Intergubernamental de Expertos Sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su quinto informe (AEMET, 2017).

Por tanto, el objetivo general de este trabajo es implementar el modelo hidrológico distribuido TETIS, y su submodelo sedimentológico, en la cuenca de la Rambla de la Viuda; estimando en esta, la magnitud de las pérdidas que se producen en cauce, los procesos de aterramiento en embalses, y los posibles efectos que produjera el cambio climático. De esta forma, se consigue mejorar la comprensión de los sistemas mediterráneos y sus particularidades asociadas a su clima y litología a través de la modelización.

Los objetivos específicos están definidos en función de las diferentes tareas realizadas para alcanzar el objetivo general, y a la vez dan la estructura a este trabajo:

- Revisión bibliográfica sobre los temas relacionados al objetivo general.
- Revisión y recopilación de la información disponible para la implementación del modelo en la cuenca de la Rambla de la viuda.
- Revisión, identificación y corrección de errores en la implementación previa.
- Estimación de la magnitud de pérdidas en cauce.
- Implementación del modelo sedimentológico.
- Estimación de los posibles efectos del cambio climático.

1.4. Pérdidas en cauce

1.4.1. Los cauces efímeros

Los cauces efímeros son estudiados en distintos lugares del mundo, tanto por sus aspectos hidrológicos como geomorfológicos, generalmente tratando de justificar las causas de sus corrientes eventuales. Suelen conocerse con un nombre diferente en cada sitio de estudio: *ephemeral streams* o arroyos en Estados Unidos, *dry valley* en el Reino Unido, *uadi* en el norte de África, *fiumara* en Italia, o ramblas como se les ha denominado en España. No todos los casos suelen presentar un comportamiento similar, variando características como la duración de sus periodos con flujo y secos. Sin embargo casi siempre muestran un aspecto común, las causas que originan el fenómeno. Siendo la litología y el clima los principales factores, junto a otros influyentes en menor medida, como su régimen hidrológico y las características físicas del terreno influyente sobre la morfología del cauce (Segura, 1987a).

Los climas áridos y semiáridos, con escasas precipitaciones, como el mediterráneo suelen ser los que favorecen a este fenómeno, mientras que litológicamente influye la presencia de zonas kársticas, como en el norte de África, un sustrato granítico o basáltico como en Estados Unidos, o cretáceo como en el Reino Unido, siendo estos, materiales que favorecen la infiltración. Si bien estos factores principales se pueden presentar de manera conjunta como en el sureste de Estados Unidos, con un clima árido y una litología particular (Jordan, 1977; Lane y col., 1980), en otros casos se indica solo a uno como el principal factor, así, en los *dry valley* del sur de Inglaterra, donde las precipitaciones son elevadas, los autores británicos han atribuido la falta de circulación permanente a la litología local, mientras en Israel se le adjudica el problema a la dinámica fluvial de Sinai y Neguev, donde se da el fenómeno (Segura, 1987a).

1.4.2. Pérdidas en cauce

Las pérdidas en cauce engloban: el proceso de evaporación que se produce en la superficie de la corriente (representa solo una pequeña fracción), infiltración y pérdidas por transmisión. El agua perdida suele recargar los acuíferos profundos o añadirse a la humedad del suelo. Suelen estar relacionadas a los mismos factores que influyen a las corrientes efímeras (clima y litología), por lo que suelen presentarse conjuntamente. La magnitud de las pérdidas suele estar condicionada por factores como: la humedad del suelo previa el evento de flujo, la magnitud del evento y su duración, el ancho del canal, la cantidad y textura de los sedimentos sobre el cauce (Segura, 1987; Segura y Camarasa, 1996).

Las pérdidas por transmisión, considerado el proceso más importante, suelen estar relacionadas fundamentalmente a la litología de la cuenca. Su importancia se debe al déficit que producen en el balance hídrico, y al efecto que tienen en el hidrograma, al modificar las ondas de translación, principalmente en crecidas. La estimación de su magnitud se han venido haciendo por diferentes métodos como: regresiones lineales entre el volumen de lluvia y el volumen de caudal que circula, el volumen de las pérdidas y propiedades físicas del cauce como su ancho o los volúmenes que circulan aguas arriba (Lane y col., 1980; Segura, 1987). Estos métodos suelen ser enfocados a estimar los efectos en valores globales como el volumen total o en los picos, sin considerar el efecto la distribución temporal reflejada en el hidrograma.

1.4.3. Las ramblas mediterráneas

El clima mediterráneo se caracteriza por sus escasas precipitaciones, con una estacionalidad muy marcada, donde los eventos principales se originan en otoño, asociados a fenómenos de gota fría, con un máximo secundario en primavera, siendo menores en invierno y escasos en verano (Martín, 2003; Segura y Camarasa, 1996). Son estos eventos de precipitación los que producen la circulación en el cauce, que se manifiesta en forma de crecidas esporádicas, cuyo volumen puede representar hasta el 80% de la aportación anual. Mostrando hidrogramas con rápidos ascensos que forman picos marcados, con un descenso suave, que no suelen darse más de tres o cuatro veces al año (Mateu, 1982; Segura y Camarasa, 1996). Por ello varios autores como: Masachs (1954); Pérez y Calvo (1986); Thornes (1976) afirman en sus trabajos que el clima mediterráneo es el principal causante de las corrientes efímeras de la zona.

Sin embargo, esto ha sido discutido por otros autores, como Lopez (1973) o Mateu (1982), que afirman que existe un efecto conjunto del clima y de la estructura hidrológica subterránea que desconecta totalmente al río del acuífero. Justificando su punto de vista en que las ramblas mediterráneas están sobre suelos muy permeables, con escasa materia orgánica y con gran capacidad de infiltración. Así por ejemplo la Rambla de la Viuda está situada sobre un suelo compuesto por un 80% de calizas y rocas fracturadas, el Barranco del Carraixet está formado por un 65% de calizas, dolomías y areniscas, y la Rambla del Poyo por un 39% de calizas y dolomías. En el caso de la Rambla de la Viuda se ha visto, que en eventos de crecidas, apenas el 17% del volumen de lluvia llega a circular en cauce (Segura y Camarasa, 1996), lo que sugiere fuertemente que existe una gran influencia de la litología, presentándose en forma de pérdidas de transmisión, en la discontinuidad de la circulación de este tipo de cuencas (Segura, 1987a).

1.5. El ciclo de sedimentos

La erosión causada por el agua en el suelo puede darse de manera natural, por fenómenos como la lluvia, o por actividades humanas introducidas. La separación de partículas se da en eventos de precipitación cuando, las gotas de lluvia impactan su superficie con una fuerza mayor a las fuerzas intersticiales que las mantienen juntas (Fig. 1.2). El efecto continúa una vez que la capacidad de infiltración del suelo ha sido alcanzada, formando un flujo superficial, en donde, el agua excedente no infiltrada por acción de la gravedad y siguiendo la dirección de mayor pendiente, produce el moviento de partículas de suelo. Las partículas de suelo transportadas pueden estar: disueltas, en suspensión o arrastradas, este proceso se conoce como transporte de sedimentos (Bussi, 2014).

Los procesos de erosión en cuencas se clasifican en función del lugar donde se originan, definiéndose la zona de ladera y la de cauce, debido a la mecánica que toma lugar en cada caso. En ladera su conceptualización se divide entre los procesos que se dan en los surcos y los que se producen entre ellos, donde a medida que el flujo se mueve aguas abajo y se concentra en caminos más escarpados, su potencial erosivo se incrementa, que en función de la disponibilidad de partículas de suelo, incrementa su concentración en el agua. La evolución de este proceso erosivo genera las llamadas cárcavas, donde con suficiente volumen de agua, la descarga alcanza el canal con una estructura bien definida, introduciendo una carga de sedimentos transportados en cauce, como ilustra la Fig.1.2.b Si la velocidad del agua se reduce, por motivos como cambios de pendientes o ensanchamiento del cauce, algunas partículas de sedimento se depositan en el fondo, debido a la disminución de su capacidad de transporte, definida como la cantidad máxima de sedimentos que el flujo puede transportar sin

que se produzca depósitos, controlando por tanto la relación erosión-deposito (Bussi, 2014). El flujo de sedimentos que se genera aguas arriba de un punto en una cuenca, que pasa a través de una sección transversal durante un tiempo específico es conocido como degradación específica (*specific yield*) (Sanz y col., 1997), siendo un concepto equivalente al del caudal líquido, y por lo mismo suele tener una importancia similar.

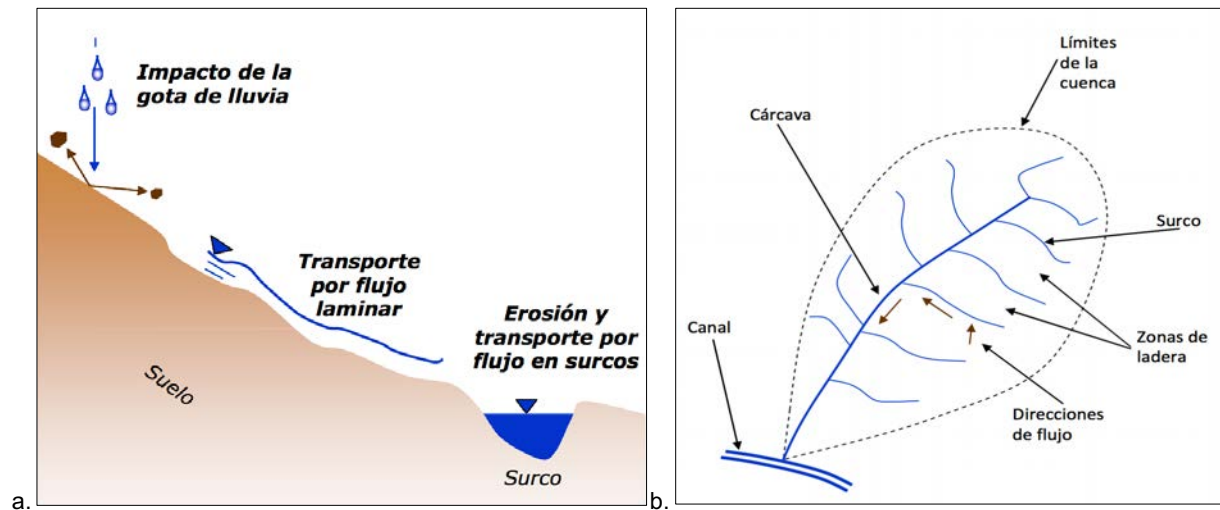


Figura 1.2. Proceso de erosión y transporte en ladera (a) y Fuentes de sedimento en una cuenca (b) (Tomado de: Bussi, 2014).

Los embalses suelen afectar el normal comportamiento de los cursos de agua y su carga de sedimento. Cuando estos se encuentran con el agua retenida por el embalse su velocidad de flujo disminuye, reduciendo en gran medida su capacidad de transporte (Cobo, 2008), provocando que gran parte de los sedimentos queden atrapados en el embalse acumulándose con el tiempo, lo que a largo plazo reduce su capacidad de almacenamiento, muchas veces a una velocidad muy alta, reduciendo drásticamente su tiempo de vida útil (Bussi, 2014; Verstraeten y col., 2003).

Por motivos como el anterior, la modelización del ciclo de sedimentos ha cobrado interés en los últimos años, junto a la importancia que tienen los procesos de producción y transporte de sedimentos en el sistema hídrico natural. Considerando la modelización de variables temporales como la degradación específica sea fundamental. Al igual que en la modelización hidrológica, debido a las diferentes conceptualizaciones y abstracciones, muchos modelos de erosión y transporte se han desarrollado, enfocando el proceso en diferentes escalas temporales y espaciales, por lo que se cuenta también con una amplia gama de modelos como los descritos en Bussi (2014).

1.6. Cambio Climático

Se conoce como Cambio Climático al resultado del desequilibrio en el balance energético de la Tierra causado por procesos y agentes naturales y/o antropogénicos. Con cierta incertidumbre, se asume que la influencia humana es la causa dominante de más de la mitad del cambio observado en la temperatura media global en el periodo 1950-2010. Se estima que los llamados gases de efecto invernadero han producido un aumento de entre 0.5 y 1.3 °C, y los aerosoles han producido un enfriamiento de entre -0.6 y 0.1 °C. Mientras que las causas naturales han producido un cambio de entre -0.1 y 0.1 °C, considerando todas las contribuciones evaluadas son consistentes con el calentamiento observado de

aproximadamente 0.6 °C en dicho periodo. Con efectos como: la fusión de hielo y nieve, el calentamiento de los océanos, la elevación del nivel del mar, alteraciones en la magnitud y frecuencia de extremos climáticos, que ya han sido observado en la segunda mitad del siglo XX, con un gran impacto en los sistemas de recursos hídricos (Rodríguez y col., 2014).

El nivel de certeza al medir la influencia humana estimada por el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) ha ido aumentando sucesivamente en sus Informes de Evaluación (AR, por sus siglas en inglés). En el AR3 (2001) se estimaba que la probabilidad fuera superior al 66%, en el AR4 (2007), esta cifra subió al 90% y en el más reciente AR5 (2014) supera el 95% de certeza (Rodríguez y col., 2014).

Los cambios en el balance energético del planeta producidos por diversas fuentes se expresan en lo que se denomina Forzamiento Radiactivo (FR), siendo los valores positivos indicadores de calentamiento mientras los negativos de enfriamiento. Se estima que el FR producido por el hombre desde 1750 es de aproximadamente 2.3 W/m² lo que se traduce en una ganancia neta de energía por parte del sistema climático. El factor que contribuye en mayor medida al FR es el aumento en la concentración atmosférica de CO₂, junto a los otros gases llamados de efecto invernadero (CH₄, N₂O, Halocarbonados). Por su parte, los aerosoles y su interacción con las nubes producen un efecto negativo, pero la reducción en el uso de estos, por sus efectos nocivos para otras aspectos, como la capa de ozono, a contribuido un aumento positivo en el FR, y han generado mayor incertidumbre en la estimación de los efectos antropogénicos. La Fig. 1.3 muestra un resumen de los principales factores influyentes (Rodríguez y col., 2014).

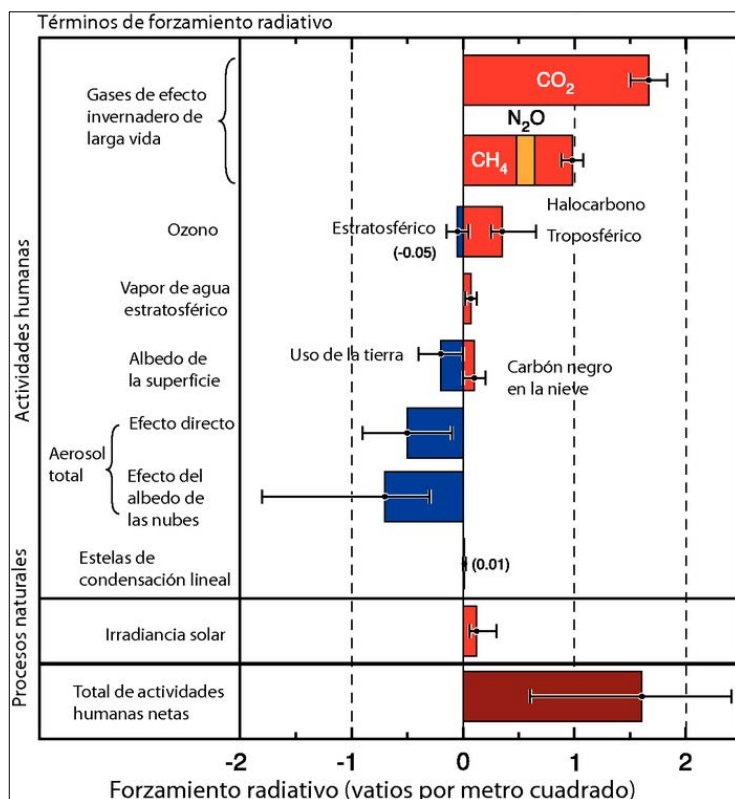


Figura 1.3. Resumen de los componentes principales del forzamiento radiactivo del cambio climático (Tomado de: IPCC, 2017).

1.6.1. Modelos climáticos

Para el estudio del efecto futuro del aumento del FR y la dinámica de sus componentes, el IPCC ha definido en el AR5 las denominadas Sendas Representativas de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés) (Rodríguez y col., 2014). Planteándose 4 escenarios definidos en función del aumento del FR estimado para el 2100: RCP 2.6 que representa un escenario de mitigación con un nivel de forzamiento bajo, RCP 4.5 y RCP 6.0 que representan escenarios de estabilización, y RCP 8.5 que trata de representar un nivel en aumento, acorde con lo que sucede actualmente (Stocker y col., 2014).

Los cambios producidos por el aumento del FR no se producen de manera homogénea en el planeta, y al igual que en muchos otros campos, los modelos constituyen la principal herramienta para representar de manera distribuida los efectos físicos de dichos cambios, que se reflejan principalmente en variaciones de temperatura y precipitación. Así por ejemplo, en el escenario RCP 8.5 la precipitación media disminuye en muchas regiones secas de latitud media y subtropical, mientras en regiones húmedas de latitud media la probabilidad de precipitación aumente, como se puede observar en la Fig. 1.4 (IPCC y col., 2014).

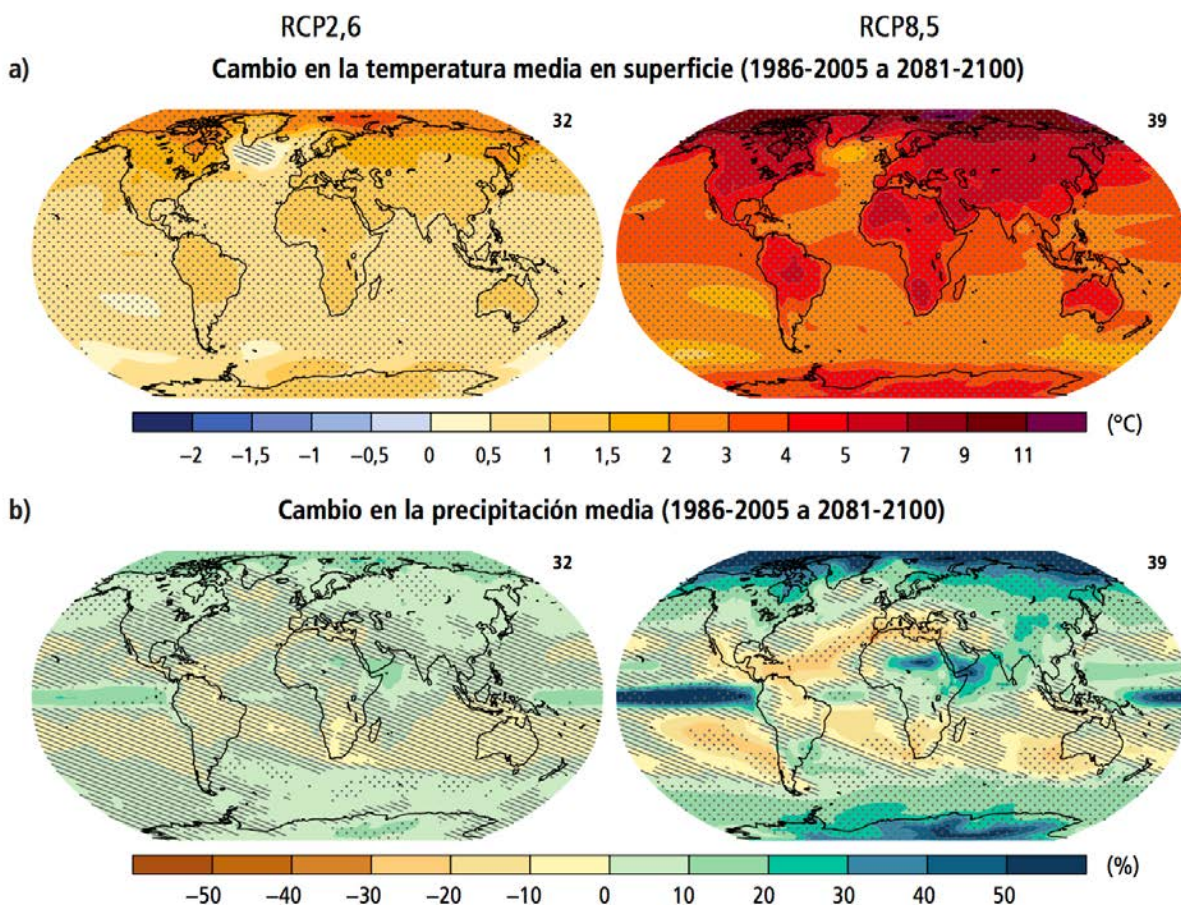


Figura 1.4. Cambio en la temperatura media en superficie (a) y cambio en la precipitación media (b) sobre la base de las proyecciones de la media de múltiples modelos para 2081-2100 en relación con 1986-2005 bajo los escenarios RCP 2.6 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha) (Tomado de: IPCC y col., 2014).

Para ello se utilizan los llamados Modelos Climáticos de Circulación General (MCG) que trabajan a escala global, siendo representaciones matemáticas de la naturaleza, utilizando las ecuaciones, leyes y principios de la física que rigen el clima de la Tierra. Por su resolución numérica son capaces de proporcionar simulaciones realistas únicamente a gran escala, dividiendo la superficie de la tierra en mallas de entre 300 a 500 km de extensión en latitud y longitud (Morata, 2014; Sanabria y col., 2009).

Los diferentes parámetros que manejan los MCG son calibrados utilizando información correspondiente a los componentes principales del FR y a los registros meteorológicos que se llevan desde hace casi un siglo, obteniendo una representación del pasado, conocida como Periodo de Control. Una vez calibrados y validados, como cualquier otro modelo, se modifica en estos los diferentes niveles de FR estimados en cada escenario RCP, obteniendo las representaciones meteorológicas de cada caso.

El principal inconveniente de los MCG es su escasa resolución espacio-temporal, que no permite detectar cambios en áreas como costas o regiones de topografía pronunciada, ni fenómenos de lluvias intensas en valles, limitando los resultados a valores medios en áreas muy extensas y con una alta incertidumbre, dificultando el trabajo a nivel local y muchas veces derivando en resultados que no son congruentes con las condiciones específicas del medio.

1.6.2. Métodos de regionalización

Para solventar los problemas relacionados a la escala de los MCG, y hacer un correcto uso de la información proveniente de estos a nivel local, se han desarrollado diferentes métodos de regionalización o *downscaling*, que mejoran la calidad de la información disponible, aumentando su resolución. Actualmente se utiliza fundamentalmente técnicas basadas en métodos estadísticos y dinámicos, en función de las condiciones locales y la información disponible (Morata, 2014; Sanabria y col., 2009).

Regionalización estadística

Este método consiste en encontrar relaciones empíricas entre las variables de las simulaciones globales y las variables a escala regional, donde se tienen características climáticas conocidas. Se fundamenta en tratar de encontrar la función de transferencia adecuada entre el estado climático a gran escala y las características fisiográficas regionales (Morata, 2014).

El método análogo es una técnica de regionalización estadística que se basa en la hipótesis de que configuraciones meteorológicas similares dan lugar a fenómenos meteorológicos similares. Para ello primero se selecciona una serie de variables predictoras eficaces y luego se formula una medida de similitud que extrae de estas la mayor cantidad posible de información de los campos estudiados (Morata, 2014).

La regionalización estadística puede estar también basada en técnicas de regresión estocástica (SDSM, por sus siglas en inglés), que permiten establecer relaciones empíricas entre las variables a escala regional a partir de las variables a escala global. Para ello se utiliza un modelo condicional que incluye un proceso estocástico que determina la probabilidad de ocurrencia del evento (Morata, 2014).

Regionalización dinámica

Estas técnicas de regionalización proporcionan una descripción de la atmósfera que considerando todas las variables del medio, mediante la utilización de los llamados Modelos Climáticos Regionales (MCR). Mejoran los resultados obtenidos de los MCG en regiones donde existen forzamientos debidos a orografías complejas, contrastes de tierra-mar, usos de suelo, entre otros, permitiendo distinguir la señal de cambio climático de los forzamientos orográficos. Trabajan utilizando un dominio de menor resolución al de un MCG, utilizando la información de estos como condiciones iniciales y de frontera (Morata, 2014).

1.7. Metodología

A la vista de los objetivos y de la revisión anterior, se plantea la siguiente metodología para cada apartado del presente trabajo. Comenzando con la estimación de pérdidas en el cauce, que buscan una mejor representación hidrológica de la cuenca, que favorece a una mejor implementación del submodelo sedimentológico y mejores resultados en la modelización del transporte de sedimentos. Finalmente, con el modelo TETIS implementado adecuadamente, y utilizando información proveniente de los MCG, se estima los efectos del Cambio Climático sobre la cuenca de la Rambla de la Viuda. Se observa pues que la metodología planteada permite una retroalimentación, pues cada objetivo alcanzado es necesario para el alcance del siguiente.

1.7.1. Estimación de pérdidas en cauce

La estimación de pérdidas se plantea en este trabajo considerando metodologías previas (Lane, 1990; Lane y col., 1980; Thornes, 1976) que relacionan el fenómeno con la geometría del cauce y su litología utilizados estos como parámetros. Estimar de manera global las pérdidas en la cuenca es el primer paso a llevar a cabo. Para ello, se resta un caudal constante al caudal que el modelo simula en la salida de la cuenca, mediante ensayos de prueba de error que modifican el hidrograma buscando que este sea más acorde al observado y maximizan el valor de estadísticos que valoran de manera cuantificada el desempeño del modelo. El valor óptimo de este caudal es una primera aproximación a las pérdidas globales (GL).

Con una idea de la magnitud global de las pérdidas, lo siguiente es identificar las posibles zonas donde se producen, para representar la distribución espacial del proceso, identificando los tramos de cauce afectados. Esto mediante el uso de información disponible, como mapas que indiquen características litológicas relacionadas.

La magnitud de pérdidas que se producen en cada tramo se calculan relacionándolas de manera directa con el área del cauce. Considerando que, a mayor área afectada, mayor es la magnitud de las pérdidas que se producen en cada zona. Acorde a las metodologías previas y que tiene sentido también desde un punto de vista hidráulico, considerando que el caudal que circula por una sección está relacionado de manera directa con la superficie de esta. Planteándose una relación de proporcionalidad, que se transforma en igualdad mediante la aplicación de una constante, que en este caso representa la magnitud con la que se da el fenómeno.

Esta relación se puede representar mediante la Ec. 1, donde las GL son la suma de las pérdidas locales (LL) en el número (n) de tramos afectados, que son el producto de su área (Ap) por la magnitud de las pérdidas representadas por un parámetro F que estaría en m/s, representando la velocidad del proceso de infiltración. Se puede considerar que la magnitud del

proceso es homogéneo en la cuenca, y sacar F de la sumatoria al ser constante, y este puede calibrar junto a los otros parámetros del modelo.

$$GL = \sum_{i=1}^n LL_i = \sum_{i=1}^n F \cdot Ap_i = F \cdot \sum_{i=1}^n Ap_i \quad (1)$$

1.7.2. Modelización de transporte de sedimentos

A diferencia de la modelización hidrológica, donde la mayoría de las cuencas cuentan con registros de datos provenientes de estaciones aforos o balances de embalses, en la modelización del ciclo de sedimentos pocas veces se suele tener registros los volúmenes que circulan a lo largo de la cuenca, siendo este el caso de la Rambla de la Viuda, lo que puede llegar a dificultar el proceso. Este inconveniente suele tratar de solventarse mediante el uso de mediciones indirectas (*Proxy data*), como los volúmenes de sedimento acumulados en los embalses, por procesos de aterramiento en embalses, ocasionados por la reducción de la velocidad del flujo en la entrada del embalse, reduciendo su capacidad de transporte y provocando acumulación de material.

Este trabajo centra su metodología en ello, utilizando estas mediciones indirectas para estimar el caudal de sedimentos producidos y transportados hasta un embalse dentro de la cuenca. Utilizando el volumen de sedimentos acumulados en un periodo de tiempo, que se puede obtener a partir de información batimétrica disponible, restando la capacidad del embalse medida más recientemente de otra medida un tiempo atrás, al inicio del periodo.

Sin embargo se debe considerar que el volumen de sedimento acumulado en el embalse no representa el total del volumen de sedimentos producidos y transportados por la cuenca hasta ese punto, debido a que no todo que llega ahí el sedimento queda atrapado en el embalse, pues una parte continua su movimiento aguas abajo. Además, su volumen varía en el tiempo, debido a la presión ejercida sobre el mismo, por el peso del sedimento más reciente acumulado y del agua contenida en el embalse, en proceso que se conoce como consolidación.

Conocido el volumen de sedimento transportado, se puede utilizar el mismo para calibrar un modelo de sedimentos, como el submodelo incorporado a TETIS, lo que nos permite obtener otra información, como un sedimentograma, que nos brinda información sobre la variación en el tiempo del ciclo sedimentológico y procesos como el aterramiento del embalse.

1.7.3. Cambio Climático

La evaluación de los posibles efectos del Cambio Climático en los sistemas hídricos se lleva a cabo mediante un procedimiento casi estandarizado, que consiste en evaluar la información meteorológica generada por los MCG, en la mayoría de casos regionalizada previamente, utilizando un modelo hidrológico, calibrado previamente utilizando información meteorológica observada. Se comparan los resultados obtenidos de la modelización utilizando la información correspondiente al Periodo de Control con los resultados obtenidos utilizando la información de los diferentes escenarios RCP. Así se evalúan, por ejemplo, valores medios mensuales de caudales, que indican las diferentes variaciones temporales.

Se debe aclarar además, que los resultados obtenidos con los diferentes escenarios (como caudales) no son comparados de manera directa con la información observada pues los primeros, a pesar de ser una buena representación climática, acarrean consigo errores relacionados a la conceptualización de los MCG, que no son consideradas en los segundos,

por lo que las diferencias en los resultados no engloban únicamente los efectos del FR. Al compararlos con los resultados provenientes del Periodo de Control, que conllevan la misma conceptualización, y las diferencias entre los resultados de ambos periodos se pueden atribuir únicamente a los efectos del Cambio Climático.

Un inconveniente común en los estudios de los efectos de Cambio Climático en los sistemas hídricos es la presencia de errores que suelen presentarse de manera sistemática y aleatoria en los resultados de las simulaciones de los MCG o sus regionalizaciones que suelen presentarse de manera sistemática y aleatoria en los resultados de las simulaciones de los MCG o sus regionalizaciones, subestimando las variables climáticas, o provocando errores estacionales (Teutschbein y Seibert, 2013), definidos como sesgo (*bias*) en el contexto de estudios de Cambio Climático. Provocados normalmente por la insuficiente resolución de los MCG y las abstracciones de las técnicas de regionalización. Varios métodos de corrección han sido desarrollados por diferentes autores (Ahmed y col., 2013, 2013; Gudmundsson y col., 2012) para tratar de solventar este problema que suele ser muy frecuente, principalmente en cuencas con climas particulares, como las de las ramblas mediterráneas.

CAPÍTULO II. CASO DE ESTUDIO

2.1. Descripción del área de estudio

La cuenca de la Rambla de la Viuda, con un área de drenaje de 1513 Km² está ubicada al este de España, casi en su totalidad dentro de la Comunidad Autónoma de Valencia (Fig. 2.1.a), formada por la confluencia del Río Monleón y la Rambla Carbonera, compone un afluente del margen izquierdo del Río Mijares en las proximidades de su desembocadura en el Mar Mediterráneo, ocupando más de la tercera parte del área total de la cuenca de ese río. Dentro de la misma se encuentran los embalses de M^a. Cristina y Alcora (Fig. 2.1.b), con una superficie de 247.2 y 26 ha y respectivamente, construidos con fines de regulación y aprovechamiento del recurso (Mateu, 1974).

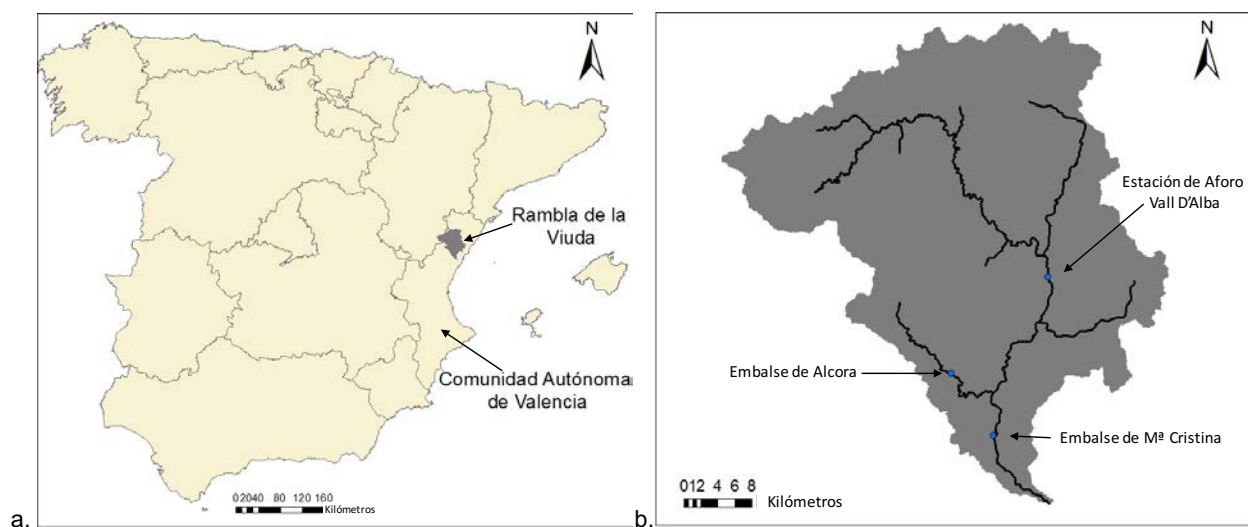


Figura 2.1. Ubicación en España de la cuenca de la Rambla de la Viuda (a). Cuenca de la Rambla de la Viuda (b).

2.1.1. Topografía

Presenta una orografía compleja que atraviesa montañas, mesetas y valles, con un relieve muy variado, que va de los 38 a los 1751 m.s.n.m (Fig 2.2.a), sin embargo el 95% de su superficie se encuentra sobre los 200 m.s.n.m, más de la mitad sobre los 600 m.s.n.m y aproximadamente el 25% sobre los 1000 m.s.n.m, lo que alcanza relevancia considerando el nivel de su desembocadura en el Río Mijares y su distancia a la costa, que es de apenas 63 Km (Mateu, 1974; Sánchez, 2015).

2.1.2. Clima

La Rambla de la Viuda presenta un clima mediterráneo tradicional, con una temperatura que disminuye con el aumento en la altitud (Fig.2.2.a) lo que le permite presentar una gama de transiciones climáticas que contrastan con la circulación general del medio, debido al efecto de las cadenas montañosas que la protegen de las influencias marinas evitando que las temperaturas extremas se agudicen, a pesar de que se hacen presentes a lo largo de las diferentes estaciones (Mateu, 1974; Sánchez, 2015).

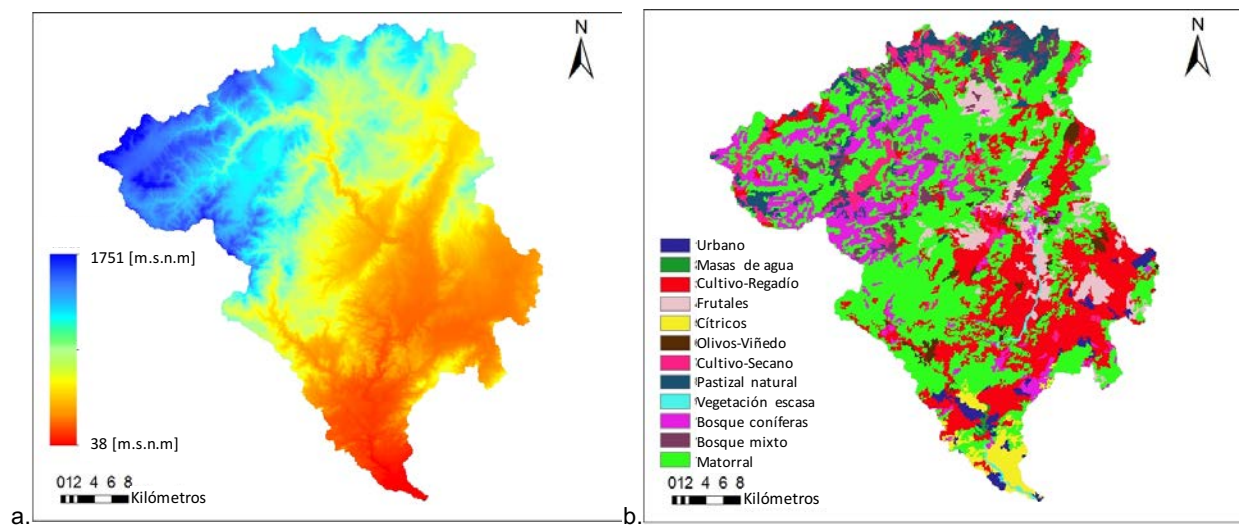


Figura 2.2. Modelo de elevación digital (a) y Mapa de uso de suelos (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

2.1.3. Suelos

El suelo es la capa superficial de la corteza terrestre (Crespo, 2004) formada por la interacción entre la litósfera, atmósfera, hidrósfera y biosfera, que puede clasificarse en diversos grupos dependiendo de los parámetros que intervienen en su génesis. La cuenca de la Rambla de la Viuda está formada mayoritariamente por: Leptosoles, suelos muy superficiales y de poco espesor, formados sobre roca dura, normalmente en laderas de fuerte pendiente, muy aptos para la agricultura; Calcisoles, formados bajo condiciones áridas que presentan alternancia entre periodos secos y húmedos que favorecen la precipitación de carbonato cálcico; y en menor medida Cambisoles, que son suelos minerales muy aptos para la agricultura (Sánchez, 2015)

2.1.4. Uso del suelo

El área de la cuenca presenta pocas zonas urbanas e industriales (4% del total), está cubierta por 96121 Ha de vegetación natural (60% del total) de las cuales tres cuartas partes corresponde a matorral y el cuarto restante a bosque. La superficie cultivada cubre una extensión de 53429 Ha (35% del total) de las cuales el 85% corresponde a regadío de frutas y cítricos, y el 15% restante a secano. Los humedales y masas de agua ocupan un área inferior al 1% del total de la cuenca. Una distribución más detallada se aprecia en la Fig. 2.2.b (Sánchez, 2015).

2.1.5. Geología

La cuenca de la rambla abarca: el sector suroriental de la Zona Central Subtabular Maestrazgo, la franja suroccidental de la Zona Oriental Fallada y una pequeña área nororiental de la Zona Meridional Diapírica, como se puede ver en la Fig. 2.3.a en su parte central los estratos se presentan horizontales y sin deformación por el plegamiento, constituyéndose una zona tabular que ha formado un relieve abrupto. En la zona oriental, existe un sistema de fallas escalonadas paralelas a la costa, constituidas por bloques cretácicos y jurásicos separados por valles de materiales cuaternarios (Fig. 2.3.c) (Sánchez, 2015).

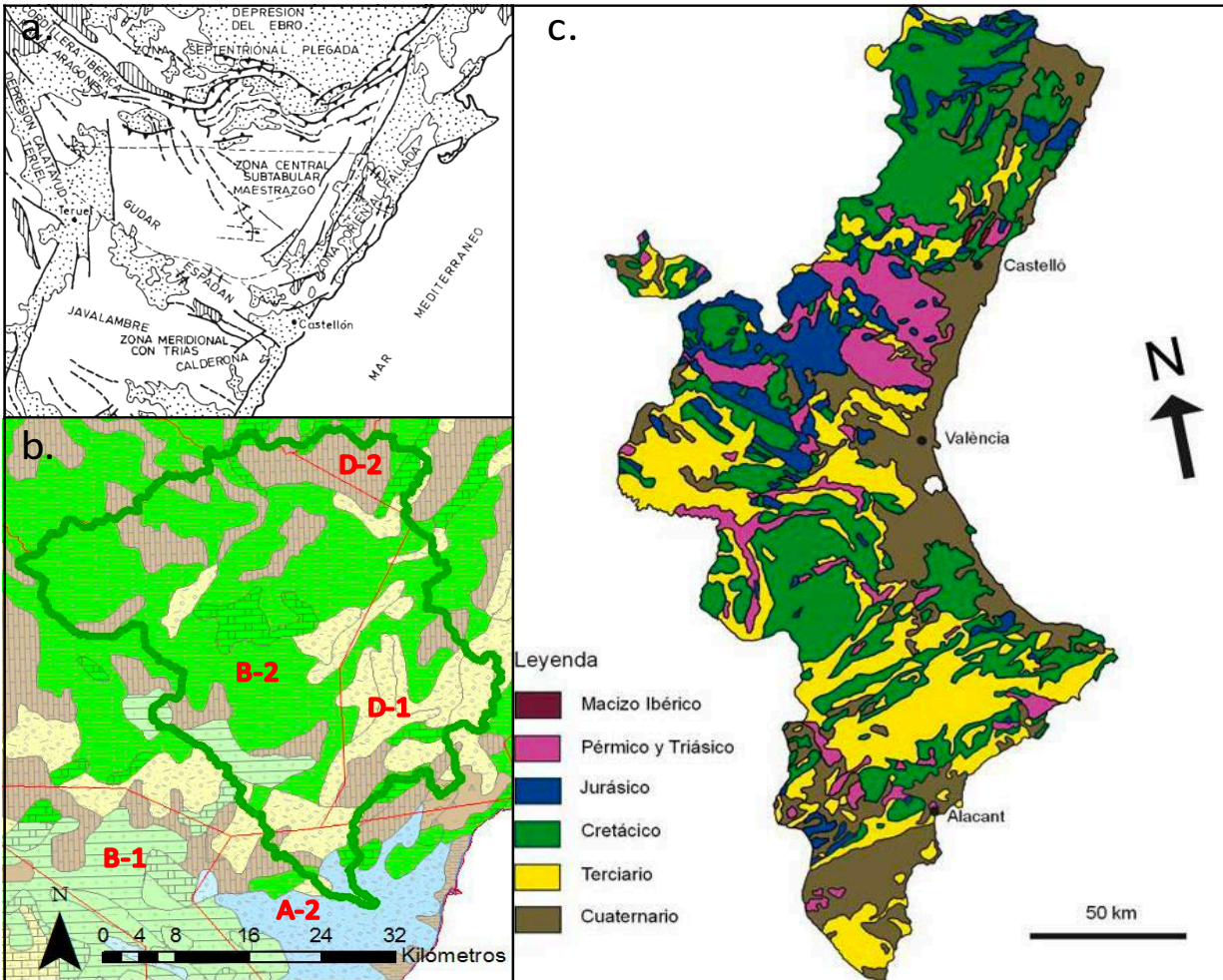


Figura 2.3. Mapa geomorfológico (a) (Tomado de: Sos y Sanfeliu, 1983), Mapa hidrogeológico continuo (b) (Tomado de: IGME, 2017) y Esquema geológico regional en la comunidad Valenciana (c) de la zona de ubicación de la Rambla de la Viuda (Tomado de: IGME, 2017).

Como ya se dijo, la cuenca presenta una litología particular, con un suelo formado por un alto porcentaje de roca caliza (Segura y Camarasa, 1996) vulnerable a que el agua disuelva de manera indirecta el carbonato cálcico que la forma. Este proceso de meteorización a formado grandes áreas de relieve kárstico, la cuenca de la Rambla de la Viuda y su cauce se encuentra ubicada sobre grandes zonas kársticas (Fig. 2.4) que facilitan el proceso de infiltración al acuífero.

2.1.6. Hidrogeología

Las formaciones permeables de la zona y su disposición (Fig.2.3.c) favorecen la presencia de unidades hidrogeológicas como ilustra la Fig. 2.3.b, aunque con dificultades en su conexión con la red fluvial para dar origen a caudales permanentes. Una pequeña parte de la cuenca al sur se encuentra en la zona A-2 que representa Formaciones Detríticas Permeables No Consolidadas, con acuíferos extensos, locales y discontinuos, de permeabilidad y producción moderada; la zona B-1 que representa Acuíferos Muy Permeables, tiene un área pequeña al suroeste de la parte media de la cuenca, mientras que la zona B-2 presenta acuíferos extensos, locales discontinuos de permeabilidad y producción moderada. Estas dos zonas son Formaciones Carbonatadas Permeables por Fisuración-Karstificación; las Formaciones de Baja

Permeabilidad (D-1) y Impemeables (D-2) cubren también un área amplia de la cuenca (IGME, 2017; Sánchez, 2015).

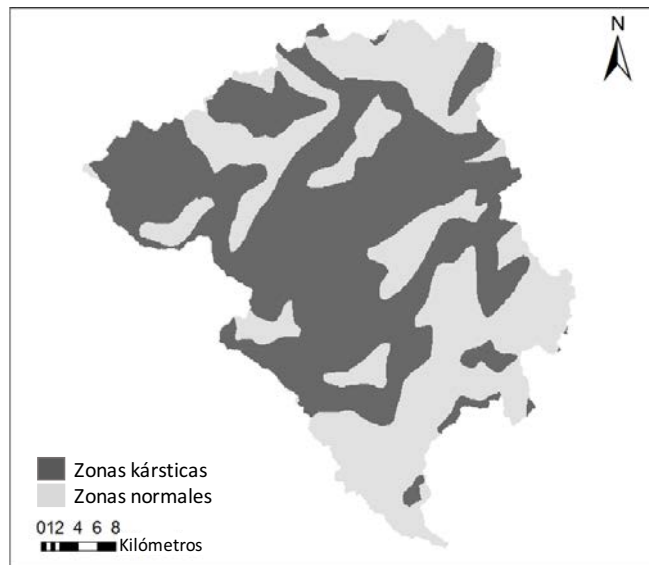


Figura 2.4. Mapa de zonas kársticas dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

2.2. Información meteorológica

2.2.1. Precipitación y temperatura

Los modelos hidrológicos se alimentan generalmente de información meteorológica observada como las series temporales de precipitación y temperatura, constituyéndose en variables temporales que permiten a los modelos lluvia-escorrentía el cálculo de la escorrentía superficial que produce una cuenca, lo que se traduce en el conocimiento del recurso disponible y la capacidad de administrarlo.

Para la cuenca de la Rambla de la Viuda, existen dos fuentes de información disponibles: datos puntuales de precipitación, procedentes de las estaciones pluviométricas de la red del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) que recoge información cincominutal desde el año hidrológico 1990-1991, sin embargo no cuenta con información de temperatura; y datos de precipitación y temperatura interpolados provenientes del proyecto Spain02 (SMG, 2017). La interpolación se realiza en malla a partir de la red de estaciones de la AEMET, contándose con dos versiones, la primera con resolución $0.2 \times 0.2^\circ$ cubriendo el periodo 1950-2008, y la segunda, resultado de una versión posterior (V.04), con una resolución más detallada de $0.11 \times 0.11^\circ$ en el intervalo 1971-2008.

Spain02 V.04 proporciona información interpolada en coordenadas acordes a la rejilla EURO-CORDEX (2017) aplicando el método geoestadístico Krigging Ordinario incorporando una ponderación areal de los valores, que permite la mayor resolución que en su versión anterior, utilizando datos de la red del AEMET (Herrera y col., 2010). El área de la cuenca se encuentra dentro de 20 polígonos formados por la rejilla usada por Spain02 V.04, los centroides de dichos polígonos utilizados en este estudio se pueden ver en la Fig. 2.5.

En el trabajo precedente de Sánchez (2015) se utilizó las tres fuentes disponibles para identificar cual era la más adecuada para trabajar en la cuenca de la Rambla de la Viuda,

implementando el modelo TETIS, siendo la proveniente de Spain02 V.04 la que mejores resultados producía. Por ello en este trabajo se ha considerado únicamente la información proveniente de esa fuente.

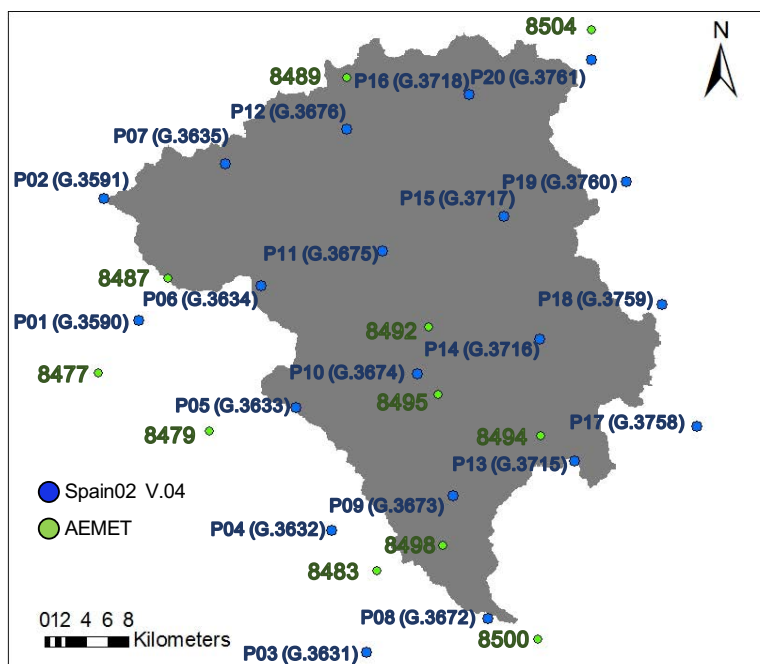


Figura 2.5. Distribución de la información meteorológica proveniente de Spain02 V.04. y estaciones de la AEMET con escenarios de Cambio Climático regionalizado en el área de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

La precipitación media anual de la cuenca en el periodo 1971-2000 es de 615.41 mm siendo el año más húmedo 1989, con 1268.23 mm mientras el año más seco es 1978, que apenas presentó 341.03 mm (Fig. 2.6). Esto muestra la gran variabilidad temporal que presenta el clima mediterráneo, como se puede probar también al revisar la Fig. 2.7, que representa la precipitación máxima diaria de cada año, y donde se puede ver que en el año 2000 se alcanza 147.25 mm/día mientras en el año 1978 apenas llega a 25.16, casi 6 veces menos.

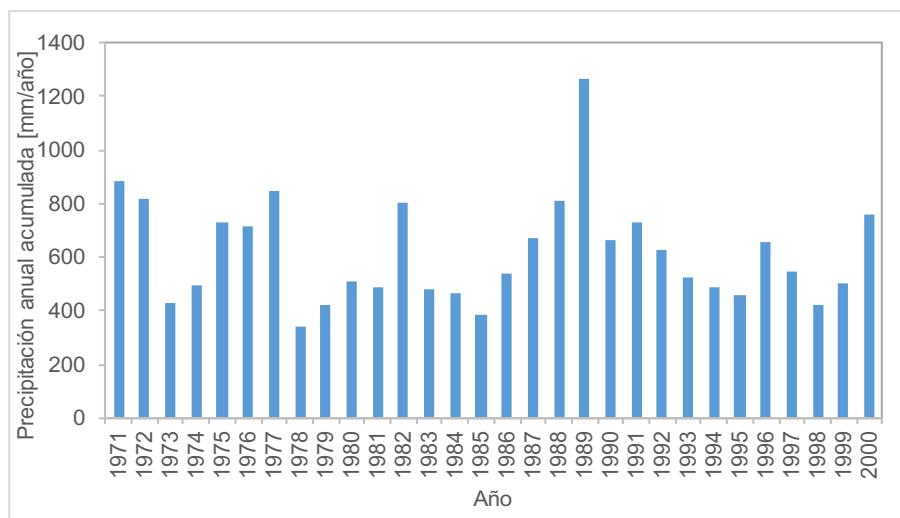


Figura 2.6. Precipitación anual media areal para el periodo 1971-2000 en la cuenca de la Rambla de la Viuda.

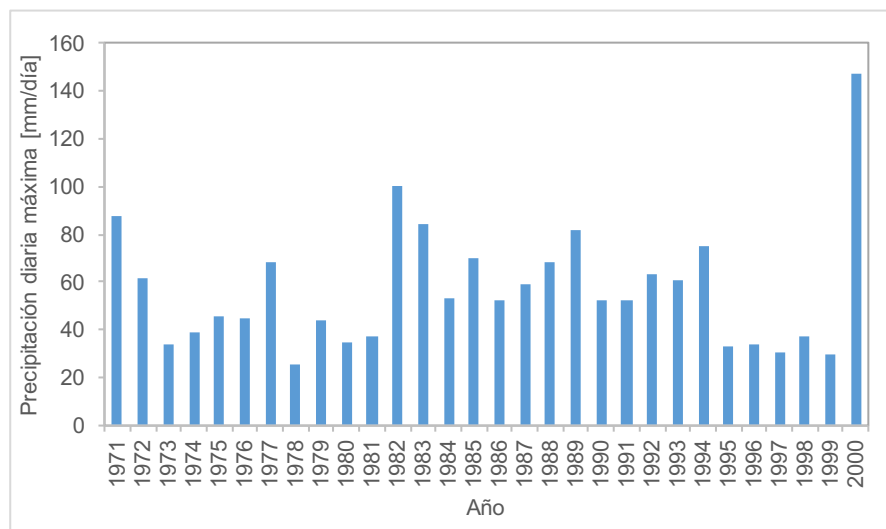


Figura 2.7. Precipitación diaria media areal máxima anual del periodo 1971-2000 en la cuenca de la Rambla de la Viuda.

El mes más húmedo es octubre, con una media de 82.80 mm/mes debido a las lluvias producidas por el fenómeno de la gota fría, mientras el más seco es julio con 24.64 mm/mes (Fig. 2.8.a) que además es el mes más cálido junto a agosto con temperaturas medias diarias máximas próximas a los 30 °C (Fig. 2.8.b). El mes más frío es enero, donde la temperatura media máxima alcanza apenas 14.16 °C y la media mínima llega a 2.33 °C.

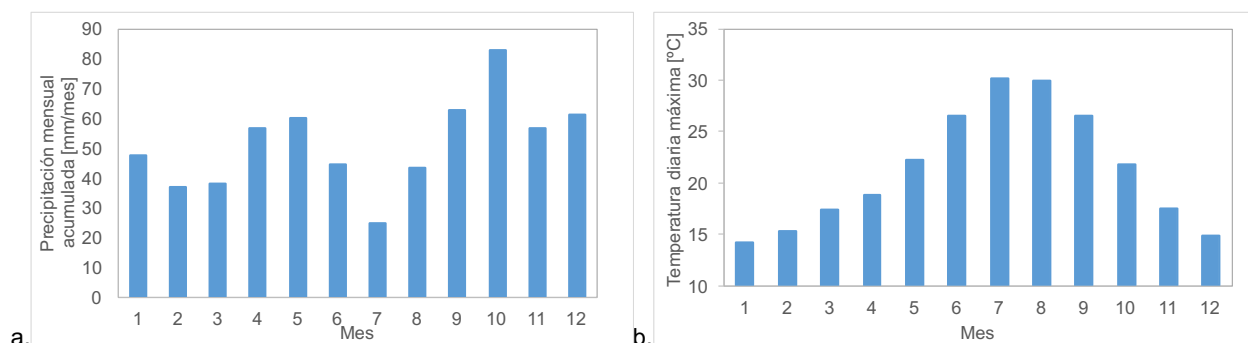


Figura 2.8. Precipitación media mensual media areal (a) y temperatura diaria máxima mensual media areal (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda en el periodo 1971-2000.

2.2.2. Información hidrológica

La cuenca de la Rambla de la Viuda cuenta con una estación de aforo del SAIH ubicada en el municipio de Vall d'Alba, en la provincia de Castellón, tiene una cuenca receptora de 910 km² que se emplaza posteriormente en la confluencia del Río Monleón con la Rambla de Vida (Fig. 2.1.b). Se cuenta además con información disponible del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), de niveles y salidas en los embalses de M^a. Cristina y Alcora (Fig. 2.1.b) con los que se puede estimar el caudal entrante en los mismos mediante un balance de recursos disponibles (CEDEX, 2017). Estos se pueden contrastar con observaciones de entradas y salidas disponibles en la red del SAIH.

Analizando el periodo 1971-2000 en el embalse de M^a. Cristina (Fig. 2.9), se observa una aportación anual media de 21.51 Hm³/año, con un contraste entre periodos secos muy

prolongados, en los que algunos años apenas superan los 5 $\text{Hm}^3/\text{año}$, habiendo 5 años en los que no se supera 1 $\text{Hm}^3/\text{año}$ teniendo el más seco apenas 0.21 $\text{Hm}^3/\text{año}$ y periodos de años húmedos con aportaciones superiores a los 50 $\text{Hm}^3/\text{año}$, teniéndose incluso años con aportaciones a los 100 $\text{Hm}^3/\text{año}$, alcanzando una aportación máxima 157 $\text{Hm}^3/\text{año}$, estos están generalmente asociados a eventos de crecidas en la cuenca.

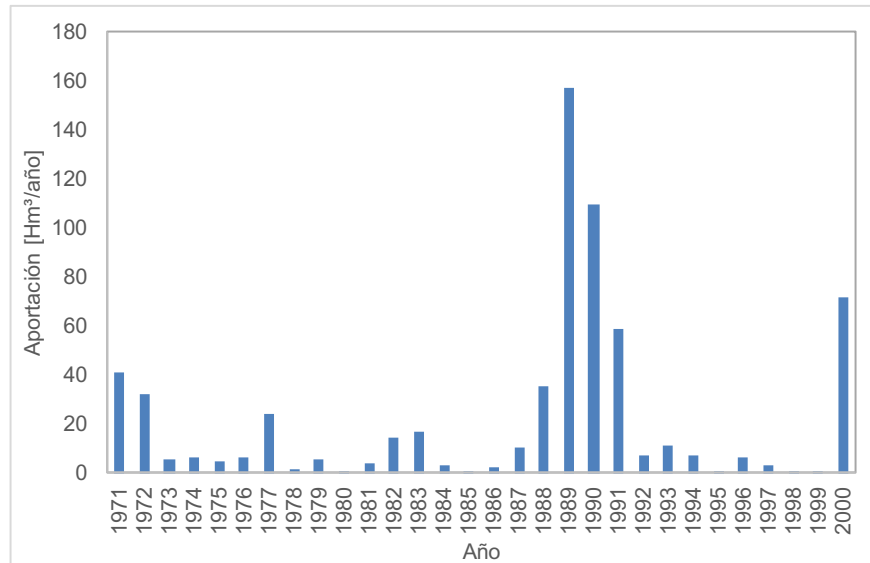


Figura 2.9. Aportaciones anuales del embalse de M^a. Cristina en el periodo 1971-2000.

El embalse de Alcora presenta un comportamiento similar al de M^a. Cristina, con periodos secos alternándose con periodos húmedos, pero sin un contrastante tan marcado debido a una mayor inercia de los manantiales vertientes. La aportación media anual en el periodo 1980-2000 es de 14.07 $\text{Hm}^3/\text{año}$, donde los años húmedos están en torno a los 30 $\text{Hm}^3/\text{año}$, alcanzándose en el más húmedo del periodo los 63.13 $\text{Hm}^3/\text{año}$, mientras que en el periodo seco, varios años no sobrepasan 1 $\text{Hm}^3/\text{año}$, como se puede ver en la Fig. 2.10.

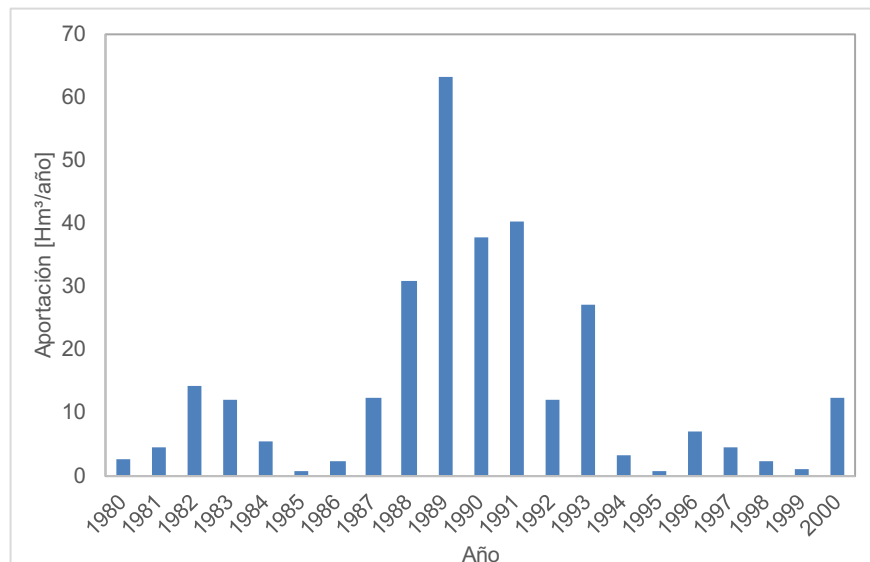


Figura 2.10. Aportaciones anuales del embalse de Alcora en el periodo 1980-2000.

Las aportaciones medias mensuales en el embalse de M^a. Cristina son de 1.79 Hm³/mes mientras que en Alcora son de 1.17 Hm³/mes, siendo este más homogéneo a lo largo del año. Sus aportaciones principales se dan en otoño, que es cuando se presentan los principales eventos de precipitación (Fig. 2.8.a), en ambos casos, los meses de verano son los más secos, coincidiendo con los de temperaturas más altas (Fig. 2.8.b) como se puede observar la Fig. 2.11.

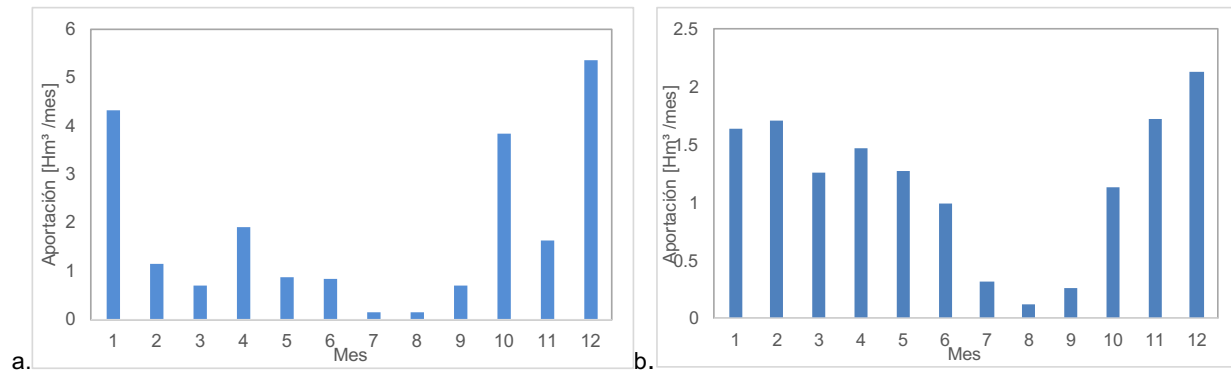


Figura 2.11. Aportaciones medias mensuales de los embalses de: de M^a. Cristina (periodo 1971-2000) (a) y Alcora (periodo 1980-2000) (b).

Los datos de entrada al embalse de M^a. Cristina obtenidos por balance de la información proveniente del CEDEX y los aforados por el SAIH coinciden en la mayor parte del periodo de tiempo, sin embargo, existen casos en los que las entradas obtenidas por balance son mayores a las observadas, lo que quiere decir que las salidas son mayores a las registradas por el CEDEX, lo que indica la existencia de pérdidas en el embalse. La Confederación Hidrográfica del Júcar, a la que pertenece este embalse, atribuye estas pérdidas a procesos de infiltración debido a la ubicación del embalse, sobre la Cueva de las Maravillas (Puch, 1998).

2.3. Información batimétrica

EL CEDEX realizó en el pasado reconocimientos batimétricos de los embalses de España, principalmente en cuencas con un aporte importante de sedimentos, con el fin de actualizar las curvas de capacidades de los embalses, medir los volúmenes de materiales sedimentados y determinar su densidad y otras propiedades (CEDEX, 2001). Para este trabajo se cuenta con dos informes de estudios realizados en el embalse de M^a. Cristina, sobre su capacidad útil preparados en dos fechas diferentes, el primero en junio de 1991, y un segundo en noviembre de 2000, justo después del evento de gran magnitud que se produjo en el embalse, y que incluso lo dañó. La información más importante a rescatar de estos informes es la capacidad inicial del embalse, 28 Hm³, tras su construcción en el año 1920; y la capacidad medida durante la realización de los estudios, 19.586 Hm³ en el más antiguo y 18.447 Hm³ en el más reciente. Estos datos nos pueden dar información sobre la antigüedad de los sedimentos y la velocidad en la que se dan los procesos de aterramiento en el embalse, permitiéndonos modelizar los procesos de sedimentación en la cuenca.

2.4. Información espacial

TETIS es un modelo distribuido, por tanto, para su implementación es necesario el uso de información espacial distribuida adecuada, que suele estar representada cartográficamente, y como la mayoría de la información actual, se encuentra disponible de manera digital, siendo los

Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) el formato preferente. La Tabla 2.1 resume la información disponible, la escala de la misma y su fuente.

Tabla 2.1. Mapas utilizados para la estimación de parámetros espaciales de TETIS.

| Fuente | Mapas | Escala/Pixel | Parámetros estimados |
|--|---|--------------|---|
| Instituto Geográfico Nacional | Modelo de Elevación Digital (MED) | 100 [m] | Modelo de elevación digital [m.s.n.m] |
| | | | Pendientes [m/m] |
| | | | Direcciones de flujo [-] |
| | | | Celdas drenantes acumuladas [-] |
| CORINE land cover 2006 | Mapa de uso de suelo | 1:100000 | Velocidad superficial [m/s] |
| | | | Códigos de cubierta del suelo [-] |
| Base de datos de Suelos de Europa | Agua disponible en la capa superior Obstáculo de raíces Textura superficial | 1:1000000 | Almacenamiento estático del suelo [mm] |
| | | | Capacidad de infiltración [mm/hr] |
| | | | Capacidad de percolación [mm/hr] |
| | Contenido de arena Contenido de limo Contenido de arcilla | 1000 [m] | Conductividad hidráulica del interflujo [mm/hr] |
| | | | Contenido de arena [%] |
| | | | Contenido de limo [%] |
| Instituto Geológico y Minero de España | Factor K (de erosión) | 500 [m] | Contenido de arcilla [%] |
| | Factor C (cobertura) | 100 [m] | Factor K (de erosionabilidad) [-] |
| | Factor P (uso del suelo) | 1000 [m] | Factor C (de cultivo) [-] |
| | | | Factor P (de prácticas de conservación) [-] |
| Plan Nacional de Ortofotografía | Mapa de zonas kársticas | 1:1000000 | Zonas kársticas [%] |
| | Mapa Litoestratigráfico | 1:200000 | Conductividad hidráulica del acuífero [mm/hr] |
| Confederación Hidrográfica del Júcar | Ortofotos | 0.25 [m] | Área del cauce [m ²] |
| | Relación flujo superficial subterráneo de ríos | 1:100000 | Área de cauce perdedora [m ²] |

2.5. Escenarios climáticos regionalizados para España

La AEMET, como unidad responsable del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), a través de su sitio web pone a disposición pública escenarios climáticos regionalizados para la geografía española. Esta información se ha ido actualizando junto a los Informes de Evaluación del IPCC, presentando la correspondiente al último informe AR5, y manteniendo disponible la información del AR4 y de otros proyectos, como el europeo ENSEMBLES (AEMET, 2017; FIC, 2017). Para este trabajo se ha decidido trabajar únicamente con la información correspondiente al AR5, por ser la más actualizada, y por tanto la más fiable.

El proceso de regionalización llevado a cabo por el AEMET utiliza como información de partida: los valores observados de la red de estaciones meteorológicas del SAIH; y los resultados de varios MCG que forman parte del AR5 (Tabla 2.2). Generando series temporales de precipitación, temperatura máxima y mínima, a escala diaria, en dos periodos; un primero, llamado de Control (1961-2000) cuyos resultados deben tener características similares a las observadas como: valores medios o probabilidad de ocurrencia; y un segundo periodo de Escenarios (2006-2100) que incluye 3 de los propuestos por el IPCC en el AR5: RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5, la disponibilidad de estos para cada MCG es variable. Utilizando para el proceso los métodos estadísticos antes descritos: análogos y SDSM. El proceso completo de regionalización se encuentra descrito en Morata (2014). La Fig. 2.5 muestra la ubicación de las 11 estaciones con información disponibles dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

Los valores medios mensuales de precipitación (Fig. 2.12.a) de los diferentes modelos disponibles muestran el cambio que se produce en los escenarios climáticos con respecto al periodo de control que representa el clima actual, habiendo disminución en casi todos los

meses en RCP 4.5 y RCP 6.0 representando una disminución proporcional, acorde a la medida de los cambios producidos en esos escenarios, mientras en RCP 8.5 se observa disminución en el periodo seco, y aumento de picos en el periodo húmedo, así como un desfase temporal, acorde a los cambios en eventos extremos de este escenario. Con respecto a las temperaturas, se puede ver un aumento acorde a las consideraciones de cada escenario, siendo mayor en el verano, donde normalmente se presentan las temperaturas más intensas.

Tabla 2.2. MCG y sus escenarios disponibles ("x", disponible. "-", no disponible).

| Modelo | Escenario RCP | | | Institución | País |
|---------------|---------------|-----|-----|---|----------------|
| | 4.5 | 6.0 | 8.5 | | |
| ACCESS1-0 | x | - | x | Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization - Bureau of Meteorology | Australia |
| ACCESS1-3 | - | - | x | | |
| Bcc-csm1-1 | x | x | x | Beijing Climate Center Administration | China |
| Bcc-csm1-1-m | x | x | x | | |
| BNU-ESM | x | - | x | Beijing Normal University | China |
| CMCC-CESM | - | - | x | European Research Center in Advanced Teaching on Scientific Computing | Unión Europea |
| CMCC-CM | - | - | x | | |
| CMCC-CMS | - | - | x | | |
| CNRM-CM5 | x | - | x | National Centre for Meteorological Research | Francia |
| CanESM2 | x | - | x | Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis | Canadá |
| CSIRO-Mk3-6-0 | - | x | x | Queensland Climate Change Centre of Excellence and the Commonwealth Scientific - Industrial Research Organisation | Australia |
| GFDL-ESM2G | x | - | x | National Oceanic and Atmospheric Administration - Geophysical Fluid Dynamics Laboratory | Estados Unidos |
| GFDL-ESM2M | x | - | - | | |
| HadGEM2-CC | - | - | x | National Institute of Meteorological Research - Korea Meteorological Administration | Corea |
| INM-CM4 | x | - | x | Institute for Numerical Mathematics | Rusia |
| IPSL-CM5A-LR | x | x | x | Institut Pierre-Simon Laplace | Francia |
| IPSL-CM5A-MR | - | - | - | | |
| IPSL-CM5B-LR | x | - | - | | |
| MIROC-ESM | x | x | x | Atmosphere and Ocean Research Institute - National Institute for Environmental Studies - Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology | Japón |
| MIROC5 | x | x | x | | |
| MPI-ESM-LR | x | - | x | Max Planck Institute for Meteorology | Alemania |
| MPI-ESM-MR | x | - | x | | |
| MRI-CGCM3 | x | x | x | Meteorological Research Institute | Japón |

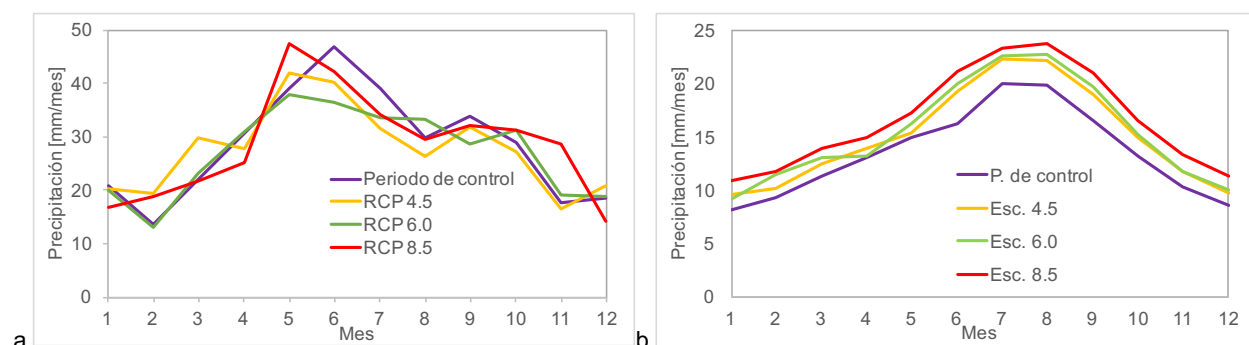


Figura 2.12. Valores medios mensuales de precipitación (a) y temperatura máxima (b) en el periodo de control (1971-2000) y en los escenarios RCP (2071-2100) del punto 8495 de la AEMET del MCG MRI-CGCM3 regionalizado por métodos análogos.

2.5.1. Problemas con los escenarios climáticos regionalizados

Al comparar los valores medios de precipitación del periodo de control de los diferentes MCG (Fig. 2.12.a) con los valores medios observados (Fig. 2.8.a) se aprecia que existe una

subestimación muy alta en ciertos periodos, de igual manera se observa que no siguen la tendencia estacional local, con sus dos picos, el máximo en otoño y el secundario en primavera, representando el de primavera como el máximo y subestimando en gran medida el de otoño, en muchos casos ni siquiera siendo apreciable, observándose MCG que no muestran una estacionalidad marcada (Fig. 2.13.a). De igual forma, en la temperatura se observa una subestimación en la temperatura máxima de casi 10 °C con respecto a la observada. Estos errores se pueden atribuir a que los MCG, por su resolución, no están captando las particularidades del clima mediterráneo y a problemas en los procesos de regionalización, debido a las abstracciones de estos.

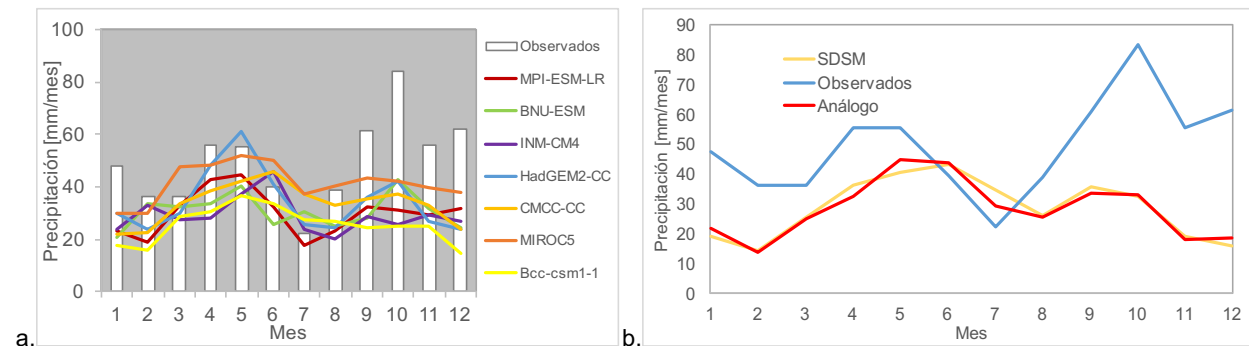


Figura 2.13. Comparación entre la precipitación media mensual observada en P10 de Spain02 V.04 y 8495 de la AEMET en el periodo de control (1971-2000) de: varios MCG regionalizados con análogos (a); y el MCG MPI-ESM-LR regionalizado con análogos y SDSM (b).

Los problemas de subestimación se aprecian tanto en la regionalización mediante análogos como en la SDSM (Fig. 2.13.b), lo que indica que es posible que el problema puede venir de los datos de los MCG. Pero a pesar de presentar una distribución mensual muy similar, ambos muestran curvas de excedencia diferentes entre sí y con respecto a la observada (Fig. 2.14.a). Lo mismo ocurre en la probabilidad de lluvia mensual, como muestra la Fig. 2.14.b donde se puede ver que la regionalización con análogos representa un clima más húmedo, mientras que la SDSM un clima más seco, explicando las diferencias en la curva de excedencia. Estos errores si pueden atribuirse a los métodos de regionalización utilizados y a las simplificaciones e hipótesis realizadas en el proceso.

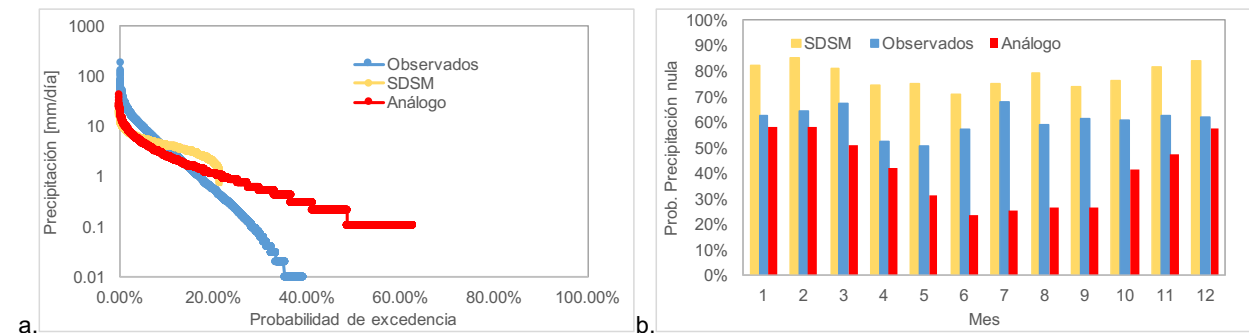


Figura 2.14. Comparación entre curvas de probabilidad de excedencia (a) y probabilidad de precipitación nula mensual (b) entre los valores observados en P10 de Spain02 V.04 y los regionalizados en 8495 de la AEMET en el periodo de control (1971-2000).

2.6. Modelo TETIS

TETIS es un modelo conceptual distribuido, desarrollado para realizar simulación hidrológica y de ciclo de sedimentos en cuencas naturales con el objetivo de obtener de la mejor forma

posible la respuesta ocasionada por la precipitación de lluvia o nieve, teniendo en cuenta los diferentes procesos físicos involucrados (Francés y col., 2012). Discretiza la cuenca a través de una malla de celdas asociadas a una serie de parámetros necesarios para la representación conceptual de los procesos físicos, incorporando la variabilidad espacial del ciclo hidrológico y de sedimentos con el menor número de parámetros posibles, cumpliendo con el principio de Parsimonia. Las entradas del modelo son series temporales de: precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial (Bussi, 2014).

TETIS cuenta con un submodelo de sedimentos incorporado, basado en la formulación desarrollada en el modelo CASC2D-SED, que simula los procesos de sedimentos en ladera en dos dimensiones y con una aproximación unidimensional en canales (Montoya, 2008; Rojas, 2002). Mantiene siempre activo el submodelo hidrológico y en este estudio se ha activado el submodelo de sedimentos, que por su conceptualización modeliza de manera conjunta al ciclo hidrológico la formación, transporte y depósito de sedimentos en ladera, cárcavas y cauce.

2.6.1. Formulación del submodelo hidrológico

La representación de los procesos físicos de ladera y acuífero en cada celda está basada en una estructura de tanques interconectados vertical y horizontalmente como se representa en la Fig. 2.15. El acuífero es representado a través de un tanque (T4). Los procesos en ladera están representados por cinco tanques que corresponden a: manto de nieve (T0); interceptación (T6), superficie (T2); zonas capilares (T1) gravitacional (T3); mientras la escorrentía directa, el interflujo y el flujo base se conectan con la red fluvial representada por otro tanque (T5). Existe un séptimo tanque que representa el cauce, en caso de existir en la celda correspondiente (Bussi y col., 2014; Francés y col., 2012).

Los volúmenes de agua almacenados en cada tanque en cada intervalo de tiempo representan sus variables de estado, y a su vez permiten representar el flujo de agua que se produce entre ellos. Estos se encuentran relacionados entre sí en función de: el esquema conceptual adoptado (Fig. 2.15), el tipo de tanque, las características morfológicas de cada celda y las características hidrológicas del suelo en la misma (Francés y col., 2012). Cada tanque recibe un flujo vertical de entrada correspondiente a lluvia (X_1) y nieve (X_0) correspondientes a la precipitación total, en función de las condiciones de los tanques de cada celda se distribuirá verticalmente entre: lluvia directa (X_6), excedente (X_2), infiltración (X_3), percolación (X_4) y pérdidas subterráneas (X_5). Mientras los flujos horizontales en el canal se distribuyen entre: escorrentía directa (Y_2), interflujo (Y_3) y flujo base (Y_4). A la vez se producen dos flujos de salida: evapotranspiración suelo-vegetación (Y_1) y evapotranspiración de agua interceptada (Y_6) (Sánchez, 2015).

Parte de la precipitación ingresa a través de la nieve (X_0) al tanque de nieve (T0), si cumple la condición de que la temperatura del aire es inferior a una temperatura crítica (T_c) que suele estar entre 0 y 2 °C (Rango y Dewalle, 2008). La nieve en T0 se representa como una altura de agua equivalente (SWE, por sus siglas en inglés). El proceso de fusión se produce utilizando el método grado-día (Francés y col., 2012) simplificando la producción de nieve a través de un umbral de temperatura, evitando el uso de datos de radiación solar neta, energía sensible, energía latente, calor del suelo y energía advectiva, necesarios para un cálculo detallado (Dávila, 2012). El flujo proveniente de la fusión de nieve (Y_0) se divide entre el tanque de almacenamiento estático (T1) y el flujo vertical excedente, que junto a la lluvia (X_1) forman la lluvia superficial (X_6).

Por el tanque de almacenamiento estático (T_1) circula el agua que sale de la cuenca en forma de evapotranspiración (Y_1) y por tanto no llega a formar parte de la escorrentía, representando el agua que retiene el suelo por fuerzas capilares. Tiene una capacidad máxima igual a la suma de la capacidad de almacenamiento capilar en el suelo y el almacenamiento en depresiones en la superficie del suelo, que dependen de la rugosidad y la pendiente del mismo. El almacenamiento por intercepción directa ocurre en el tanque de intercepción (T_6) donde se produce la salida por evapotranspiración (Y_6), depende de la cobertura de la superficie y su capacidad de almacenar agua, relacionada con el tipo de vegetación (Sánchez, 2015).

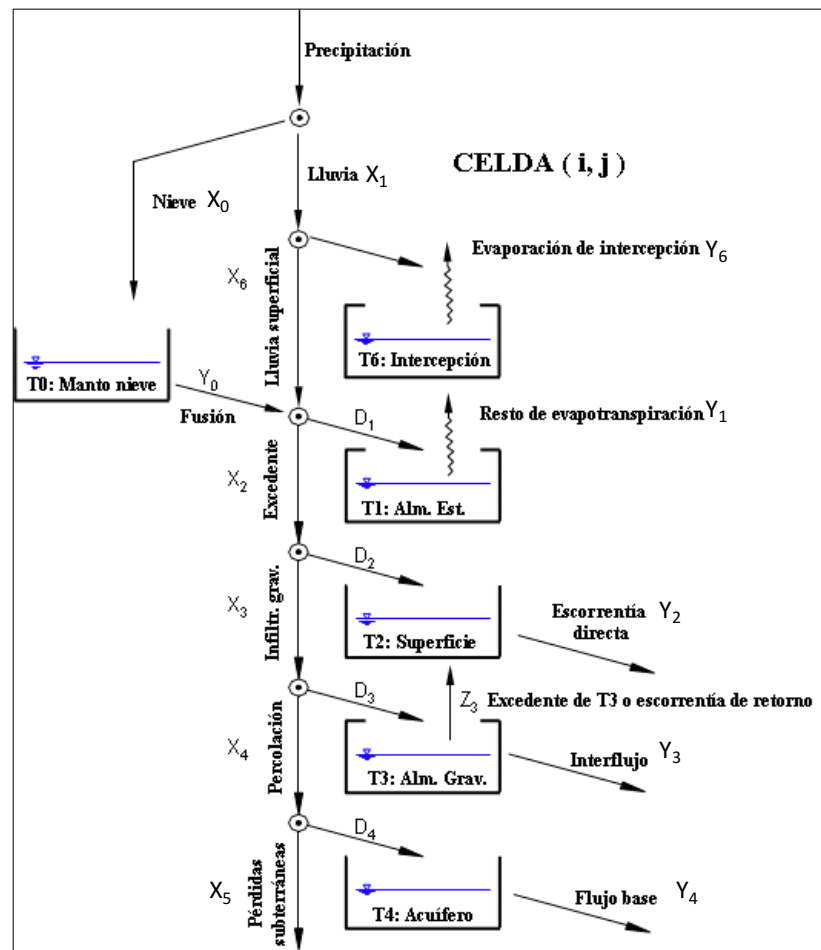


Figura 2.15. Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS (Tomado de: Dávila, 2012)

En el tanque de superficie (T_2) se representa: el agua susceptible a moverse por escorrentía directa (Y_2) es decir, superficialmente por ladera; o de infiltrarse al nivel inferior (X_3). La cantidad de agua que se deriva para escorrentía superficial depende de; la capacidad del suelo para dejar pasar el agua gravitacional, asociada a la conductividad hidráulica del suelo; y del estado de almacenamiento en la capa superior del suelo (Sánchez, 2015).

El tanque gravitacional (T_3) corresponde al agua que se almacena en el suelo por ese mecanismo. Parte de este volumen pasa al nivel inferior por percolación (X_4) y otra forma parte del interflujo o flujo subsuperficial (Y_3), que se desarrolla inicialmente sobre una delgada capa que fluye lateralmente hacia abajo por ladera y se va concentrando en pequeñas depresiones, grietas o pequeños conductos por el interior de esta capa, hasta llegar los elementos de la red

de drenaje. La capacidad de percolación está asociada al tipo de subsuelo y su estructura, que dependen de las características geológicas y geomorfológicas de las capas inferiores del suelo. El agua que continúa hacia la zona inferior del suelo (X_4) se asocia al flujo excedente del flujo superficial en ladera y a la conductividad de la capa inferior del suelo conocida en condiciones de saturación como capacidad de percolación (Sánchez, 2015).

El volumen de agua que ingresa por percolación (X_4) al acuífero se representa con un tanque (T_4), del cual un porcentaje alimenta al flujo base del cauce (Y_4) y una parte mínima que suele considerarse despreciable corresponde a las pérdidas subterráneas (X_5). La representación se hace a través de la ecuación de la continuidad y una ecuación que relaciona la tasa de flujo que sale del tanque, de igual forma que en los almacenamientos anteriores (Sánchez, 2015).

En función de lo antes dicho, TETIS puede interpretarse como una malla interconectada en tres dimensiones. Donde los tres tanques inferiores drenan hacia el correspondiente tanque aguas abajo, en función de las direcciones propuestas por la topografía, representada a través del MED, hasta alcanzar la red de drenaje formada por cárcavas y cauces. Presentando tres sistemas diferenciados, definidos por las áreas umbrales para que las diferentes componentes de la escorrentía salgan a la superficie, coincidiendo con la presencia de una incisión permanente en el terreno donde se concentran los flujos, ya sea en cárcavas o en cauces, la relación entre estos tres componentes forman la escorrentía se puede observar en la Fig. 2.16 (Francés y col., 2012).

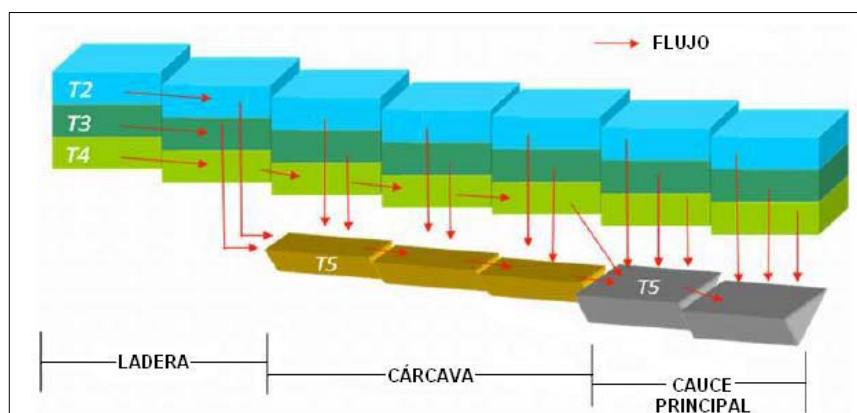


Figura 2.16. Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS (Tomado de: Francés y col., 2012)

La propagación hidráulica del flujo a lo largo de la red se basa en una aproximación de la onda cinemática, estimando las características hidráulicas en cada celda mediante relaciones morfométricas de tipo potencial obtenidas a partir de la información geomorfológica de la cuenca, en lo que se denomina onda cinemática geomorfológica (OCG) (Bussi, 2014; Francés y col., 2012).

2.6.2. Parámetros del modelo

Un sistema a modelar está descrito por un conjunto de parámetros que describen sus características, dependiendo de la estructura y conceptualización del mismo la información necesaria puede variar (Sánchez, 2015). TETIS, al ser un modelo distribuido, necesita información para cada celda dentro de la malla, en el caso de la cuenca de la Rambla de la Viuda, esta información se obtiene a partir de la información espacial disponible mostrada en la

Tabla 2.1, que es llevada a una escala común que permita representar la variabilidad espacial de la cuenca.

El MED nos permite obtener información espacial como (Francés y col., 2012):

- Mapa de dirección de drenaje, que establece las conectividades entre las diferentes celdas
- Área de drenaje acumulada en cada celda, requerida en la estimación de la velocidad y el área de flujo utilizados en el cálculo de la propagación mediante la OCG.
- Mapa de pendientes, que determinan la velocidad y el área del flujo mediante la metodología de la OCG
- Mapa de velocidad, necesario para estimar la velocidad superficial de la escorrentía

Utilizando información topológica de usos del suelo, litología, cubierta vegetal y geología se estima las siguientes características del suelo (Francés y col., 2012):

- Almacenamiento estático (H_u) que corresponde a la capacidad de almacenamiento capilar del suelo y las abstracciones iniciales.
- Conductividad hidráulica saturada del suelo (k_s) que determina la permeabilidad superficial.
- Conductividad hidráulica horizontal saturada del suelo (k_{ss}).
- Conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso (k_p) o capacidad de percolación.
- Conductividad hidráulica horizontal saturada del estrato rocoso (k_{sa}).
- Conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso profundo o capacidad de percolación profunda (k_{ps}).
- Velocidad de flujo superficial en ladera (v_t).
- Contenido óptimo de humedad en el suelo (θ^*).
- Tipo de cubierta vegetal y su factor de vegetación a lo largo del año λ_v .

TETIS utiliza nueve parámetros geomorfológicos en función de las siguientes relaciones geomorfológicas (Francés y col., 2012):

- Área acumulada de la cuenca y caudal a sección llena:

$$\Lambda = \kappa \cdot Q_b^\phi \quad (2)$$

- Ancho de la sección transversal a sección llena y el caudal a sección llena:

$$w_b = c_1 \cdot Q_b^{\varepsilon_1} \quad (3)$$

- Ancho de la sección transversal y el caudal:

$$w_t = Q_t^{\varepsilon_2} \quad (4)$$

- Diámetro del sedimento, la pendiente y la profundidad del flujo:

$$d = c_d \cdot (y_{s0})^\theta \quad (5)$$

- Coeficiente de rugosidad y el diámetro del sedimento:

$$n = c_n \cdot d^\xi \quad (6)$$

donde: k , c_1 , c_d y c_n son los coeficientes y ϕ , ε_1 , ε_2 , θ y ξ corresponden a los exponentes. Estos coeficientes y exponentes se pueden estimar a partir de estudios geomorfológicos por regiones homogéneas de regiones hidráulicas a lo largo de la red de drenaje.

Parte de la información espacial sirve para delimitar ciertas regiones y asociarla a características de las mismas como (Francés y col., 2012):

- Mapa de índices de regiones homogéneas, que se emplean para indicar las diferentes regiones incluidas en la cuenca, necesarias para el cálculo de traslación del flujo mediante la OCG.
- Mapa de índices de cobertura vegetal, el cual es necesario para estimar la variabilidad temporal en la estimación de la Evapotranspiración.

A pesar de que los parámetros distribuidos son una media de los valores reales, no son los más aptos para representar el comportamiento real del área modelizada, sin embargo, estos se pueden ajustar, modificando su valor, pero conservando significado físico, para obtener una mejor representación. Estos nuevos parámetros obtenidos, llamados efectivos, ayudan a superar los problemas conceptuales asociados a la representación a través de un valor puntual (Sánchez, 2015).

TETIS incluye una serie de factores correctores que permiten corregir de forma global los diferentes parámetros espaciales, estos absorben los errores de fuentes como: la estimación inicial de los parámetros, los efectos de escala espacio-temporal, la conceptualización del modelo. Considerando que estos suelen ser comunes para toda la cuenca es razonable suponer que los factores sean comunes en toda la región o al menos en número muy limitado de regiones (Francés y col., 2012; Sánchez, 2015). Los siguientes factores afectan directamente la producción de escorrentía, salvo el último que se emplea para la traslación de la OCG:

- FC_1 . Almacenamiento estático.
- FC_2 . Evapotranspiración.
- FC_3 . Infiltración gravitacional.
- FC_4 . Escorrentía directa.
- FC_5 . Percolación.
- FC_6 . Interflujo.
- FC_7 . Flujo subterráneo no conectado.
- FC_8 . Flujo base.
- FC_9 . Velocidad de onda en la red fluvial.

Para la fusión de nieve que trabaja con un modelo tipo índice de temperatura se tiene los siguientes parámetros: temperatura base (T_b), coeficiente de fusión (M_f) incluyendo la lluvia y coeficiente de fusión sin lluvia. Estos son globales así que afectan del mismo modo a todas las celdas en cada intervalo temporal (Francés y col., 2012).

2.6.3. Condiciones iniciales

Por su conceptualización y al igual que la mayoría de modelos hidrológicos, para su correcto funcionamiento TETIS necesita definir las condiciones iniciales de sus variables de estado, estas pueden ser definidas a partir de simulaciones anteriores o a través de un periodo de calentamiento. El programa permite también definir manualmente estos valores, de manera global para todo el espacio, pudiéndose calibrar estas (Sánchez, 2015). Las variables de estado a definir son:

- H_0 . Nivel de agua equivalente en el manto de nieve.

- H₁. Almacenamiento estático. Cuya capacidad máxima está definida por la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo (Hu).
- H₂. Almacenamiento superficial.
- H₃. Almacenamiento gravitacional.
- H₄. Almacenamiento en acuífero.
- H₆. Almacenamiento del tanque de intercepción

2.7. Submodelo sedimentológico

2.7.1. Formulación del submodelo

Una vez que una partícula de suelo es erosionada, esta se vuelve parte del flujo y es transportada aguas abajo, cada partícula que pasa a través de cualquier punto de control de la cuenca ha sido erosionada aguas arriba y ha sido transportada por el flujo (Einstein, 1950). La producción, transporte y depósito de sedimentos en la cuenca está controlada por dos de sus características; la disponibilidad de sedimentos, que controla el transporte de materiales finos; y la capacidad de transporte de la corriente que controla el transporte de materiales gruesos (Fig. 2.17.a). El tamaño de las partículas determina la velocidad necesaria para alcanzar la capacidad de transporte suficiente para producir el movimiento de estas. Para limos y arcillas cuyo transporte es en suspensión estas velocidades son pequeñas mientras que para arenas y gravas que se mueven por arrastre son altas. Esto permite predecir el movimiento de las partículas, permitiendo la modelización de cada proceso (Francés y col., 2012; Julien, 2010).

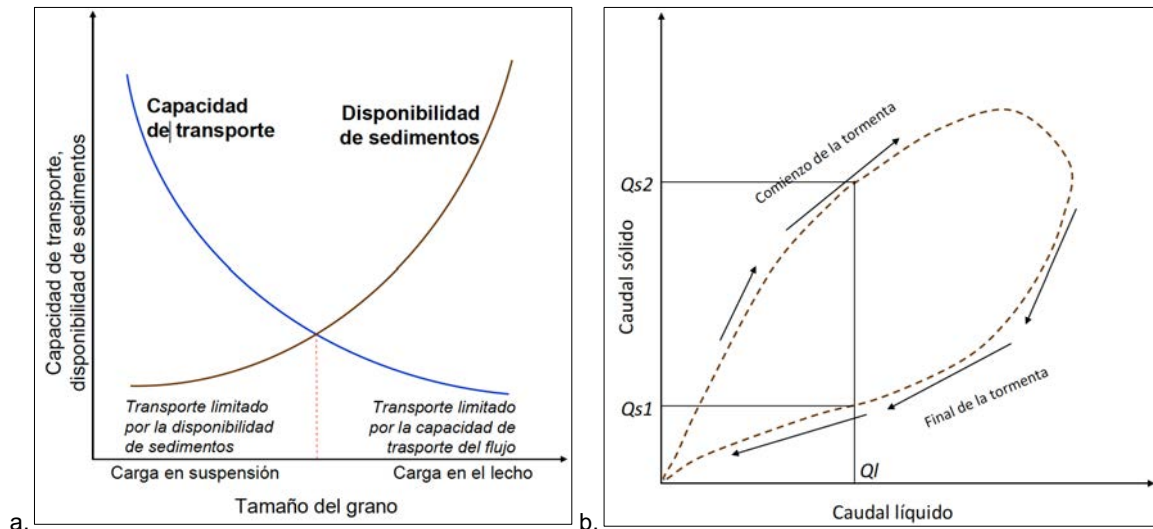


Figura 2.17. Curva de suministros y capacidad de transporte (Tomado de: Julien, 2010) (a). Ciclo de histéresis en la relación caudal líquido – caudal sólido. A un mismo caudal líquido (Ql) corresponden dos caudales sólidos, uno mayor, en la rama ascendente del hidrograma (Qs2), y uno menor, en la rama descendente del hidrograma (Qs1) (Tomado de: Nistor y Church, 2005) (b).

Para el transporte en ladera, el modelo utiliza la ecuación de Kilinc y Richardson modificada, de capacidad de transporte (Julien, 2010) que depende del caudal (Ec. 7), la pendiente del terreno, el tipo de suelo y los usos de la tierra, este último, no considerado en la ecuación original.

$$q_t = 23210 \cdot S_o^{1.66} \cdot \left(\frac{Q}{W} \right)^{2.035} \cdot \frac{K}{0.15} \cdot C \cdot P \quad (7)$$

donde: K es el factor de erosionabilidad del suelo, C es el factor de cultivo y P es el factor de prácticas de conservación, según la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE, por sus siglas en inglés) (Refsgaard y Knudsen, 1996), 232100 es una constante empírica. El factor 0.15 proviene del hecho de que la ecuación original fue desarrollada para arenas con suelo desnudo, siendo este el valor máximo para arenas según la USLE.

La Fig. 2.18 representa el esquema conceptual del ciclo de sedimentos en ladera, utilizado por TETIS, en el cual para cada celda y cada fracción considerada (Tabla 2.3) se añaden tres tanques de sedimentos, que representan el material parental, depositado y transportado en suspensión aguas abajo. El material erosionado se sitúa en el tanque de suspensión aguas abajo, que sedimenta en el tanque de depósito en función de la velocidad de caída de cada fracción (Bussi y col., 2014).

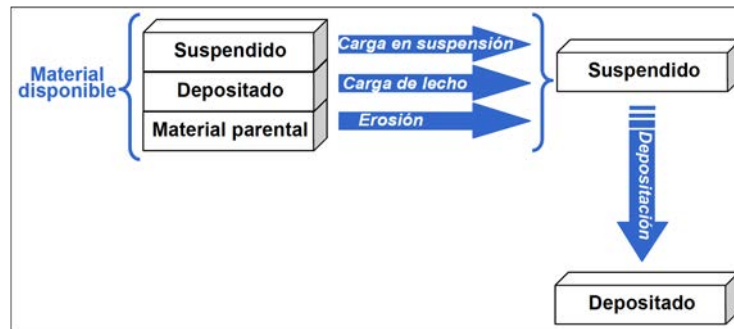


Figura 2.18. Esquema de los procesos de ladera en TETIS (Tomado de: Francés y col., 2012).

Tabla 2.3. Tamaño medio del grano y velocidad media de sedimentación en TETIS.

| Clase | Diámetro [mm] | Velocidad [mm/s] |
|---------|---------------|------------------|
| Arena | 0.35 | 36 |
| Limo | 0.016 | 0.22 |
| Arcilla | 0.001 | 0.00086 |

El cálculo en cárcavas y cauce se lleva a cabo usando la ecuación de Engelund y Hansen (1967) utilizando parámetros hidráulicos (radio hidráulico, velocidad de flujo y ángulo de fricción) y características de las partículas (gravedad específica y diámetro), aplicando el concepto de potencia de corriente de Bagnold y el principio de similitud, obteniendo la concentración de sedimentos por peso (Ec. 8) con la cual se puede estimar el volumen de la fracción transportada por el caudal en un intervalo de tiempo como muestra la Ec. 9.

$$C_w = 0.05 \cdot \left(\frac{G}{G-1} \right) \cdot \frac{V \cdot S_f}{\sqrt{(G-1) \cdot g \cdot ds}} \cdot \sqrt{\frac{R_h \cdot S_f}{(G-1) \cdot ds}} \quad (8)$$

$$Q_{SEH} = \frac{Q \cdot C_w \cdot dt}{2.65} \quad (9)$$

donde: G es la gravedad específica de los sedimentos, V es la velocidad promedio del canal [m/s], S_f es el ángulo de fricción del canal [m/m], g es la aceleración de la gravedad [m^2/s], ds es el diámetro de la fracción [m] y R_h es el radio hidráulico del canal [m], Q es el caudal del flujo en el canal [m^3/s].

Para cada fracción de tamaño, una vez que se sustrae la cantidad de sedimento transportados en suspensión por los procesos advectivos de la capacidad de transporte, el material del lecho es transportado usando la capacidad de transporte en exceso. La cantidad de material de lecho

transportado es la mínima entre la cantidad que puede ser transportada por procesos advectivos y la capacidad de transporte en exceso. El esquema de la Fig. 2.17 representa el ciclo de sedimentos en la red, pero por su conceptualización no presenta el tanque de material parental, es decir el del lecho y los márgenes, ya que se ha demostrado que la fuente más importante de sedimentos son los provenientes de transporte y depósito en crecidas anteriores, más no los provenientes de erosión en márgenes y el fondo.

2.7.2. Parámetros del submodelo

Al igual que en el submodelo hidrológico, TETIS también necesita información distribuida espacialmente para el submodelo sedimentológico, siendo esta: los tres parámetros de la fórmula USLE (factores C, K y P) y de la textura del suelo (porcentajes de arena, limos y arcilla). Para ajustar la incertidumbre que generan estos en la simulación, proveniente de la simplificación conceptual propia de la modelización y el uso de valores medios, se introducen tres factores correctores que tratan de corregir estos errores.

El primero es un coeficiente (α) aplicado a la fórmula de Killinc y Richardson modificada, que busca corregir los errores cometidos en la estimación de los factores USLE; y los otros dos son coeficientes multiplicativos de la fórmula de Engelund y Hansen, que recogen la sensibilidad del modelo a los procesos sedimentológicos de erosión, transporte y depósito ocurridos en la red fluvial. El primero ajusta la capacidad de transporte en cárcavas (β_1) y el segundo a la capacidad de transporte en cauce (β_2).

$$q_t^* = \alpha \cdot q_t \quad (10)$$

$$Cw_{cárcavas}^* = \beta_1 \cdot Cw_{cárcavas} \quad (11)$$

$$Cw_{cauce}^* = \beta_2 \cdot Cw_{cauce} \quad (12)$$

2.7.3. Condiciones iniciales

Como ya se dijo, la mayor parte del sedimento transportado en cauce es el producido en eventos previos, así mismo, la tasa de producción de sedimentos durante un evento depende no solo del desarrollo de la red de surcos sino de la relativa estabilidad del material, por ello las condiciones iniciales de sedimentos depositados en la cuenca pueden afectar de manera sensible el volumen del sedimentograma de salida. Se ha demostrado además que la carga de sedimentos depende más a menudo de la duración del flujo que del volumen del mismo, ya que el material preparado para ser fácilmente removido se moviliza rápidamente al principio de la crecida, este fenómeno se conoce como *gully cleanout* (Francés y col., 2012; Thornes, 1976).

Este efecto se conoce también como efecto *bulldozer*, este ocurre porque los eventos pequeños de alta intensidad de lluvia erosionan las laderas, transportando el material hasta las cárcavas, donde se depositan, y al producirse eventos de mayor duración y menor intensidad de lluvia, la red de drenaje genera un flujo con capacidad de transporte notable, que limpia los canales, transportando el material aguas abajo. Esto puede provocar un desfase entre el pico de sedimentos y el pico de caudal, el bucle de histéresis producido se puede observar en la Fig. 2.16.b (Francés y col., 2012; Regüés y col., 2000; Thornes, 1976).

Debido a estos efectos, TETIS permite ajustar de manera distribuida tales condiciones, diferenciando las celdas de la cuenca en: ladera, cárcava y cauce, cuya diferencia se basa en

el concepto de área umbral, donde se definen umbrales de área drenada que dividen la cuenca en estas tres zonas. Los valores de entrada en el modelo son los volúmenes iniciales de sedimentos depositados en cada una de las tres, divididos en las tres clases de suelo manejadas: arena, limo y arcilla (Francés y col., 2012).

2.8. Implementación previa del submodelo hidrológico

Este trabajo utiliza como base una implementación previa del submodelo hidrológico de TETIS en la cuenca de la Rambla de la Viuda, realizado por Sánchez (2015). A continuación se describe el proceso llevado a cabo en dicho trabajo, siendo los pasos seguidos, los comúnmente necesarios a seguir para la implementación del modelo en cualquier cuenca en la que se cuente con la información suficiente, tanto para la estimación de los parámetros distribuidos espacialmente, como para la calibración de los factores correctores que ayuden a la correcta representación de la realidad.

Como ya se recalcó en el Apartado 2.2 de este trabajo, Sánchez (2015) contaba con tres fuentes de precipitación (SAIH, Spain02 V.02 y Spain02 V.04) implementando el modelo para cada caso, sin embargo, para este trabajo únicamente se utiliza la versión construida con los datos de Spain02 V.04, al concluirse en dicho trabajo, que era la que mejor representaba la hidrología de la cuenca, considerando esa afirmación como aceptable.

2.8.1. Estimación de variables temporales: Evapotranspiración de referencia

La variación temporal del ciclo hidrológico se representa en TETIS a través de la introducción de las variables temporales de: precipitación, temperatura y evapotranspiración de referencia. Las dos primeras suelen ser medidas de manera directa, e incluso interpoladas espacialmente, como en este caso, donde se utiliza la información proveniente del proyecto Spain02 V.04. Por otra parte la evapotranspiración potencial suele calcularse en función de la información disponible.

La evapotranspiración (ET) engloba los procesos mediante los cuales el agua disponible en la cuenca en estado sólido y líquido se transforma en vapor atmosférico, incluyendo: la evaporación directa desde masas de aguas, el suelo húmedo y el agua interceptada por superficies vegetales; así como la transpiración producida desde las hojas de las plantas (Castany, 1971). Se debe tomar en cuenta al determinar el balance hídrico de una cuenca, especialmente en climas con gran influencia de la temperatura, como los semiáridos que rigen a las cuencas mediterráneas.

La ET no puede registrarse de manera directa, por ello, para su estimación se suele utilizar otras variables meteorológicas observables que intervienen en el proceso como: temperatura, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, entre otras. Utilizando esta información se plantearon conceptos como la Evapotranspiración Potencial (ETP) que corresponde a la ET producida por un sistema cuando no existe restricción alguna de consumo de agua por parte de la vegetación, sin embargo este concepto no consideraba el tipo de cultivo sobre el suelo, lo que generaba una subestimación de la ET real, por ello, se introdujo el concepto de Evapotranspiración de Referencia (ET_0) que para su estimación toma en cuenta cultivos específicos, y los compara con cultivos de referencia (Thornthwaite, 1948)

Diferentes métodos empíricos han sido propuestos para la estimación de la ET y la ET_0 en función de los datos meteorológicos disponibles, Sánchez (2015) utiliza la ecuación Hargreaves

(Ec. 13) (Allen y col., 2006), la cual utiliza la datos de temperaturas y radiación solar, por la disponibilidad de los mismos.

$$ET_o = 0.0135 \cdot (T_{med} + 17.78) \cdot R_s \quad (13)$$

donde: T_{med} es la temperatura media [°C], y R_s es la radiación solar incidente [mm/día].

R_s se puede calcular aplicando la Ec. 14 a partir de: la radiación solar extraterrestre (R_o), que representa la de llegada a la parte exterior de la atmósfera, que se puede encontrar tabulada en literatura, en función de la latitud del lugar y el mes correspondiente; y KT que es un coeficiente empírico calculado a partir de datos de presión atmosférica, cuyo valor más frecuente utilizado en literatura es de 0.17 (Samani, 2000). Obteniéndose para el cálculo de ET_o la Ec. 15.

$$R_s = R_o \cdot KT \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \quad (14)$$

$$ET_o = 0.023 \cdot (T_{med} + 17.78) \cdot R_o \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \quad (15)$$

donde: T_{max} es la temperatura máxima [°C], y T_{min} es la temperatura mínima [°C].

Para la cuenca de la Rambla de la Viuda, cuya latitud es 40° los valores mensuales de R_o son los que muestra la Tabla 2.4 tomados del Anexo 2 de Allen y col. (2006), que recomienda la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) para el cálculo de ET .

Tabla 2.4. Valores mensuales de R_o para la latitud 40°.

| Mes | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| R_o [MJ/m ² /día] | 15.0 | 20.4 | 27.2 | 34.7 | 39.7 | 41.9 | 40.8 | 36.7 | 30.0 | 22.5 | 16.3 | 13.6 |

La Fig. 2.19.b muestra que la evapotranspiración de referencia tiene una distribución mensual parecida a las temperatura máximas (Fig. 2.8.b) y mínimas (Fig. 2.19.a) diarias, como se podía esperar, presentando un valor máximo de 145.85 mm/mes en el mes de julio, en la temporada más cálida, mientras que en el invierno está en torno a los 30 mm/mes. En términos anuales alcanza los 960 mm/año siendo superior a la precipitación media anual de la mayoría de los años en el mismo periodo (Fig. 2.6) mostrando un claro déficit del recurso, lo que coincide con la descripción de las cuencas mediterráneas con comportamiento efímero presentada en el Apartado 1.4.3.

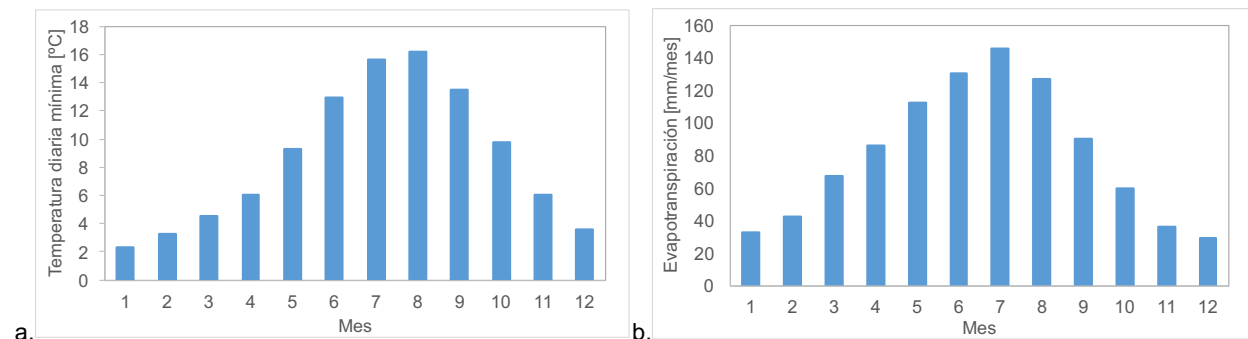


Figura 2.19. Temperatura diaria mínima (a) y Evapotranspiración de referencia media mensual media areal (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda en el periodo 1971-2000.

2.8.2. Estimación de parámetros espaciales

Para obtener la representación en malla necesaria para la implementación del modelo TETIS, la información espacial disponible (Tabla 2.1) ha sido trabajada utilizando un software de procesamiento de GIS, llevando ésta a formato *ráster*, que presenta una distribución matricial que permite una representación acorde a la requerida. En base al área de la cuenca (1513 Km²) y la escala de la información disponible, Sánchez (2015) trabaja con un tamaño de celda de 100x100 m², que se considera apto para la representación de la cuenca.

Modelo de elevación digital

El mapa base para la descripción de las características físicas de la cuenca es el MED [m.s.n.m], siendo este parte de los mapas (parámetros espacialmente distribuidos) de entrada de TETIS, llevando el disponible a la escala antes fijada (Fig.2.2.a). De este mapa además se derivan dos más de los mapas de entrada: el Mapa de direcciones de flujo [-] (Fig. 2.20.a), que representa la dirección en la que cada celda vierte sus aguas; y el Mapa de celdas drenantes acumuladas [-] (Fig. 2.20.b), que representa la cantidad de celdas aguas arriba que se vierten en una celda. Estos mapas permiten delimitar el área contribuyente de la cuenca y su red fluvial. Todos los cálculos se realizan a través de herramientas disponibles en el software de procesamiento de GIS utilizado, que generalmente suelen estar presentes en cualquier software de este tipo.

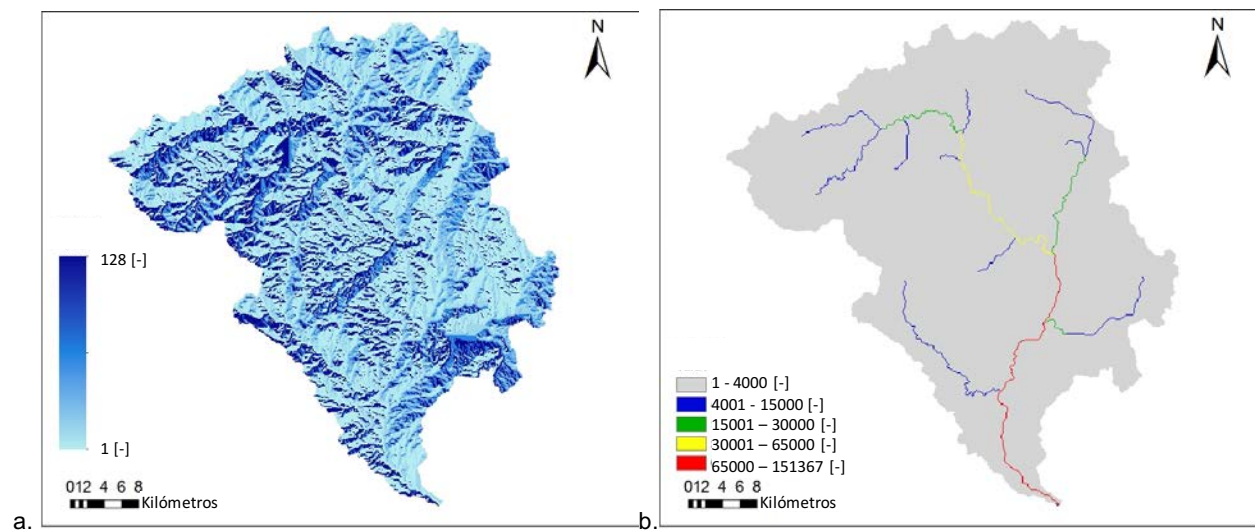


Figura 2.20. Mapas de: direcciones de flujo (a) y celdas drenantes acumuladas (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

Partiendo del MED también se obtiene el Mapa de pendientes [m/m] (Fig. 2.21.a) con el cual se obtiene además el Mapa de velocidades de ladera (v) [m/s] (Fig. 2.21.b), que representa la velocidad a la cual el flujo se considera estacionario, en función de la pendiente, siguiendo la Ec. 16.

$$v = 1.414 \cdot \sqrt{S_o} \quad (16)$$

Usos de suelos

En base a la información de usos del suelo disponible, proveniente del Proyecto CORINE, Sánchez (2015) agrupa diferentes usos en categorías para simplificar la variedad de aprovechamientos del suelo, como se puede ver en la Fig. 2.2.b. La clasificación queda dividida en las siguientes doce categorías.

- Urbano: Formado por suelo cubierto con estructuras asociadas al tejido urbano, así como zonas en construcción, industriales, comerciales, de extracción minera y de la red de transporte.
- Masas de agua: Superficies de agua que incluyen ríos, ramblas, lagos, etc.
- Cultivo de regadío: Estos requieren un aporte artificial de agua, usando infraestructura permanente como canales de riego o redes de drenaje.
- Frutales: Parcelas y terrenos agrícolas con árboles frutales, asociados a superficies de pastos permanentes.
- Cítrico: Parcelas de árboles frutales de clase cítrica específicamente.
- Olivos y viñedos: Cultivos desarrollados a lo largo del todo el año, aunque reducido en invierno, su porcentaje de cobertura es relativamente alto.
- Cultivo secano: Zonas de cultivos herbáceos estacionales, con una biomasa y recubrimiento superficial relativamente pequeño.
- Pastizales naturales: Áreas cuya vegetación predominante consiste en hierbas y pastizales. Se desarrolla en latitudes medias donde existen variaciones climáticas de las cuatro estaciones son marcadas.
- Vegetación escasa: Espacios conformados por zonas rocosas donde no existe ningún tipo de vegetación.
- Bosque conífero: Estrato arbóreo compuesto en mayor parte por pinos.
- Bosque mixto: Estrato arbóreo compuesto por especies perennifolias y caducifolias.
- Matorral: Engloba matorral boscoso de transición, landas y matorrales y vegetación esclerófila, que cubren totalmente la superficie en la que crecen

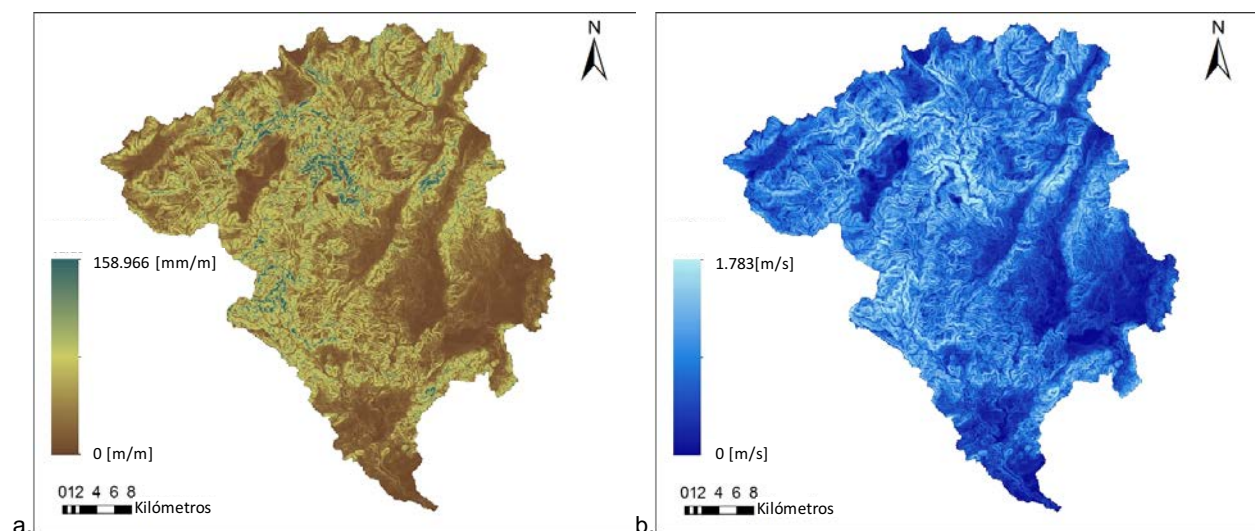


Figura 2.21. Mapas de: pendientes (a) y velocidades de ladera (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

Para la modelización de la distribución espacial de la evapotranspiración real se utiliza el llamado Factor de vegetación (K_c), que consiste en el límite máximo de evapotranspiración del

cultivo cuando no existen obstáculos al crecimiento del mismo debido a: limitaciones de agua, densidad de cultivo, enfermedades, malezas, insectos o excesiva salinidad (Allen y col., 2006). Este depende del: tipo de cultivo, el clima, la cobertura del suelo, y las etapas de crecimiento del cultivo.

Sánchez (2015) calcula K_c partiendo del Mapa de usos del suelo y la metodología propuesta por la FAO en Allen y col. (2006), donde se determinan cuatro fases de cultivo: inicial, desarrollo, media, y final, asociadas cada una a un valor de factor de vegetación. Determinándose una media mensual y obteniendo una distribución anual de K_c para cada uso del suelo, la Fig. 2.22 muestra las 12 curvas para los usos antes descritos.

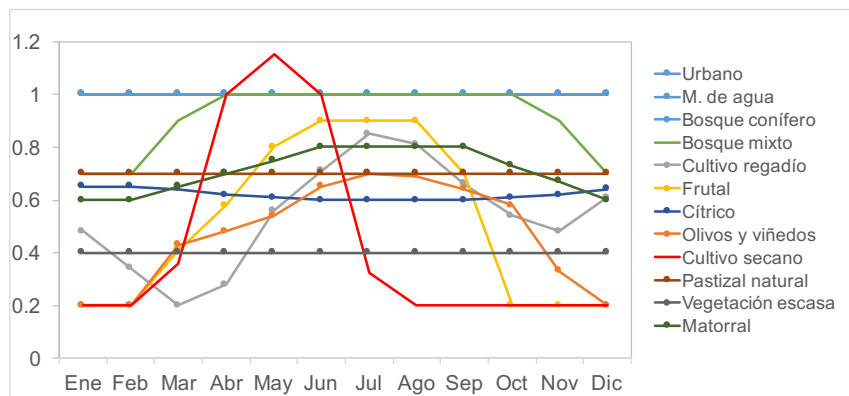


Figura 2.22. Distribución mensual de valores del Factor de vegetación para los usos de suelo de utilizados en la implementación del modelo TETIS en la cuenca de la Rambla de la Viuda.

El Mapa de uso de suelos sirve también para determinar las abstracciones iniciales debido a la Intercepción [mm], que consiste en la cantidad de agua de precipitación retenida, por objetos y/o vegetación, que se evapora sin alcanzar el suelo. Asociando un valor a cada uso de suelo.

Capacidad de almacenamiento hídrico del suelo

El almacenamiento estático máximo (H_u) [mm] es la cantidad máxima de agua que se almacena en la superficie del terreno que no puede salir como escorrentía superficial, y por tanto debe evaporarse o infiltrarse en el suelo. Depende de la forma y tipo de suelo, por ello para su cálculo se utilizan: el Mapa de pendientes, con el cual se obtiene el Mapa de almacenamiento superficial (AS) [mm] (Fig. 2.23.a), que consiste en el agua interceptada en superficie debido a encharcamiento, mediante la relación presentada en la Ec. 17; y el Mapa de uso de suelos, al que se le asocia a cada uso un valor correspondiente a la Profundidad de raíces (PR) [m]. Adicionalmente se usa información original proveniente de los Mapas de Agua disponible en la capa superior (AWC) [mm/m] y Obstáculo de raíces (ROO) [mm], llevando los mismos a la escala de trabajo y calculando H_u aplicando la Ec. 18, obteniendo el Mapa presentado en la Fig. 2.23.b.

$$\begin{aligned} AS &= 10 - 1.3 \cdot S_o; S_o \leq 0.075 \\ AS &= 10; S_o > 0.075 \end{aligned} \quad (17)$$

$$H_u = AS + AWC \cdot \min(PR; ROO) \quad (18)$$

Capacidad de infiltración

La capacidad de infiltración o conductividad hidráulica del suelo (K_s) [mm/hr] se obtiene aplicando las funciones de pedotransferencia de Saxton y Rawls, que relacionan parámetros hidráulicos con características físicas del suelo que provienen del Mapa de textura superficial dominante. El mapa obtenido sirve a su vez de Mapa de conductividad hidráulica del interflujo (K_{ss}) [mm/hr] al tener la misma distribución, cuyos valores se corrigen con la aplicación del factor corrector respectivo. Este se puede observar en la Fig. 2.24.a.

Conductividad hidráulica del acuífero

La conductividad hidráulica del acuífero (K_p) se estima utilizando el Mapa de unidades litológicas, que proporciona las permeabilidades cualitativas. Sánchez (2015) asigna a cada unidad un valor de permeabilidad en función de sus características y del tipo de suelo, usando valores procedentes de datos bibliográficos. Estos valores se pueden ver en la Tabla 2.5. El mapa resultante se observa en la Fig. 2.24.b.

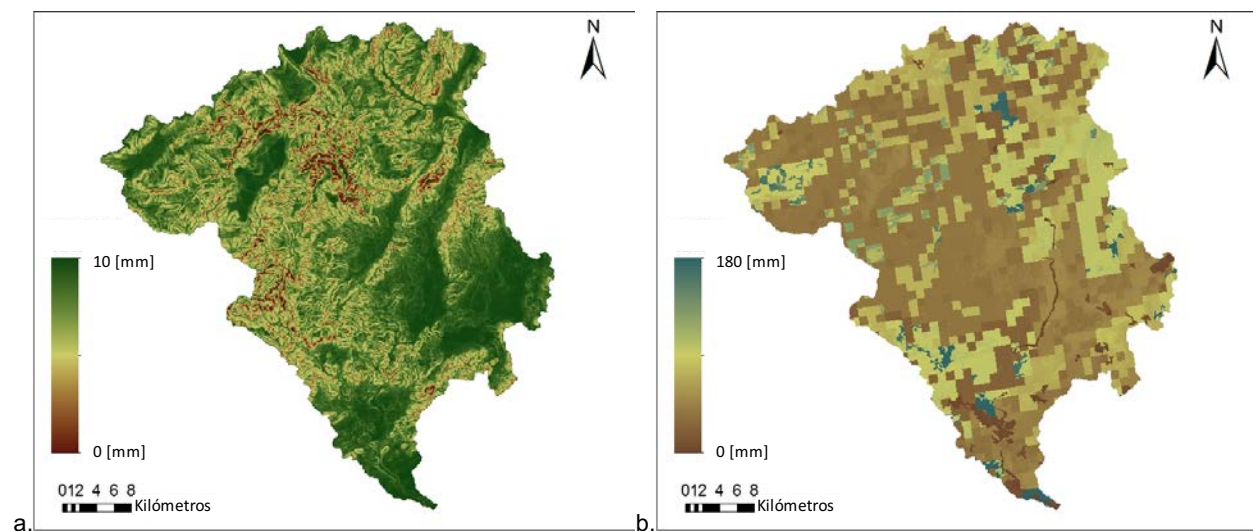


Figura 2.23. Mapas de: almacenamiento superficial (a) y almacenamiento máximo estático (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

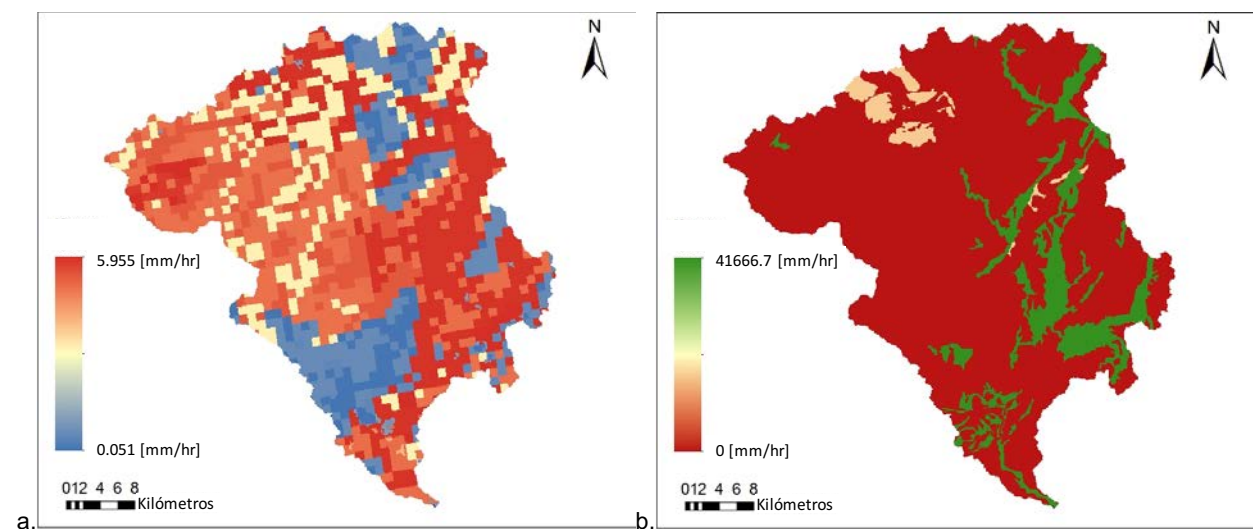


Figura 2.24. Mapas de: capacidad de infiltración del suelo (a) y conductividad hidráulica del acuífero (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

Tabla 2.5. Valores de permeabilidad adoptados en función de la categoría cualitativa.

| Categoría cualitativa de permeabilidad | Valor adoptado [mm/día] | Categoría cualitativa de permeabilidad | Valor adoptado [mm/día] |
|--|-------------------------|--|-------------------------|
| I-MB | 0.0000086400 | V-MB | 8.6400000000 |
| M-MB | 0.0000100000 | E-B | 17.7827940960 |
| D-MB | 0.0001000001 | V-B | 27.3220789920 |
| M-B | 0.0005623416 | Q-M | 31.6227766080 |
| I-B | 0.0008640000 | D-A | 100.0000000080 |
| C-MB, D-B | 0.0100000080 | C-M,E-M | 316.2277660800 |
| M-M | 0.0316227840 | Q-A | 5623.4132520000 |
| Q-B | 0.1778279520 | D-MA | 10000.000000800 |
| D-M,E-MB | 1.0000000080 | C-A | 56234.132520000 |
| C-B | 1.7782794000 | Q-MA, C-MA | 1000000.0000800 |

2.8.3. Estimación de parámetros geomorfológicos

Sánchez (2015) utiliza valores obtenidos en un estudio previo de la cuenca del Tajo, donde se detallan cinco zonas geomorfológicas: zona de alta montaña, cuenca media, cuenca baja, zona de cabecera y cauce del río, estos se pueden observar en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Coeficientes y exponentes utilizados en la OCG.

| Coeficientes | | Exponentes | |
|--------------|--------|-----------------|--------|
| k | 1.2968 | Φ | 0.7571 |
| c_1 | 3.1301 | ε_1 | 0.5088 |
| | | ε_2 | 0.3253 |
| c_d | 6.5156 | θ | 0.6548 |
| c_n | 0.047 | ξ | 0.1667 |

2.8.4. Calibración, validación y resultados del modelo hidrológico

El proceso de calibración del modelo TETIS consiste en buscar el valor adecuado de los nueve factores correctores, correspondientes al submodelo hidrológico, que lleven a trabajar a los parámetros distribuidos antes estimados, alcanzando con esto los parámetros efectivos, permitiendo al modelo trabajar de manera correcta. Esto se consigue buscando que las variables temporales de salida (resultados) de TETIS, se parezca a las observadas en campo al compararlas en un punto de salida y periodo específicos. Posteriormente se realiza el proceso validación, que utiliza los parámetros obtenidos en la calibración, pero comparando los resultados en: un punto diferente al de la calibración (validación espacial), en un periodo diferente (validación temporal), o en ambos (validación espacio-temporal).

Los principales resultados de TETIS son los datos de caudales, que pueden ser comparados con la información hidrológica observada. La comparación puede hacerse: cualitativamente, observando los hidrogramas observado y simulando, identificando las similitudes y diferencias entre los mismos; o cuantitativamente, mediante el uso de estadísticos que permiten evaluar la información esencial proveniente de una gran cantidad de datos, reduciéndolos a un valor único que representa el rendimiento del modelo, como el coeficiente de eficiencia (EF_2) de Nash y Sutcliffe (1970) que considera el error sistemático y aleatorio de las simulaciones (Ec. 19). El segundo método suele ser el más utilizado pues el primero depende de la percepción y experiencia del usuario, además el segundo permite la aplicación de métodos de optimización automatizados como el *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) de la Universidad de Arizona (Duan y col., 1993), que facilitan el proceso de calibración.

$$EF_2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (19)$$

donde: Y es la variable observada, X la simulada, i cada intervalo temporal y n el número de intervalos. EF_2 varía entre menos infinito y 1, siendo este su valor óptimo y considerándose mejor la representación mientras más cerca de este se esté.

La información hidrológica observada seleccionada por Sánchez (2015) para el proceso de calibración fueron las salidas de los embalses de M^a. Cristina, por su ubicación, cercana a la desembocadura de la cuenca, mientras, para la validación utilizó el punto de aforo de Vall d'Alba. Seleccionando el año hidrológico 2000-2001 como intervalo temporal de calibración, por su importancia, debido al registro de un evento de gran magnitud en dicho periodo. La validación temporal se realizó en los años hidrológicos posteriores, y la espacio-temporal a partir del 2003-2004, año en el cual se instaló el aforo en Vall d'Alba, en ambos casos hasta el periodo 2005-2006. El proceso se llevó a cabo utilizando el algoritmo SCE-UA que se encuentra incorporado a la interfaz de TETIS. Los valores iniciales, máximos y mínimos de cada factor corrector se pueden ver en la Tabla 2.7, en la misma también se encuentran los valores óptimos encontrados.

Tabla 2.7. Valores de los factores correctores obtenidos en la estimación previa.

| Factor corrector | Valor inicial | Valor mínimo | Valor máximo | Valor estimado |
|---|---------------|--------------|--------------|----------------|
| FC ₁ . Almacenamiento estático | 2.5 | 0 | 5 | 3.85004 |
| FC ₂ . Evaporación | 1.5 | 0.25 | 2 | 1.42488 |
| FC ₃ . Infiltración | 3 | 0.2 | 1 | 3.17854 |
| FC ₄ . Escorrentía directa | 1.5 | 0.5 | 5 | 0.59326 |
| FC ₅ . Percolación | 50 | 0.2 | 100 | 62.00343 |
| FC ₆ . Interflujo | 500 | 0.001 | 1000 | 675.82617 |
| FC ₇ . Flujo sub. no conectado | 50 | 0.5 | 100 | 91.96028 |
| FC ₈ . Flujo base | 0 | 0 | 1000 | 0 |
| FC ₉ . Velocidad del flujo | 0.001 | 0.000001 | 0 | 0.01315 |

El EF_2 obtenido en el periodo de calibración fue de 0.758, que es considerado aceptable según la literatura, este valor es inferior en todos los periodos de validación presentados en Tabla 2.8 como suele suceder normalmente, manteniéndose superior a 0.60 en la mayoría de los periodos de validación temporal, y en torno a 0.40 en validación espacio-temporal, lo que se considera aceptable en estos procesos. La Tabla 2.8 muestra también que tanto en calibración como validación el caudal máximo simulado se encuentra subestimado, lo que se puede observar de manera directa en sus hidrogramas respectivos: Fig. 2.25 para calibración, Fig. 2.26 para una de las validaciones temporales, y Fig. 2.27 que muestra una validación espacio-temporal.

Tabla 2.8. Resultados de la implementación previa del modelo.

| | | 2000-2001 | | 2001-2002 | | 2002-2003 | | 2003-2004 | | 2004-2005 | | 2005-2006 | |
|---------------------------|-----------|-----------|---------|-----------|--------|-----------|---------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| | | EF_2 | Máx | EF_2 | Máx | EF_2 | Máx | EF_2 | Máx | EF_2 | Máx | EF_2 | Máx |
| | | - | [m³/s] | - | [m³/s] | - | [m³/s] | - | [m³/s] | - | [m³/s] | - | [m³/s] |
| M ^a . Cristina | Observado | - | 420.932 | - | 30.886 | - | 49.2921 | - | 52.402 | - | 0.5278 | - | 28.528 |
| | Simulado | 0.758 | 256.731 | 0.736 | 20.031 | 0.481 | 37.132 | 0.601 | 26.634 | 0.601 | 0.392 | -2.531 | 27.732 |
| Vall d'Alba | Observado | - | - | - | - | - | - | - | 31.288 | - | 1.444 | - | 19.105 |
| | Simulado | - | - | - | - | - | - | 0.397 | 23.320 | -0.281 | 0.199 | 0.494 | 15.703 |

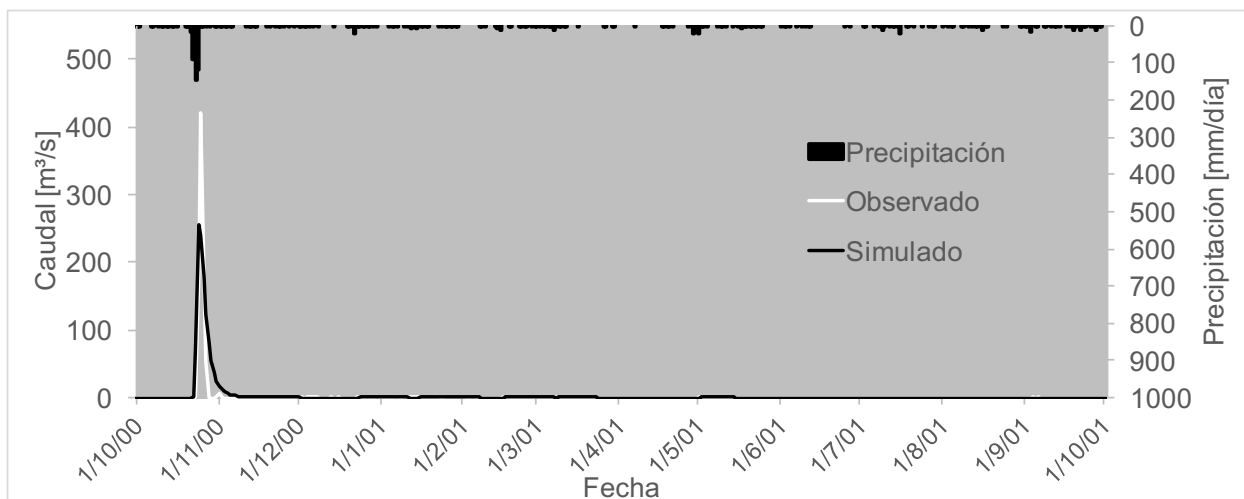


Figura 2.25. Hidrogramas observado y simulado en el periodo de calibración (2000-2001) en la estación Mª. Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda (estimación previa).

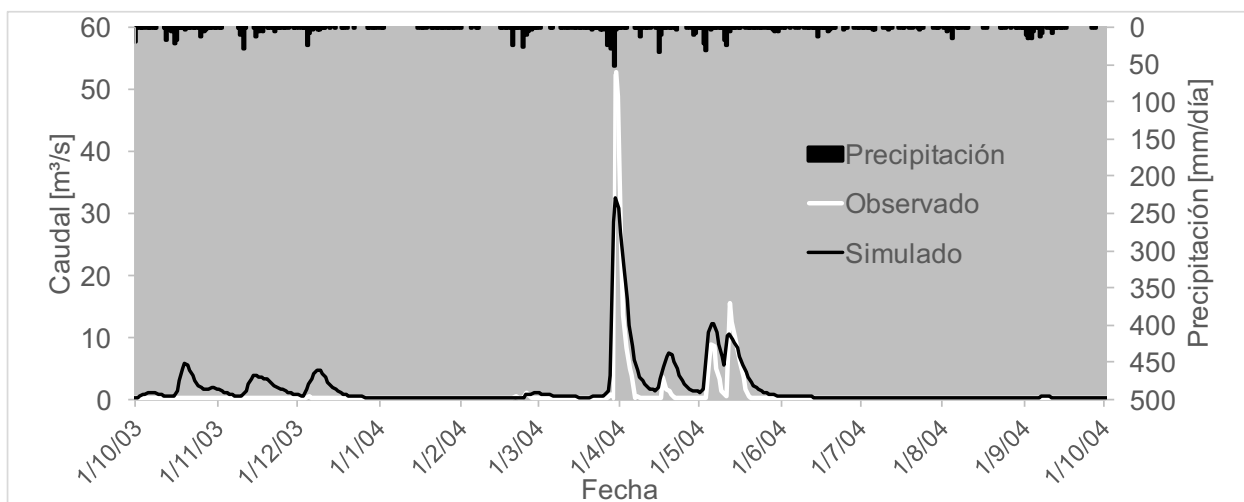


Figura 2.26. Hidrogramas observado y simulado en el periodo de validación temporal (2003-2004) en la estación Mª. Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda (estimación previa).

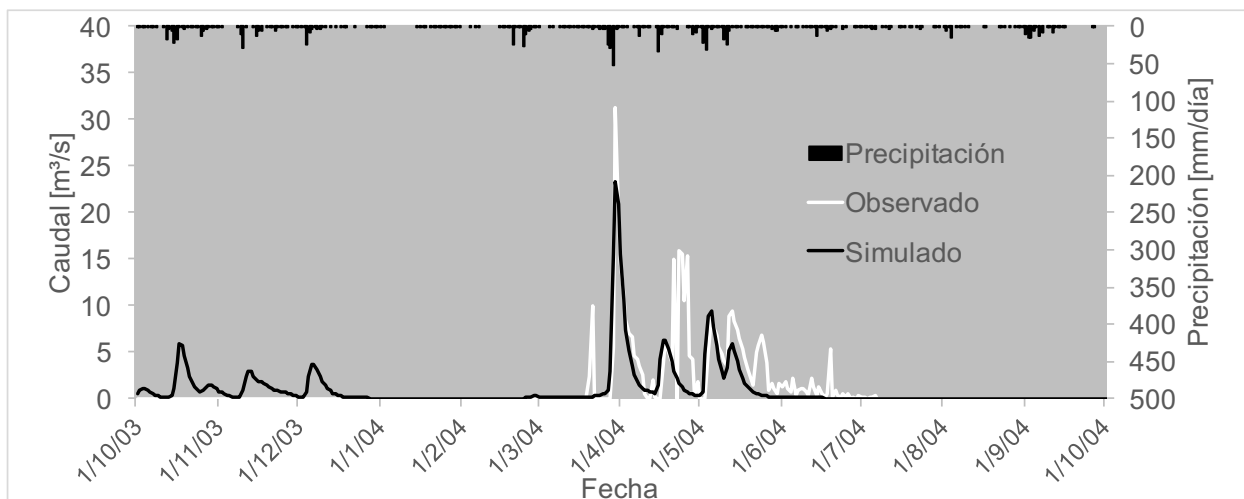


Figura 2.27. Hidrogramas observado y simulado de validación espacio-temporal (2003-2004) en la estación Vall d'Alba de la cuenca de la Rambla de la Viuda (estimación previa).

Analizando de manera específica los eventos en los que se dan los caudales los máximos, en el periodo de calibración (Fig. 2.28.a) y validación (Fig. 2.28.b) se puede ver que el máximo de caudal se dan un día después de producidos los eventos de precipitación máxima, mostrando un desfase, sin embargo, el área de la cuenca, no es lo suficientemente grande para que su tiempo de concentración sea de un día, que es el tiempo en el cual toda la cuenca contribuye al flujo en un punto de salida (Velez y Botero, 2011).

Sí bien no se sabe por qué se produce este desfase, las causas posibles pueden ser: los diferentes intervalos de agregación de la precipitación y el caudal, la primera suele agregarse de 07:00 a 07:00, mientras que la otra serie suelen agregarse de 0:00 a 0:00, si las lluvias se producen en horas tempranas de la mañana (Fig. 2.29.a), estas se agregarán al día anterior a cuando se producen, sin embargo los caudales producidos serían agregados el mismo día; también puede ocurrir que los eventos de lluvia se den entre la tarde y la noche de un día (Fig. 2.29.b), con un tiempo de residencia de 7 u 8 horas, acorde al tamaño de la cuenca de la Rambla de la Viuda (Velez y Botero, 2011), el caudal podría trasladarse al día siguiente. Al observar diferentes pluviómetros y eventos en la cuenca hidrográfica del Turia se pudo identificar que estas dos particularidades suelen presentarse continuamente en eventos de precipitación fuerte.

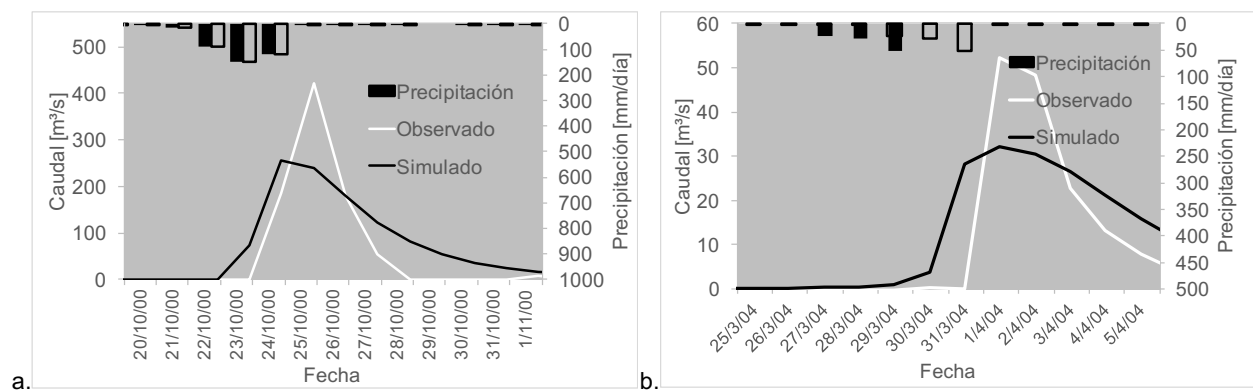


Figura 2.28. Hidrogramas observado y simulado en los periodos de: calibración (2000–2001) (a) y validación temporal (2003–2004) (b) en la estación M^a. Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda (estimación previa).

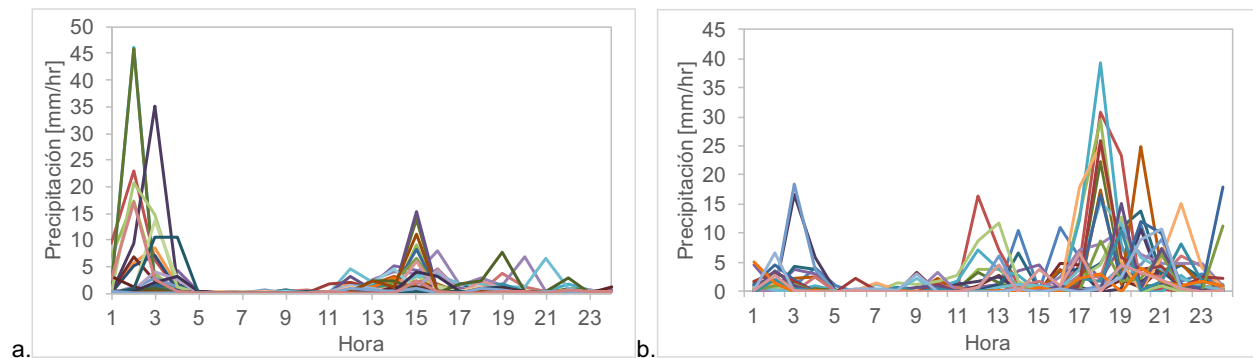


Figura 2.29. Distribución horaria de precipitaciones en diferentes pluviómetros y eventos de la cuenca hidrográfica del Jucar.

Durante el proceso de calibración automática, tanto el modelo como el algoritmo de calibración intentan ajustarse de la mejor manera para reproducir el evento observado en función de un criterio de evaluación cuantitativo. Por un lado, el modelo, por su conceptualización y las

características de la cuenca (tiempo de concentración) simula el pico máximo el mismo día en el que se da el evento de precipitación, mientras que el algoritmo de calibración que busca maximizar el valor de EF_2 necesita un caudal de magnitud similar a la observada, que solo se pudiera alcanzar con la precipitación de los días precedente. El proceso no considera el desfase por agregaciones antes descrito, pues no está en su criterio evaluar estos errores, y el algoritmo trata de solucionar el problema mediante la utilización de un valor del factor corrector correspondiente a la velocidad de flujo que reduzca la misma, de tal forma que la magnitud del pico simulado alcanzado el día del evento se traslade al siguiente, lo que provoca un efecto de laminación, que reduce su magnitud. Sin embargo de esta manera, la comparación entre el pico observado y simulado mejora el valor de EF_2 , obteniendo una representación aceptable desde el punto de vista cuantitativo. Pero que sin embargo, al observar los hidrogramas simulados, tanto en el periodo de calibración (Fig. 2.28.a) como en el de validación (Fig. 2.28.b), estos no representa la realidad de la cuenca.

2.8.5. Cambios a la implementación previa del modelo hidrológico

Los errores encontrados en el modelo hidrológico implementado para el trabajo de Sánchez (2015) en la cuenca de la Rambla de la Viuda podrían afectar los resultados del presente trabajo, que en primera instancia consideraba trabajar con dicho modelo como partida, evitando repetir el proceso, y usando el tiempo disponible para alcanzar los objetivos planteados para este trabajo (estimación de pérdidas, modelización de sedimentos y Cambio Climático), sin embargo, se consideró necesario corregir dichos errores, en pro de alcanzar una mejor representación de la cuenca y mejores resultados en cada uno de los objetivos específicos.

El principal cambio consistió en adelantar un día las series temporales correspondientes a la información hidrológica utilizada, es decir: del caudal de salida del embalse de M^a. Cristina y del aforo de Vall d'Alba. Con ello, el evento de precipitación máxima y el pico de caudal coinciden en el mismo día, acorde al tiempo de residencia de la cuenca. Buscando con ello que el modelo logre simular los caudales punta sin generar el efecto de laminación necesario para llevar el máximo al día siguiente, alcanzando una representación más acorde al pico real así como a la hidrología general de la Cuenca.

Corregido el desfase temporal, fue necesario volver a calibrar los factores correctores del modelo, ya que los obtenidos previamente (Tabla 2.7) ahora no son representativos. Para ello se consideró el mismo periodo de calibración (2000-2001), así como los mismos periodos de validación, para así contrastar los nuevos resultados con los anteriores, y constatar si los cambios realizados pueden considerarse como acertados.

El proceso de calibración de los nuevos factores correctores no fue llevado a cabo utilizando el algoritmo de automatizado SCE-UA, realizándose esta vez mediante ensayos de prueba y error, modificando los valores de los nueve factores manualmente, aumentando el peso sobre el criterio cualitativo, comparando los hidrogramas de caudales observados y simulados más detalladamente, evitando repetir problemas como el de la implementación previa, sin perder de vista el criterio cuantitativo, que verifica dichos resultados, me la obtención de un valor de EF_2 considerado como aceptable.

Los resultados de la nueva calibración se muestran mejores frente a la implementación previa, el coeficiente EF_2 mejora considerablemente en calibración, pasando de 0.758 a 0.905, indicando un desempeño mucho mejor, esto también refleja en el error medido con respecto al pico máximo, que antes subestimaba cerca de 160 m³/s debido al efecto de laminación del

caudal, a pesar de ahora estar sobrestimado, como se aprecia de manera clara al comparar el hidrograma simulado en la implementación previa y en la actual, presentados en la Fig. 2.30.a. En las validaciones temporal y espacio-temporal los valores de EF_2 no cambian en gran medida, sin embargo existe una disminución importante en el error de caudales máximos por la disminución del efecto de laminación, como se ve en la Tabla 2.9. pero que al igual que en calibración, ahora muestra una sobrestimación de estos (Fig. 2.30.b). Error que se atribuye a las pérdidas en cauce, no captadas por el modelo, y que más adelante se incorporan al mismo para corregir el problema.

Tabla 2.9. Resultados de la implementación del modelo, con corrección de desfase temporal.

| | | 2000-2001 | | 2001-2002 | | 2002-2003 | | 2003-2004 | | 2004-2005 | | 2005-2006 | |
|---------------------------|-------------|-----------|---------|-----------|--------|-----------|---------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| | | - | [m³/s] | - | [m³/s] | - | [m³/s] | - | [m³/s] | - | [m³/s] | - | [m³/s] |
| | | EF_2 | Máx | EF_2 | Máx | EF_2 | Máx | EF_2 | Máx | EF_2 | Máx | EF_2 | Máx |
| M ^a . Cristina | Observado | - | 420.932 | - | 30.886 | - | 49.2921 | - | 52.402 | - | 0.5278 | - | 28.528 |
| | Simulado | 0.905 | 452.047 | 0.739 | 35.777 | -0.003 | 61.154 | 0.611 | 65.421 | -2.088 | 0.338 | -4.290 | 66.803 |
| | Sim. Previa | 0.758 | 256.731 | 0.736 | 20.031 | 0.481 | 37.132 | 0.601 | 26.634 | 0.601 | 0.392 | -2.531 | 27.732 |
| Vall d'Alba | Observado | - | - | - | - | - | - | - | 31.288 | - | 1.444 | - | 19.105 |
| | Simulado | - | - | - | - | - | - | 0.407 | 36.236 | -0.276 | 0.199 | -1.482 | 37.585 |
| | Sim. Previa | - | - | - | - | - | - | 0.397 | 23.320 | -0.281 | 0.199 | 0.494 | 15.703 |

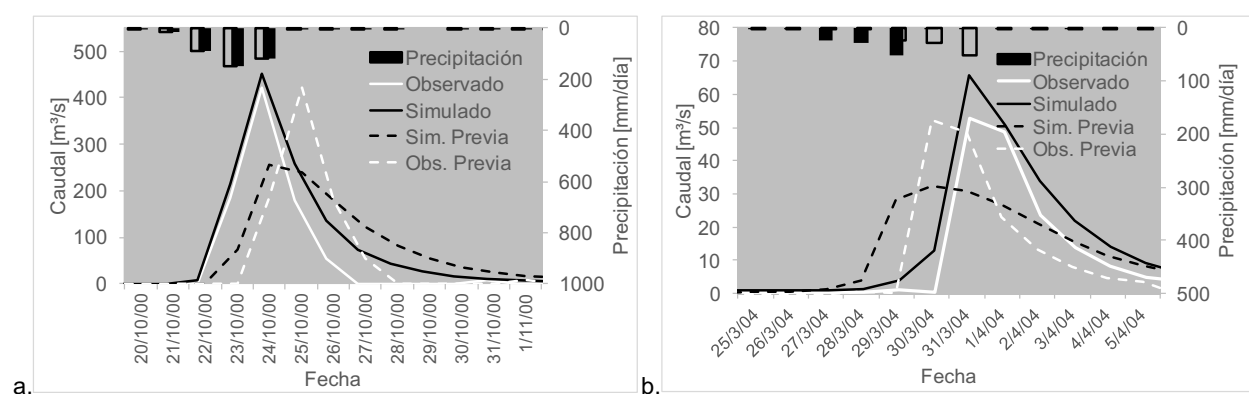


Figura 2.30. Hidrogramas observados y simulados en los periodos de: calibración (2000–2001) (a) y validación temporal (2003–2004) (b) en la estación M^a. Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con corrección de desfase temporal.

CAPÍTULO III. ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS EN CAUCE

En este capítulo se busca realizar una estimación de las pérdidas en cauce a lo largo de la cuenca, permitiendo establecer la magnitud del fenómeno, la distribución espacial del mismo e identificar las características litológicas que influyen en el proceso. Permittiéndonos obtener una mejor representación de la hidrológica de la cuenca de la Rambla de la viuda y una metodología que se podría aplicar en otras cuencas mediterráneas.

Observando el hidrograma simulado a la entrada del embalse de M^a. Cristina en el periodo 2003-2004, tras la corrección del desfase temporal (Fig. 3.1) se puede apreciar que el mismo presenta un flujo en partes del periodo (octubre 2003 – enero 2004) donde el hidrograma observado no los muestra, a pesar de que existen lluvias registradas, siendo un claro indicio de la existencia de pérdidas en la cuenca. Este periodo ha sido seleccionado para realizar una estimación inicial de las pérdidas globales (GL) y recalibrar el modelo incorporando las pérdidas, acorde a lo dicho en la metodología, descartando el periodo de calibración anterior (2000–2001) debido a que la magnitud del evento en dicho periodo no hace evidentes las pérdidas en el mismo (Fig. 3.2). Considerando sin embargo, los factores correctores estimados en ese periodo como valores iniciales, ya que no tienen mucha influencia del fenómeno. Lo que además resulta ventajoso, pues disminuye el número de combinaciones posibles.

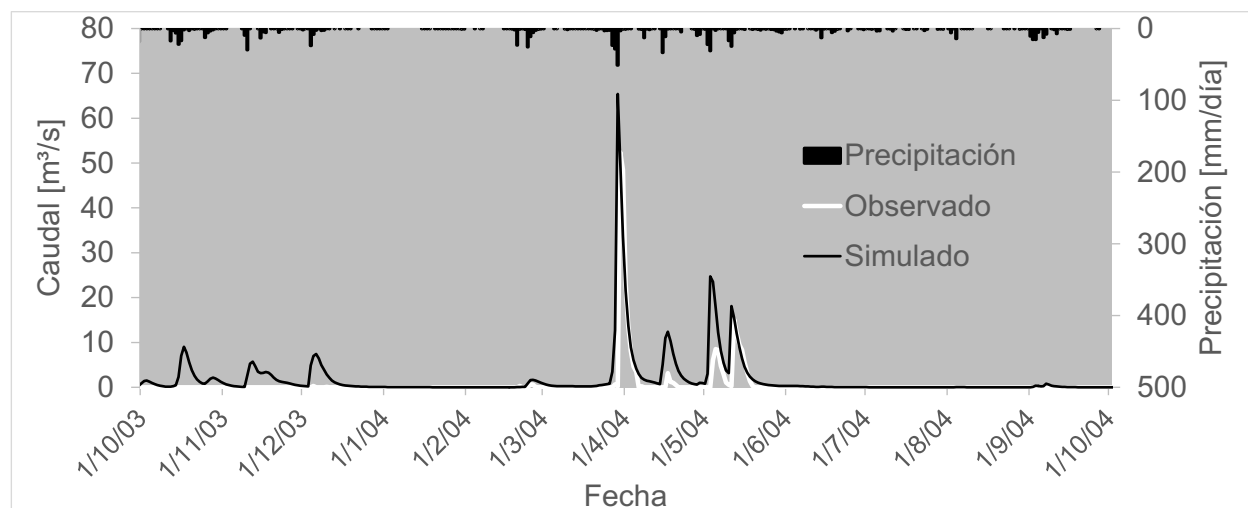


Figura 3.1. Hidrogramas observados y simulados en el periodo 2003–2004 en la estación M^a. Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con corrección de desfase temporal.

3.1. Estimación inicial de pérdidas globales

Una estimación inicial de GL igual 6 m³/s fue obtenida restando un caudal constante a las salidas del modelo (Fig 3.1) y evaluando el valor del coeficiente de eficiencia EF₂, mejorando este de 0.611 a 0.755 en el periodo 2003-2004. Apreciándose ya una mejoría en el desempeño del modelo que confirma la influencia del fenómeno en la hidrología de la cuenca, y así mismo, permite establecerse una magnitud en torno a la cual deben estar las pérdidas sirviendo como valor inicial para su estimación.

3.2. Estimación de las zonas con pérdidas y magnitud de las mismas

La información espacial disponible relacionada las pérdidas en la cuenca son: el mapa de zonas kársticas, al ser zonas que facilitan los procesos de infiltración de agua; y el mapa de relación entre el flujo superficial y subterráneo de la cuenca hidrográfica del Júcar, que identifica los tramos de sus afluentes donde están conectado con el acuífero de manera directa o indirecta en función los niveles piezométricos. El primer caso se da cuando el nivel del acuífero alcanza la cota del lecho. En el segundo caso, al no alcanzar la cota se produce una desconexión hidráulica entre el río y el acuífero, permitiendo una infiltración constante de agua a través del lecho conocida como efecto ducha (Murillo, 2013). La Fig. 3.1 muestra las zonas de la cuenca y tramos del río donde se dan estos fenómenos.

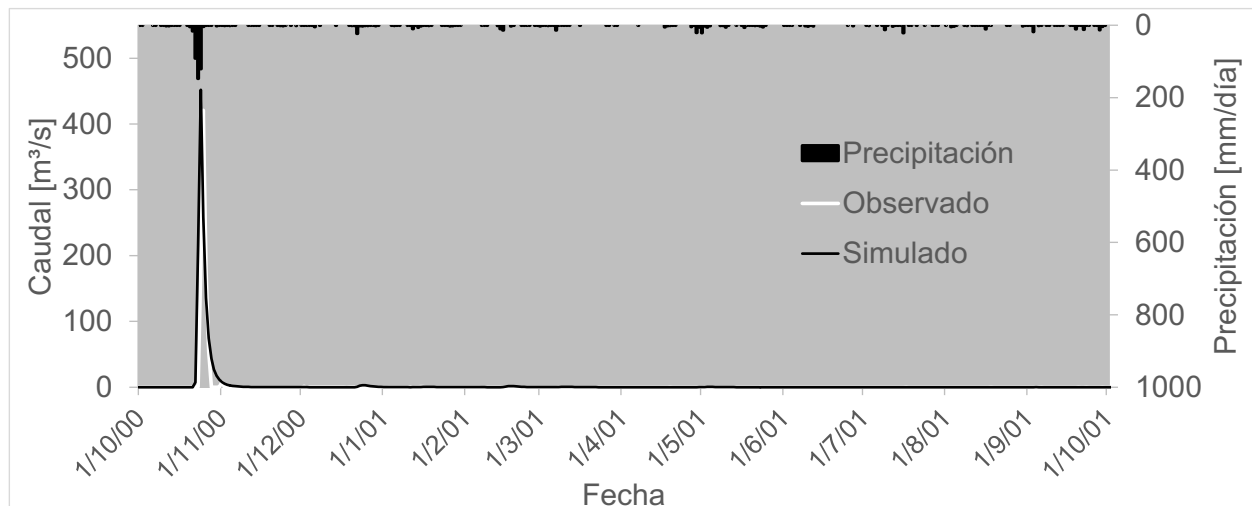


Figura 3.2. Hidrogramas observados y simulados en el periodo 2000–2001 en la estación Mª. Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con corrección de desfase temporal.

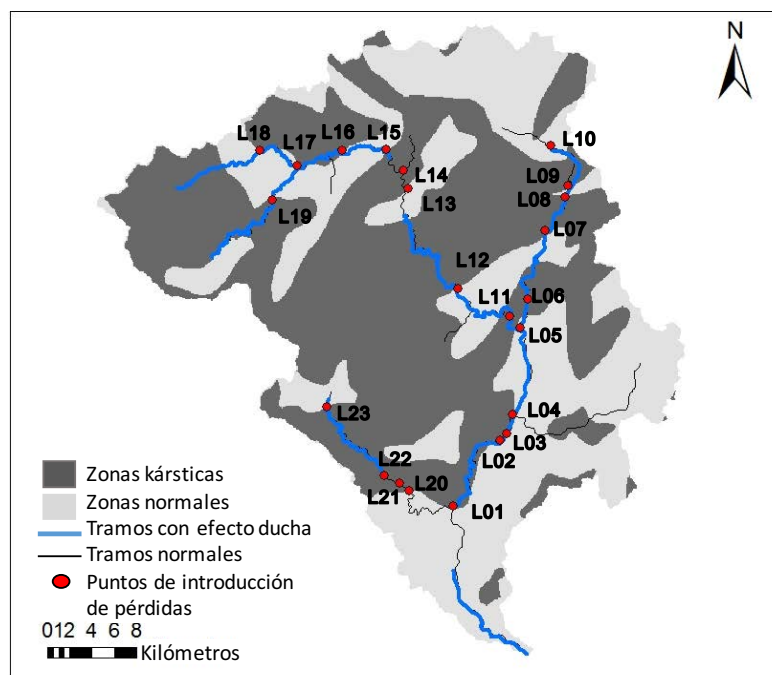


Figura 3.3. Mapa de zonas kársticas, y de tramos de río con efecto ducha dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

Tomando en cuenta que existen dos fenómenos (zonas kársticas, efecto ducha) y que se pueden presentar simultáneamente, se modificó la Ec. 1 para considerar diferentes tipos de zonas, estableciendo tres parámetros en función del tipo de fenómeno, teniendo así un primer parámetro para los tramos de río sobre zonas kársticas (F_k), otro para los tramos con efecto ducha (F_d) y finalmente uno para las zonas donde la información espacial indica que se dan los fenómenos (F_m). Intentando darle más peso a esta última, pues por sus características es probable que en estas zonas las pérdidas sean mayores. El cálculo de las pérdidas en la cuenca queda ahora representado mediante en la Ec. 20.

$$GL = \sum_{i=1}^n LL_i = F_d \cdot \sum_{i=1}^w Ap_i + F_k \cdot \sum_{i=1}^y Ap_i + F_m \cdot \sum_{i=1}^z Ap_i \quad (20)$$

El área de cada tramo de cauce fue estimada utilizando las imágenes del plan nacional de ortofotografía, midiendo sobre estas de forma aproximada, mediante el uso de un software de procesamiento GIS, el ancho del cauce a una separación de kilómetro. Para luego calcular el área de los polígonos formados. A lo largo de la cuenca se identificaron un total de 27 tramos en los que se producen pérdidas, en la mayoría de estos el fenómeno más común fue el combinado, como se ve en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Tramos de pérdidas en la cuenca de la Rambla de la Viuda.

| Tramo | Punto de introducción | Fenómeno | Área Total [m ²] | Peso | Pérdidas [m ³ /s] |
|-------|-----------------------|--------------|------------------------------|---------|------------------------------|
| 1 | L01 | Combinadas | 1210000 | 18.97% | 1.518 |
| 2 | L02 | E. Ducha | 260000 | 3.96% | 0.317 |
| 3 | L03 | Combinadas | 437500 | 6.86% | 0.549 |
| 4 | L04 | E. Ducha | 1163950 | 17.74% | 1.420 |
| 5 | L05 | Combinadas | 165500 | 2.60% | 0.208 |
| 6 | L06 | E. Ducha | 415000 | 6.33% | 0.506 |
| 7 | L07 | Combinadas | 195000 | 3.06% | 0.245 |
| 8 | L08 | E. Ducha | 85000 | 1.30% | 0.104 |
| 9 | L09 | Combinadas | 487285 | 7.64% | 0.611 |
| 10 | L10 | E. Ducha | 25000 | 0.38% | 0.030 |
| 11 | L05 | Combinadas | 136000 | 2.13% | 0.171 |
| 12 | L11 | E. Ducha | 295000 | 4.50% | 0.360 |
| 13 | L12 | Combinadas | 421500 | 6.61% | 0.529 |
| 14 | L13 | Z. Kársticas | 73950 | 1.11% | 0.088 |
| 15 | L14 | Z. Kársticas | 99350 | 1.49% | 0.119 |
| 16 | L14 | Combinadas | 85000 | 1.33% | 0.107 |
| 17 | L15 | E. Ducha | 246000 | 3.75% | 0.300 |
| 18 | L16 | Combinadas | 314000 | 4.92% | 0.394 |
| 19 | L17 | Combinadas | 25500 | 0.40% | 0.032 |
| 20 | L18 | E. Ducha | 7000 | 0.11% | 0.009 |
| 21 | L17 | E. Ducha | 44500 | 0.68% | 0.054 |
| 22 | L19 | Combinadas | 50000 | 0.78% | 0.063 |
| 23 | L01 | Z. Kársticas | 35750 | 0.53% | 0.043 |
| 24 | L20 | Z. Kársticas | 10000 | 0.15% | 0.012 |
| 25 | L21 | Z. Kársticas | 117500 | 1.76% | 0.141 |
| 26 | L22 | Combinadas | 54500 | 0.85% | 0.068 |
| 27 | L23 | E. Ducha | 4000 | 0.06% | 0.005 |
| - | - | TOTAL | 6463785 | 100.00% | 8.000 |

TETIS permite la introducción y extracción de caudales externos a la cuenca, para considerar en la simulación la introducción de demandas externas a la cuenca, como canales de riego, así como el ingreso de caudales externos provenientes de transvases. Utilizando esta característica, las pérdidas son introducidas al modelo como caudales extraídos en un punto, que se ha definido al final de cada tramo donde se producen, como ilustra la Fig. 3.3. Los tramos más cercanos a la desembocadura, viniendo desde el margen derecho son los con

mayor área, y por tanto donde mayores pérdidas se producen. El ancho del cauce tiende a reducirse al ir aguas arriba en la cuenca, reduciéndose también la magnitud de las pérdidas. En total las zonas con pérdidas cubren casi 6.5 km² del lecho del cauce, siendo una área importante, explicando la magnitud del fenómeno.

3.3. Calibración y validación del modelo y los parámetros de estimación de pérdidas

De manera adicional a los parámetros del submodelo hidrológico de TETIS se calibran los 3 parámetros definidos para la estimación de pérdidas y su distribución (Fk, Fd y Fm), definiendo la magnitud real del proceso, así como la influencia de cada fenómeno. El proceso se realizó manualmente, como se hizo desde la modificación de la implementación anterior, por los mismos motivos, considerando además en este caso la mayor influencia que tiene proceso cualitativo, al observarse constantemente la forma del hidrograma.

La Tabla 3.2. muestra los valores iniciales con los que arrancó el proceso de calibración, considerando los factores correctores obtenidos en la calibración con desfase temporal como valores iniciales para su nueva estimación. Para los parámetros de pérdidas, los valores iniciales fueron los que producirían pérdidas equivalentes a 6 m³/s, la estimación inicial de GL,

Tabla 3.2. Valores de los parámetros y factores correctores calibrados en la implementación con pérdidas.

| Parámetros | | | Valor inicial | Valor estimado |
|-----------------|--------------------------|---------------------|---------------|----------------|
| GL | Pérdidas Globales | [m ³ /s] | 6 | 8 |
| Fk | Zonas kársticas | [m/s] | 8.973 E-07 | 1.196E-06 |
| Fd | Zonas con efecto ducha | [m/s] | 9.147 E-07 | 1.220E-06 |
| Fm | Zonas combinadas | [m/s] | 9.408E-07 | 1.254E-06 |
| FC ₁ | Almacenamiento estático | - | 3.85004 | 3.85004 |
| FC ₂ | Evaporación | - | 1.42488 | 1.42488 |
| FC ₃ | Infiltración | - | 3.17854 | 2.00000 |
| FC ₄ | Escurrentía directa | - | 0.60000 | 0.60000 |
| FC ₅ | Percolación | - | 62.00343 | 62.00343 |
| FC ₆ | Interflujo | - | 675.82617 | 675.82617 |
| FC ₇ | Pérdidas | - | 91.960281 | 91.960281 |
| FC ₈ | Flujo base | - | 1.391590 | 1.391590 |
| FC ₉ | Velocidad del flujo base | - | 0.013150 | 0.032000 |

Tras la calibración, las pérdidas globales aumentaron en el proceso, pasando a ser 8 m³/s distribuidas a lo largo de la cuenca como muestra la última columna de la Tabla 3.1 las zonas con mayor influencia son las que presentan efecto combinado, el fenómeno más influyente parece ser el efecto ducha. Solo se modificaron los factores correctores de la infiltración y la velocidad de flujo base, relacionados con el agua que se infiltra en el cauce, es posible que esto se deba a que sus valores anteriores favorecían el proceso de modelización para tratar de representar parcialmente las pérdidas que se producían en el cauce.

Se puede apreciar una evidente mejoría en la evaluación cuantitativa del desempeño del modelo, con un aumento importante de EF₂ en el periodo de calibración seleccionado, pasando a ser de 0.930, de igual forma, el caudal máximo simulado, a pesar de que sigue sobrestimando al observado, la diferencia ahora es menor, esto también se ve reflejado en sus hidrogramas (Fig. 3.4), la introducción de las pérdidas corrige plenamente el problema del flujo en periodos no registrados de los primeros meses, además mejora también el desempeño de los picos, captando su forma de mejor manera, especialmente en el máximo principal (Fig. 3.5.a).

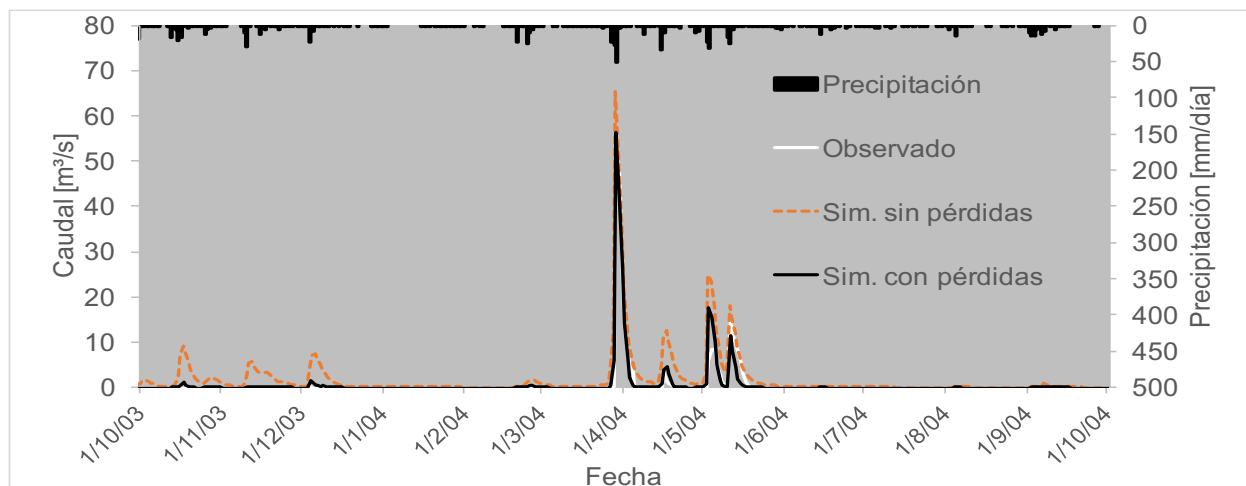


Figura 3.4. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de calibración (2003-2004) en la estación Mª. Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas.

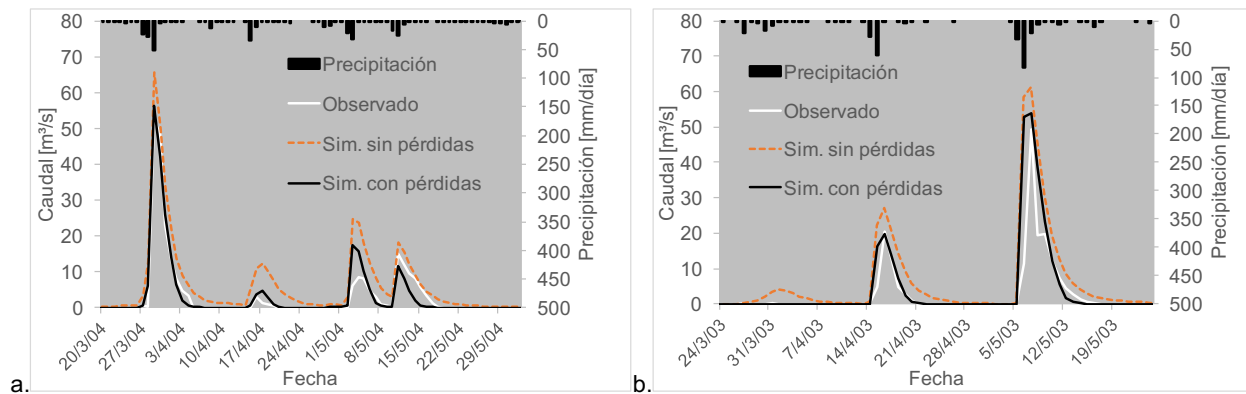


Figura 3.5. Hidrogramas observado y simulados en los periodos de: calibración (2003-2004) (a) y validación temporal (2002-2003) (b) en la estación Mª. Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas.

En la validación temporal también se aprecian mejoras en los coeficientes EF_2 de todos los periodos (Tabla 3.3) como el 2002-2003, que anteriormente tenía un mal desempeño (-0.003), y ahora pasa a tener un valor aceptable (0.444), o el periodo 2001-2003, con un una mejoría similar a la del periodo de calibración, pasando de un desempeño bueno (0.739) a uno excelente (0.924). En el periodo 2000-2001, también se hace evidente una mejoría leve, a pesar que por su magnitud los efectos de las pérdidas no eran notorios.

Tabla 3.3. Resultados de la implementación del modelo con introducción de pérdidas.

| | | 2000-2001 | | 2001-2002 | | 2002-2003 | | 2003-2004 | | 2004-2005 | | 2005-2006 | |
|--------------|-------------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | | EF_2 | Máx [m³/s] | EF_2 | Máx [m³/s] | EF_2 | Máx [m³/s] | EF_2 | Máx [m³/s] | EF_2 | Máx [m³/s] | EF_2 | Máx [m³/s] |
| Mª. Cristina | Observado | - | 420.932 | - | 30.886 | - | 49.2921 | - | 52.402 | - | 0.5278 | - | 28.528 |
| | Sim. con pérdidas | 0.928 | 443.578 | 0.924 | 28.449 | 0.444 | 53.817 | 0.930 | 56.235 | -0.073 | 0.163 | -1.829 | 57.303 |
| | Sim. sin Pérdidas | 0.905 | 452.047 | 0.739 | 35.777 | -0.003 | 61.154 | 0.611 | 65.421 | -2.088 | 0.338 | -4.290 | 66.803 |
| Vall d'Alba | Observado | - | - | - | - | - | - | - | 31.288 | - | 1.444 | - | 19.105 |
| | Sim. con pérdidas | - | - | - | - | - | - | 0.428 | 31.888 | -0.024 | 0.000 | -0.526 | 33.289 |
| | Sim. sin Pérdidas | - | - | - | - | - | - | 0.407 | 36.236 | -0.276 | 0.199 | -1.482 | 37.585 |

La mejoría también se refleja también en sus hidrogramas, reaccionando de la misma forma que en el periodo de calibración, sin producir caudal en periodos donde no se registran observados como se aprecia en la Fig. 3.6 para el periodo 2001-2002 y Fig. 3.7 para 2002-

2003, de igual manera la diferencia de magnitudes en los picos es mucho menor en todos los casos (Tabla 3.3), como en el caso del periodo 2002-2003, teniendo antes una sobreestimación de casi $12 \text{ m}^3/\text{s}$ y ahora es inferior a $3 \text{ m}^3/\text{s}$, la forma de estos también se ve mejorada estrechándose junto a la reducción de magnitud captando mejor la dinámica del hidrograma observado (Fig. 3.5.b). En el periodo de validación temporal 2004-2005 (Fig. 3.8) no se puede evidenciar si existe una con la introducción de las pérdidas, debido a que el modelo no capta la dinámica de flujo en dicho periodo ya que es un año totalmente seco, donde el caudal máximo observado alcanza apenas $0.528 \text{ m}^3/\text{s}$.

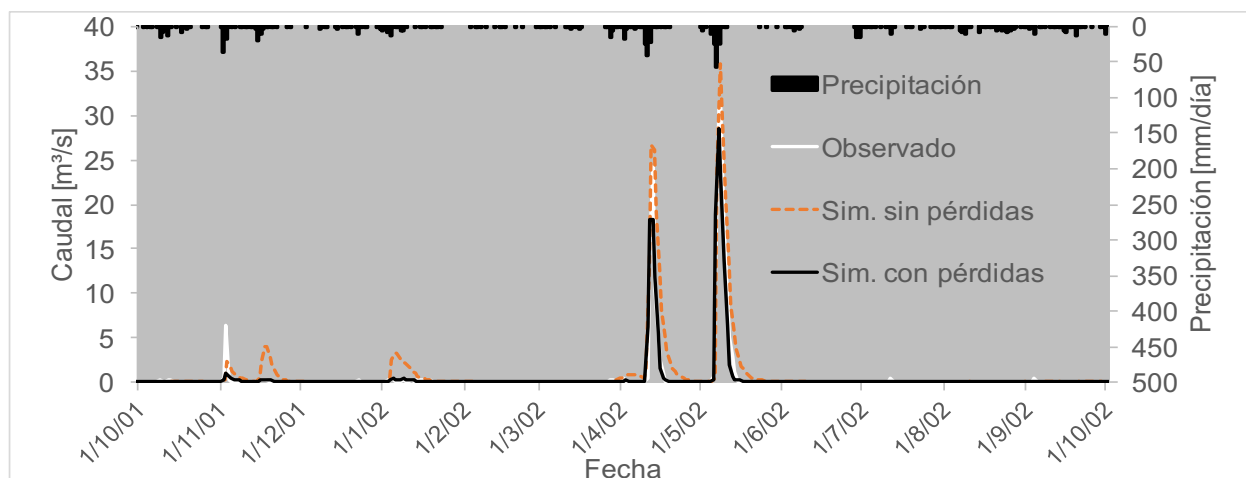


Figura 3.6. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de validación temporal (2001-2002) en la estación Mª. Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas.

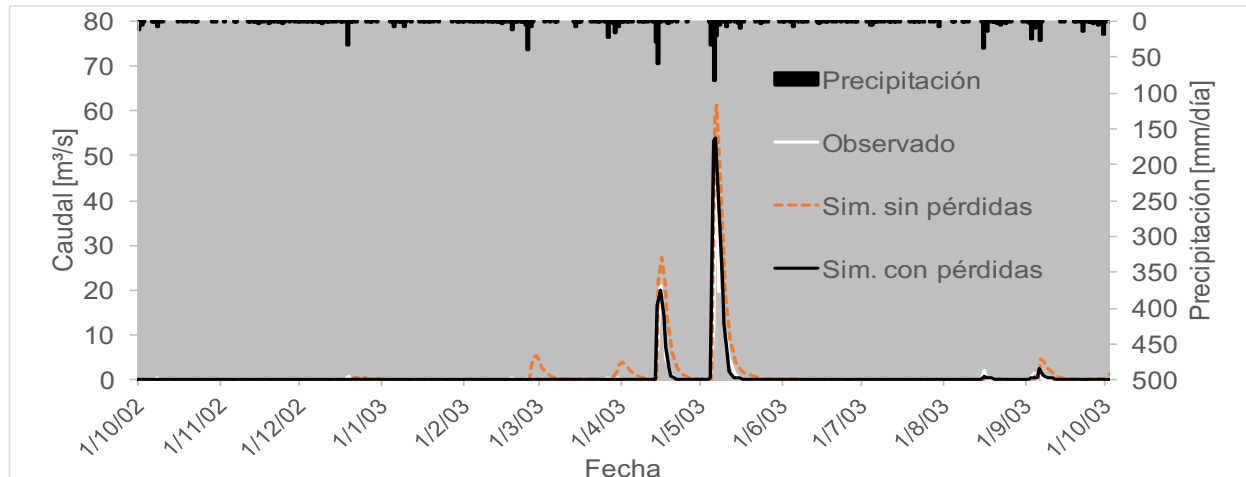


Figura 3.7. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de validación temporal (2002-2003) en la estación Mª. Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas.

En los resultados de la validación espacial se pueden observar mejoras, principalmente en la magnitud de los picos, sin la estimación de las pérdidas había una sobreestimación de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y ahora el simulado tiene una magnitud similar al observado, el coeficiente EF_2 también tiene una leve mejora. Observando su hidrograma en la Fig. 3.9 donde a pesar de que se nota una reducción en el flujo en los primeros meses, comparado al caso sin pérdidas, se observa de igual manera caudal simulado en un periodo donde los registros a pesar de existentes, son muy bajos.

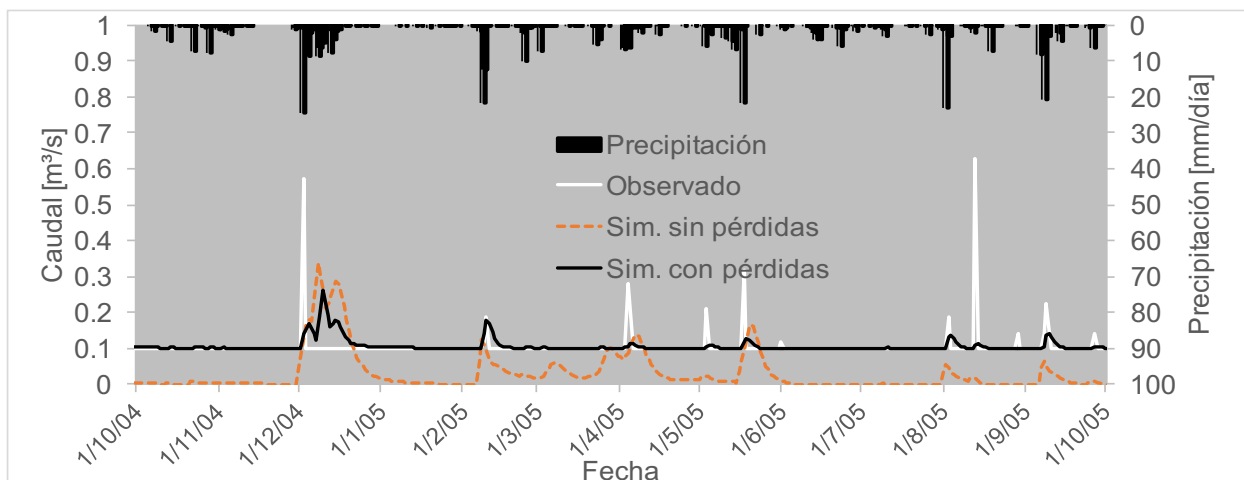


Figura 3.8. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de validación temporal (2004-2005) en la estación Mª. Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas.

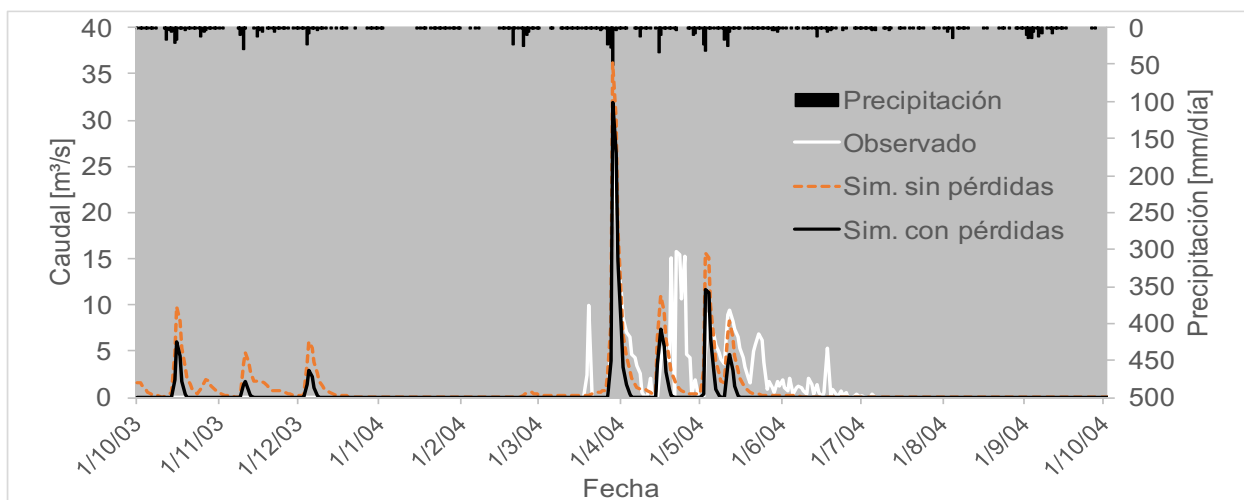


Figura 3.9. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de validación espacial (2003-2004) en la estación Vall d'Alba de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas.

En el periodo 2005-2006 de la validación espacio-temporal, en su hidrograma (Fig. 3.10) se puede ver que este error si es corregido sin embargo en los dos picos principales que se producen se tiene una alta sobrestimación razón por la cual coeficiente EF_2 en este periodo no es bueno (-0.526). En el periodo 2004-2005 (Fig. 3.11), al igual que en el caso de la validación temporal, no se puede observar si existen mejoras en la validación espacio-temporal, al ser un año muy seco.

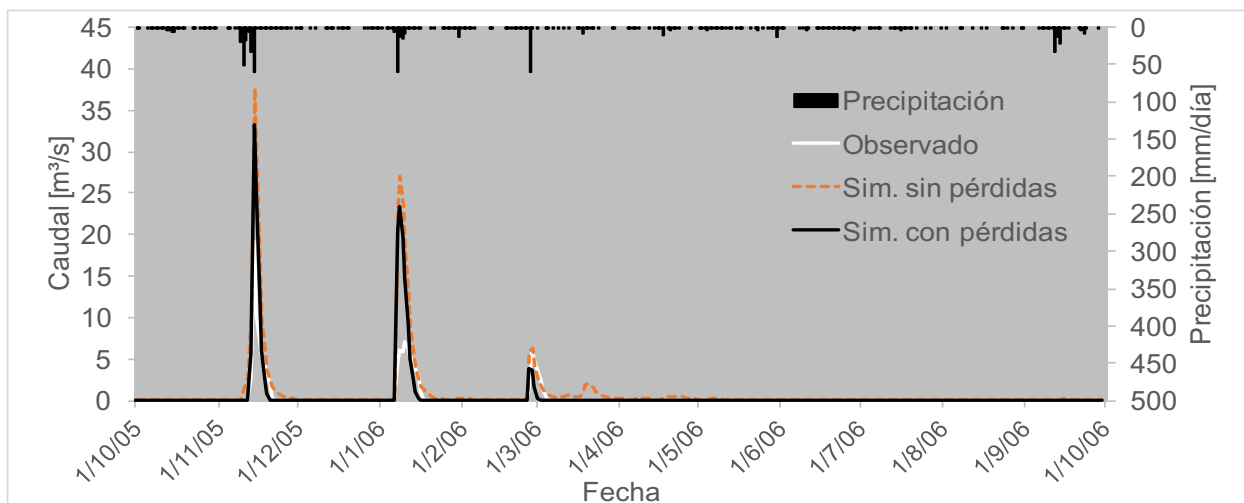


Figura 3.10. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de validación espacio-temporal (2005-2006) en la estación Vall d'Alba de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas.

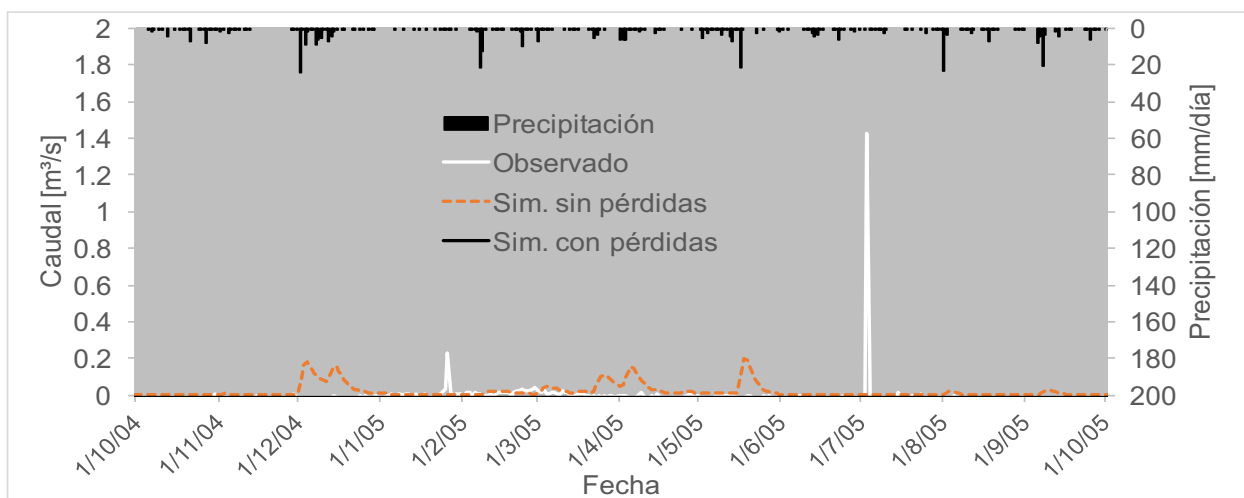


Figura 3.11. Hidrogramas observado y simulados en el periodo de validación espacio-temporal (2004-2005) en la estación Vall d'Alba de la cuenca de la Rambla de la Viuda con estimación de pérdidas.

CAPÍTULO IV. MODELIZACIÓN DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Tras obtener un mejor desempeño del submodelo hidrológico en este capítulo se busca implementar el submodelo sedimentológico, permitiendo modelizar de manera conjunta ambos procesos dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda. Como se resaltó en la metodología, esta se encuentra enfocada la utilización de información indirecta, para subsanar el déficit de información. Siendo al final, los resultados del modelo fuente de nueva información.

La modelización del ciclo de sedimentos dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda se ve dificultada debido a la falta de registros de volúmenes que circulan en ella. Sin embargo, se cuenta con información batimétrica en distintos periodos para el embalse de M^a. Cristina. Este embalse fue construido en 1920, contaba con una capacidad inicial de 28 Hm³, para junio de 1991 esta capacidad se redujo a 19.586 Hm³, y para noviembre de 2000 a 18.447 Hm³. Esta variación en la capacidad producto del sedimento acumulado sirve de referencia para modelizar y calibrar el submodelo hidrológico de TETIS, permitiéndonos obtener una aproximación a variación temporal de los procesos de producción, transporte y depósito de sedimentos dentro de la cuenca, principalmente en puntos de interés, como el mismo embalse de M^a. Cristina.

El proceso consiste en estimar el caudal de sedimentos producidos y transportados hasta el embalse de M^a. Cristina a partir del volumen de sedimentos acumulados en este ($V_{sed.acum}$) que se puede obtener restando las capacidades registradas en dos años diferentes. Sin embargo se debe considerar que $V_{sed.acum}$ no representa el total del volumen de sedimentos producidos y transportados por la cuenca ($V_{sed.trans}$), debido a que no todo el sedimento queda atrapado en el embalse, pues una parte continua su movimiento aguas abajo, además, su volumen puede variar en el tiempo, debido a la presión ejercida sobre el mismo, por el peso del sedimento acumulado más reciente y del agua contenida en el embalse.

El submodelo sedimentológico de TETIS nos brinda como datos de salida el sedimentograma del evento simulado, así como el volumen simulado de sedimentos transportados (V_{sim}), este volumen puede ser comparado con $V_{sed.trans}$, cuando los dos valores se aproximan lo suficiente, se puede considerar que el sedimentograma simulado por modelo como calibrado, y por tanto representa de manera aproximada la distribución temporal de llegada de sedimento al embalse a lo largo del intervalo de modelización. Siendo este el objetivo de la implementación del submodelo partiendo de información indirecta, al no disponer de datos observados que permitan una comparación directa del sedimentograma.

Al conocer la capacidad del embalse en tres años diferentes (1920, 1991, 2000), se pudiera obtener el volumen de sedimento acumulado en dos periodos diferentes, sirviendo uno para calibrar el modelo, y el otro para su validación. Sin embargo en un periodo (1920-1991) no se cuenta con datos meteorológicos que cubran la totalidad del mismo, impidiendo la implementación del submodelo hidrológico, y por tanto también del modelo sedimentológico, lo que obliga a únicamente calibrar el modelo en el periodo 1991-2000.

4.1. Estimación de la variación volumétrica del sedimento acumulado

La variación en el tiempo del volumen de sedimento acumulado puede ser estimada a través de la variación que se produce en su densidad aparente seca (dBD). La misma puede ser calculada: mediante la toma de muestras en campo, el uso de las llamadas pruebas gamma o mediante fórmulas empíricas (Bussi, 2014). En este caso se utiliza el tercer método mediante la aplicación de la Ec. 21. Esta estima el valor de dBD del sedimento en función de los valores de

dBD de los materiales que lo conforman (arena, limo y arcilla) y sus porcentajes. Utilizando para cada material, valores obtenidos de bibliografía (Lane y Koelzer, 1943). Su composición ha sido calculada como un promedio de los porcentajes distribuidos a lo largo de la cuenca, obtenidos de los mapas de contenido en la cuenca que son parte de la información distribuida disponible, presentada en la Tabla 2.1. Estos valores pueden observarse en la Tabla 3.1.

$$dBD_{sed} = \frac{dBD_{arena} \cdot \%arena + dBD_{limo} \cdot \%limo + dBD_{arcilla} \cdot \%arcilla}{100} \quad (21)$$

Tabla 4.1. Propiedades de los componentes del sedimento.

| | Porcentaje | Densidad [T/m ³] | Factor de consolidación [T/m ³] |
|---------|------------|------------------------------|---|
| Arena | 36 | 1.490 | 0 |
| Limo | 43 | 1.185 | 0.029 |
| Arcilla | 21 | 0.737 | 0.135 |

El valor de dBD que se obtiene al utilizar la Ec. 21 es representativo para sedimento recién formado, sin sufrir aún los efectos de reducción volumétrica en el tiempo. Para calcular los mismos se aplicó la ecuación de Miller (1953) (Ec. 22), que considera el efecto de la consolidación de los materiales a través de un factor (K_c). Cuyo valor para el sedimento se puede calcular al igual que dBD, a partir del valor de los materiales que lo conforman y su composición (Ec. 23), y sus valores para cada material también pueden ser obtenidos de la bibliografía (Lara y Pemberton, 1963), estos están incluidos en la Tabla 4.1.

$$dBD_2 = dBD_1 + 0.43 \cdot K_c \cdot \log\left(\frac{t \cdot \ln|t|}{t-1} - 1\right) \quad (22)$$

$$K_{c.sed} = \frac{K_{c.arena} \cdot \%arena + K_{c.limo} \cdot \%limo + K_{c.arcilla} \cdot \%arcilla}{100} \quad (23)$$

donde: dBD_1 y dBD_2 son la densidad aparente seca [T/m³] inicial y después del paso de t [años], respectivamente.

Aplicando la Ec. 21 con la información presentada en la Tabla 4.1 se obtuvo un primer valor de dBD_{sed} igual a 1.2007 T/m³, que representa la densidad del sedimento cuando se empieza a formar a partir del año 1920, cuando el embalse tenía una capacidad de 28 Hm³. Para junio de 1991 la capacidad disminuyó a 19.586 Hm³, habiéndose acumulado en el embalse 8.414 Hm³ de sedimento, que para ese entonces, por efectos de la consolidación tienen una densidad de 1.2099 T/m³, acorde a la Ec. 22. En noviembre de 2000 el embalse tiene una capacidad de 18.447 Hm³ habiendo el volumen de sedimento aumentado a 9.553 Hm³ con una densidad de 1,2128 T/m³. Esta información se ve resumida en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Variación de los sedimentos en el embalse de M^a. Cristina en el tiempo.

| mes | Año | Tiempo de sedimentación [años] | Capacidad del embalse [Hm ³] | Volumen de sedimento acumulado [Hm ³] | Densidad aparente seca [T/Hm ³] |
|---------|------|--------------------------------|--|---|---|
| | 1920 | 0 | 28 | 0 | 1.2007 |
| junio | 1991 | 71 | 19.586 | 8.414 | 1.2099 |
| octubre | 2000 | 80 | 18.447 | 9.553 | 1.2128 |

Se puede pensar que el volumen de sedimento acumulado entre el 2000 y 1991 es la diferencia entre los volúmenes acumulados en dichos periodos, 1.139 Hm³, sin embargo es necesario considerar que el volumen registrado en 1991 para el 2000 se ha reducido debido al cambio en

su densidad, siendo para esa fecha de 8.394 Hm^3 . Por tanto, el volumen acumulado es la diferencia entre el registrado en el 2000 y valor actualizado de 1991, 1.158 Hm^3 . Además, en los 9 años en los que este volumen se acumuló, también sufrió los efectos de la consolidación, por lo que también es necesario considerar un cambio en su densidad, pasando esta a ser de 1.204 T/Hm^3 al final de dicho periodo, por tanto el volumen de sedimento acumulado ($V_{\text{sed.acum}}$) es de 1.162 Hm^3 siendo 23000 m^3 más de lo que se estimaba en el primer valor.

4.2. Estimación del volumen de sedimentos producidos y transportados

La cantidad de sedimento atrapado y transportado aguas abajo del embalse suele representarse a través del índice de eficiencia de atrapamiento (*Trap efficiency*) que representa la proporción entre el sedimento atrapado en el fondo del embalse y la que llega hacia el mismo (Ec. 24) (Verstraeten y col., 2003).

$$TE = \frac{S_{in} - S_{out}}{S_{in}} \cdot 100 = \frac{S_{dep}}{S_{in}} \quad (24)$$

donde: TE representa el índice de eficiencia de atrapamiento en porcentaje, y S_{in} , S_{out} y S_{dep} son los volúmenes de sedimentos que entran, salen y se depositan en el embalse, respectivamente.

El valor de TE suele depender de factores como: la velocidad de sedimentación de las partículas, que está en función de sus características, textura y estructura; y el tiempo de retención de flujo en el embalse, en función de sus características y reglas de operación. Puede ser estimado mediante mediciones en las entradas y salidas del embalse o batimetrías. Sin embargo, en los embalses españoles es muy poco frecuente su medición (Bussi, 2014).

Varios métodos empíricos han sido desarrollados para la estimación de TE (Brown, 1943; Churchill, 1948; Heinemarm, 1981) generalmente relacionados a las características del embalse y el flujo, como las curvas de Brune (1953) que relaciona la capacidad de almacenamiento del embalse, y el caudal medio anual de entrada (Fig. 4.1) desarrolladas mediante el estudio de 41 embalses en Estados Unidos, con diferentes formas y dimensiones (Bussi, 2014).

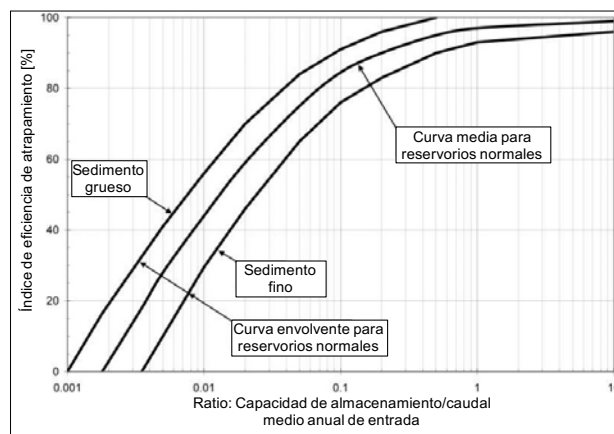


Figura 4.1. Curva de Brune para la estimación del índice de eficiencia de atrapamiento (En base a: Brune, 1953).

Las curvas de Brune suelen también representarse en forma de ecuación (Ec. 25), siendo este el método tradicional para calcular TE, sin embargo esta aproximación suele subestimar su valor en embalses pequeños debido a que por su conceptualización a menor capacidad del embalse, menor valor de TE. Para corregir este error Dendy (1974) desarrolla una nueva expresión (Ec. 26) añadiendo datos de 17 embalses pequeños a las curvas de Brune

$$TE_{Brune} = 100 \cdot \left[1 - \frac{1}{1+50 \cdot (C/I)} \right] \quad (25)$$

$$TE_{Dendy} = 100 \cdot \left[0.97^{0.19 \log(C/I)} \right] \quad (26)$$

donde: C es la capacidad del embalse [Hm^3], y I las entradas medias al embalse [$Hm^3/año$].

En el embalse de M^a. Cristina por su tamaño se considera mejor usar la expresión de Dendy para calcular TE, considerando la capacidad del embalse como el promedio entre la inicial y la final en el periodo de simulación, 19.02 Hm^3 . Mientras el caudal medio anual de entrada en el mismo periodo, fue de 22.8 $Hm^3/año$, obtenido a partir de la información hidrológica. Obteniéndose un valor de 96.5% tras aplicar la Ec. 26.

La relación presentada en la Ec. 24 se puede llevar a nivel volumétrico, permitiéndonos obtener $V_{sed.trans}$ a partir de $V_{sed.acum}$ utilizando el valor de TE calculado como se representa en la Ec. 24 y el valor de $V_{sed.acum}$ calculado en el apartado anterior. Obteniéndose un valor de $V_{sed.trans}$ de 1.204 Hm^3 , que es el valor a simularse en el submodelo sedimentológico de TETIS.

$$V_{sed.trans} = \frac{V_{sed.acum}}{TE} \quad (27)$$

El cálculo de $V_{sed.trans}$ considerando la variación en el volumen del sedimento por los efectos de consolidación y el porcentaje de material que queda atrapado se sintetiza en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Cálculo del volumen de sedimentos producidos y transportados por la cuenca de la Rambla de la Viuda.

| | Actualización de dB_{1991} de entre 1991 a 2000 utilizando la Ec. 22. | | Actualización de dB_{sed} de entre 1991 a 2000 utilizando la Ec. 22. | | Cálculo de V_{trans} a partir de $V_{sed.acum}$ utilizando la Ec. 27 | |
|---|---|-------|--|--------|--|--------|
| $Vol_{sed.acum.2000} [Hm^3]$ | 9.553 | 9.553 | | | | |
| $Vol_{sed.acum.1991} [Hm^3]$ | 8.414 | ----> | 8.394 | | | |
| $dB_{1991} \setminus dB_{sed} [T/Hm^3]$ | 1.2099 | ----> | 1.2128 | 1.2007 | ----> | 1.2040 |
| $V_{sed.acum} \setminus V_{trans} [Hm^3]$ | 1.139 | ----> | 1.158 | 1.158 | ----> | 1.162 |
| TE [%] | | | | | | 96.50 |

4.3. Implementación del submodelo sedimentológico

Para su implementación fue necesario elaborar los seis mapas con la información espacial distribuida, tres correspondientes a: los factores USLE C, K y P; y tres a la textura del suelo, porcentajes de arena, limos y arcilla. Esto se realizó delimitando los obtenidos de la Base de datos de suelos de Europa dentro del área de la cuenca y llevándolos al tamaño de pixel utilizado en los otros parámetros distribuidos, 100 [m]. Estos se muestran en las Fig. 4.2, 4.3 y 4.4.

La modelización se realizó en el periodo entre los dos informes: junio de 1991, y noviembre de 2000, al ser las fechas en las que se dan las mediciones de la capacidad del embalse. Para el

submodelo hidrológico y sus factores correctores se consideró el calibrado con la estimación de pérdidas en cauce, al ser el que mejor representa a la cuenca. Calibrando en este caso únicamente los parámetros del modelo sedimentológico (α , β_1 y β_2), ajustándolos manualmente para que V_{sim} se aproxime lo más posible a $V_{sed.trans}$. Considerando además que antes de comparar estos valores se toma en cuenta que TETIS maneja un valor de dB_{sed} de 2.659 T/m^3 para sus cálculos, por lo que el V_{sim} se lleva a un volumen equivalente con la dB_{sed} calculada con la metodología antes descrita.

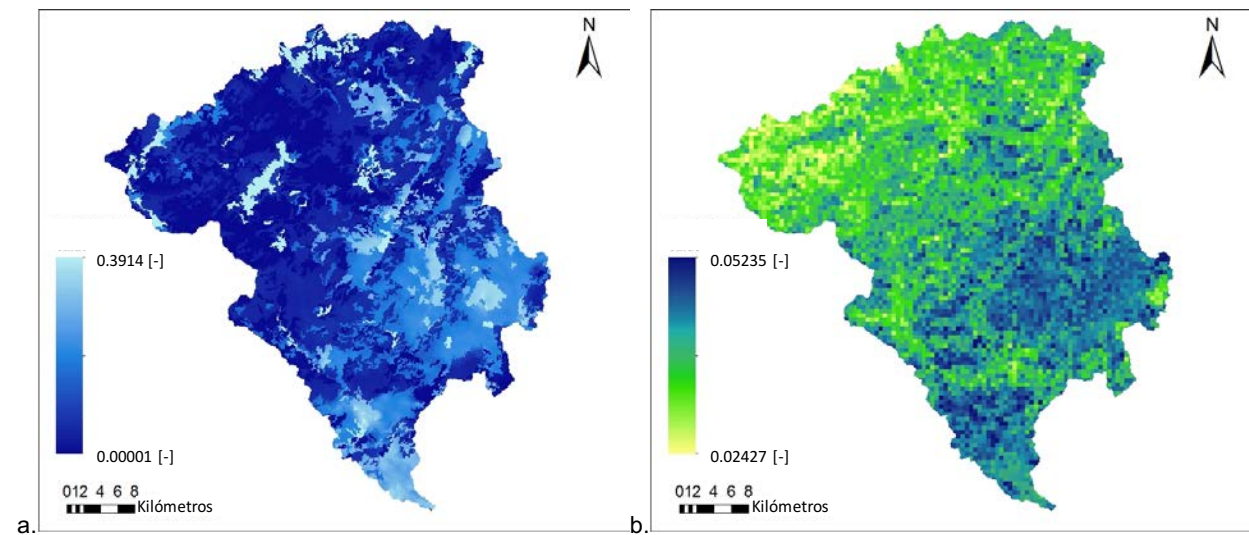


Figura 4.2. Mapas de factores USLE: C (a) y K (b) para la cuenca de la Rambla de la Viuda.

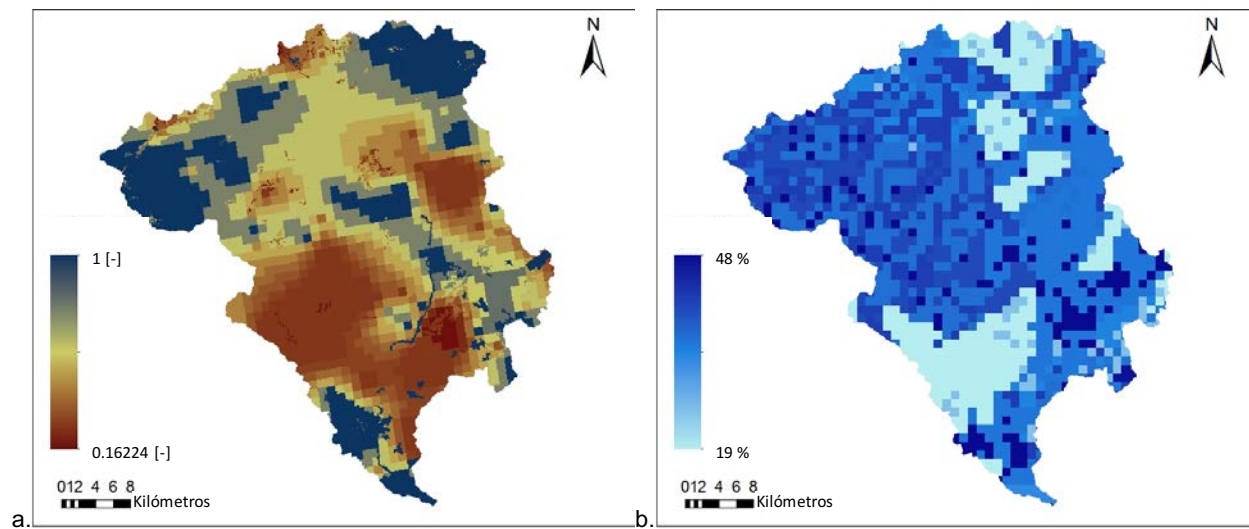


Figura 4.3. Mapas de: factor USLE P (a) y contenido de arena (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

Las condiciones iniciales del submodelo de sedimentos son importantes, por lo dicho sobre la curva de suministro y capacidad (Fig. 2.17.a). Por ello, los contenidos de arena, limo y arcilla iniciales en ladera, cárcava y cauce se estimaron a través de un periodo de calentamiento, que va desde octubre de 1990 hasta el inicio del periodo de calibración, en este periodo de calentamiento se registra un evento de precipitación, lo suficientemente representativo para producir flujo de sedimentos, permitiendo contar con sedimento depositado en cauce durante el inicio del periodo de calibración, ya que su ausencia podría afectar dicho proceso.

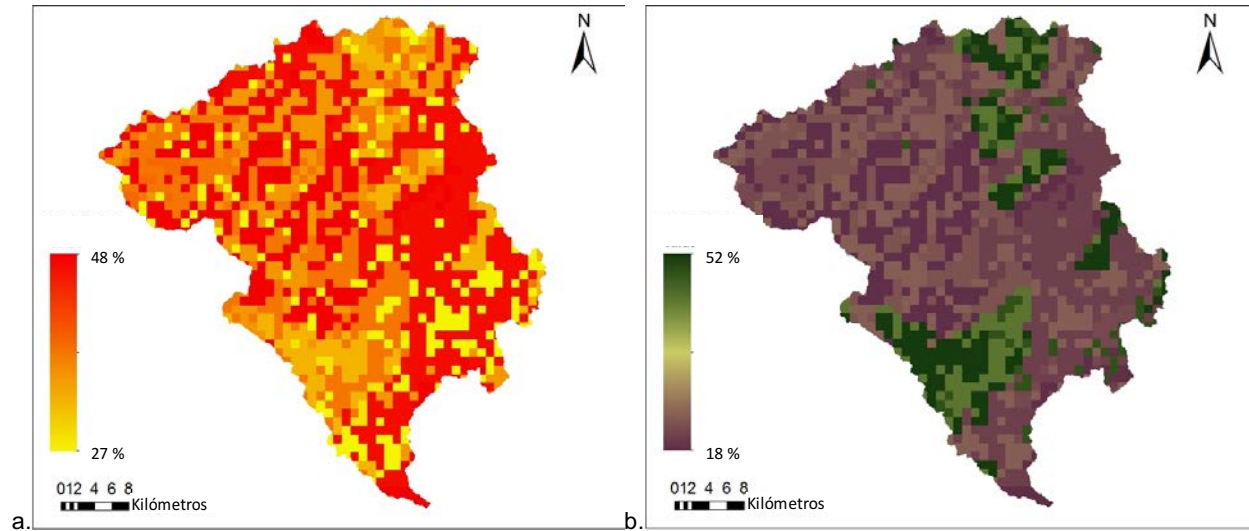


Figura 4.4. Mapas de contenido de: limo (a) y arcilla (b) de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

Tras el proceso de calibración los factores correctores obtenidos para los parámetros del submodelo sedimentológico se presentan en la Tabla 4.4. El V_{sim} obtenido fue de 1.2035 Hm^3 representando un error de 500 m^3 con respecto a $V_{sed.trans}$, que tomando en cuenta las abstracciones realizadas puede considerarse como aceptable. El sedimentograma obtenido se muestra en la Fig. 4.5 donde se aprecia que tiene una forma similar al hidrograma simulado, presentándose picos de sedimentos en los mismos periodos en los que se producen los picos de caudal, lo que es de esperarse, pues como se dijo, el movimiento de partículas depende de las condiciones de flujo.

Tabla 4.4. Factores correctores del modelo sedimentológico calibrados.

| Factores correctores | α | β_1 | β_2 |
|----------------------|----------|-----------|-----------|
| Valor [-] | 0.0085 | 0.0100 | 0.0100 |

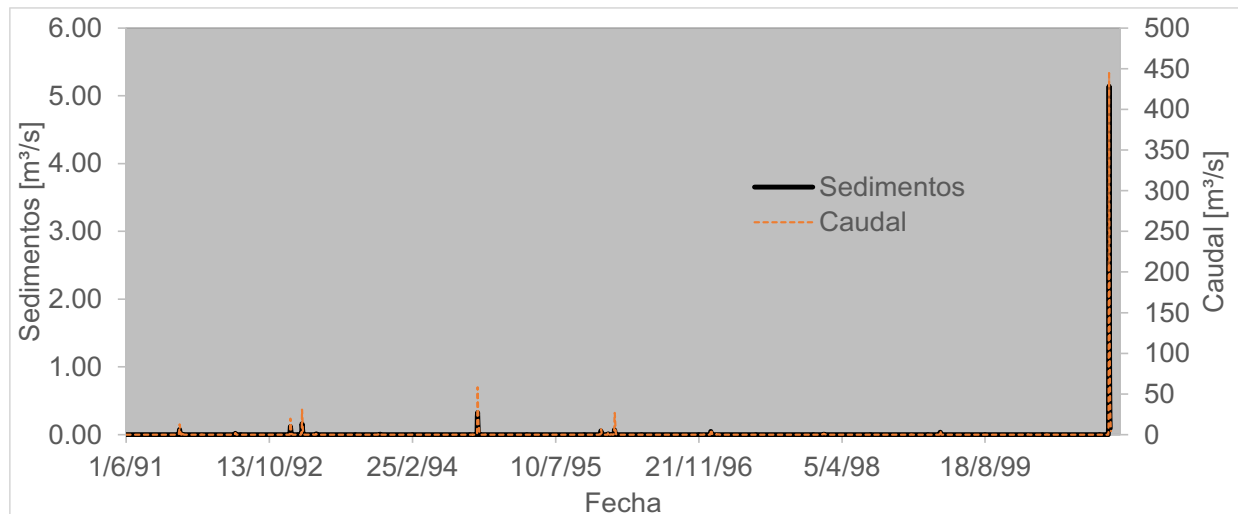


Figura 4.5. Sedimentograma e hidrograma simulados en la cuenca de la Rambla de la Viuda en el periodo junio de 1991 – octubre de 2000.

Observando el sedimentograma durante los eventos, la producción de sedimentos en estos guarda una relación aproximada de 0.005 m^3 de sedimento transportados por cada metro

cúbico de agua. Viéndose esta relación superada en el primer pico producido en cada periodo como se aprecia en la Fig. 4.6.a y Fig. 4.7.a, en este segundo caso la relación se ve reducida a la mitad en el segundo pico, el primer pico de dicha figura también presenta un valor bajo al igual que el caudal, lo que puede sugerir que el sedimento disponible en el cauce pudo ser escaso debido a las escasas precipitaciones. La relación también es superada levemente en el periodo representado en la Fig. 4.6.b que solo presenta un pico, lo que sugiere que este efecto puede deberse al efecto de las condiciones iniciales de sedimento en cauce ya que el primer evento cuenta con más material disponible.

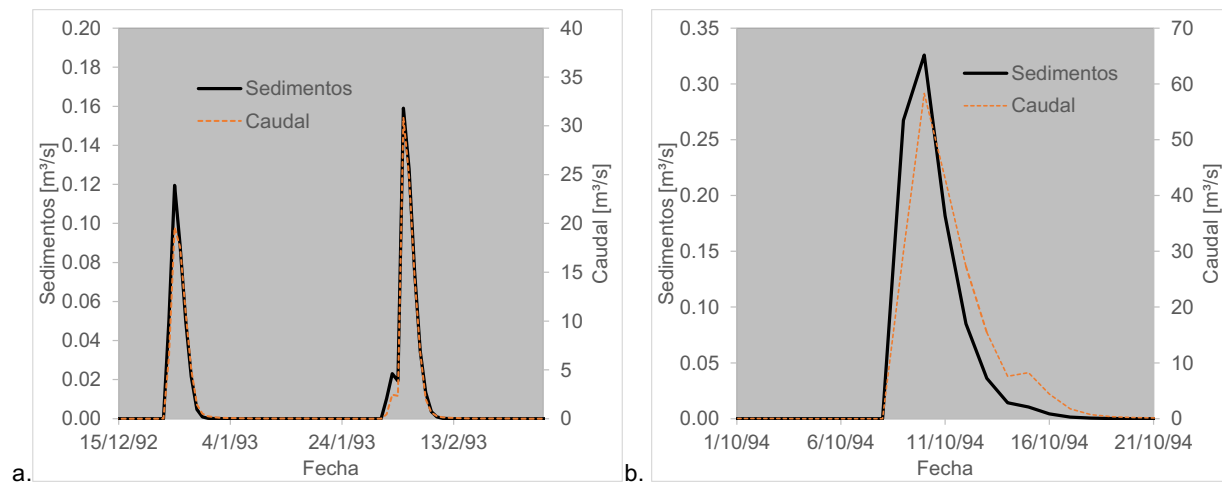


Figura 4.6. Sedimentograma e hidrograma simulados en la cuenca de la Rambla de la Viuda en los periodos: diciembre de 1992 – febrero de 1993 (a) y octubre de 1994 – noviembre de 1994 (b).

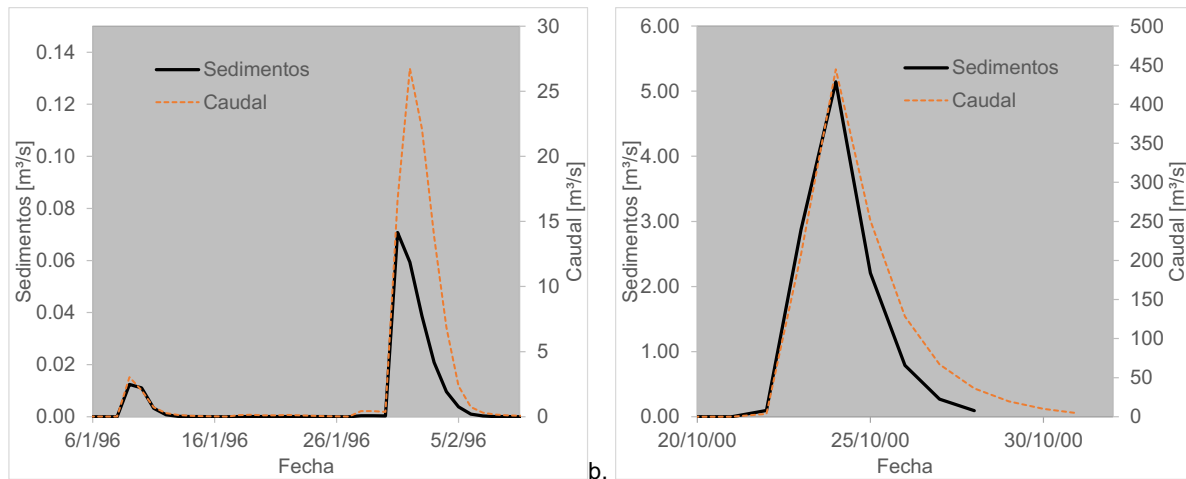


Figura 4.7. Sedimentograma e hidrograma simulados en la cuenca de la Rambla de la Viuda en los periodos: enero de 1996 – febrero de 1996 (a) y octubre de 2000 – noviembre de 2000 (b).

Sin embargo, al observar la relación entre el hidrograma y el sedimentograma del evento principal (Fig. 4.7.b) se ve que la relación supera al doble de la planteada en casos anteriores, siendo ahora de $0.012 \text{ m}^3_{\text{sed}} / \text{m}^3_{\text{agua}}$, esto puede deberse a la magnitud del evento, confirmando la influencia del ciclo de histéresis. Pudiéndose decir que, a pesar que la producción de sedimentos puede guardar una relación casi constante al caudal, en eventos extraordinarios se puede modificar en gran medida, duplicándose como en este caso, por la magnitud del evento o disminuyendo a la mitad como en el de febrero de 1996 (Fig. 4.7.a) por el material disponible.

4.4. Variación de la capacidad del embalse de M^a. Cristina

Conocido el caudal de sedimento de llegada al embalse y TE se estima el proceso de aterramiento en el mismo, simplemente restando las entradas diarias de sedimento que quedan atrapadas en el embalse de la capacidad al inicio del periodo, correspondiente a la presentada en el informe de junio 1991, obteniendo una curva de variación de capacidad a lo largo del tiempo que nos brinda información sobre la dinámica temporal del proceso.

La variación de la capacidad del embalse de M^a. Cristina se muestra en la Fig. 4.5, en esta se aprecia claramente la relación entre los eventos de precipitación y los saltos de descenso de capacidad, que varía con una pendiente casi constante desde el inicio del periodo en junio del 1991, de 19.586 Hm³, hasta mediados de octubre del 2000, antes del evento principal, a 19.35 Hm³. Variando cerca de 0.24 Hm³ lo que representa apenas la quinta parte de la pérdida total de capacidad (1.204 Hm³). Lo que pone en claro la importancia de los eventos de esta magnitud en los procesos de producción y transporte de sedimento y su efecto en las infraestructuras.

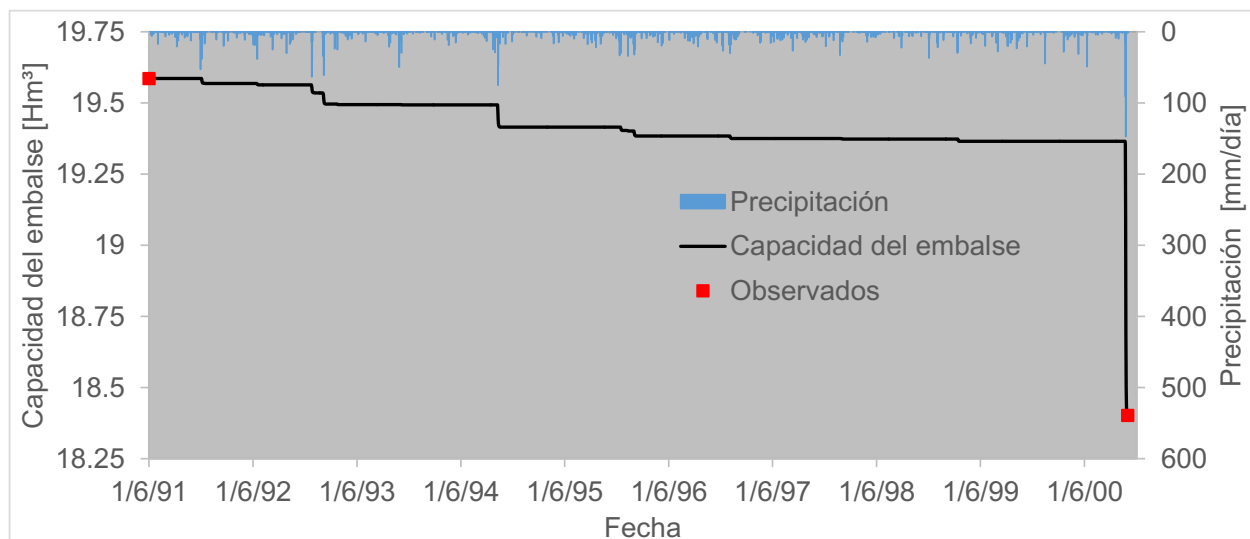


Figura 4.8. Curva simulada de disminución de capacidad del embalse de M^a. Cristina, dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

CAPÍTULO V. CAMBIO CLIMÁTICO

Una vez implementado el modelo TETIS dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda, observarse un desempeño adecuado de los submodelos hidrológico y sedimentológico, en este capítulo se utiliza dicho modelo para la estimación de los efectos del Cambio Climático en la cuenca, modelizando la información regionalizada proveniente de la AEMET para la geografía española.

Los MCG en el escenario de periodo de control (1961-2000) y la información meteorológica observada proveniente de Spain02 V.04 (1971-2008), comparten un periodo temporal común entre 1971-2000, el cual será referido a partir de ahora como Periodo de Control, pues dentro de estos 30 años se evalúa el desempeño de la información proveniente de los de los MCG regionalizados dentro del territorio español por la AEMET, listados en la Tabla 2.2.

Debido a la mala representación de los MCG para la cuenca de la Rambla de la Viuda, se ha decidido corregir la información correspondiente. Seleccionando los que mejor desempeño tienen y se seleccionando los mismos para trabajar únicamente con ellos, debido a que utilizar los que no presentan una calidad aceptable, pueden alterar los resultados y conclusiones obtenidos.

No se corrigen todos los modelos debido a que la calidad inicial de dicha información puede influir en el grado de corrección alcanzable. Además el proceso de corrección de cada modelo precisa de una cantidad de tiempo y trabajo considerables, por lo que puede llegar a ser contraproducente.

Utilizando los submodelos hidrológico y sedimentológico calibrados y validados en los capítulos anteriores, se implementó el modelo para los escenarios climáticos, utilizando la información corregida, tanto en: su periodo de control, para constatar la bondad con la que se está captando los procesos de la cuenca; como en sus escenarios RCP futuros, donde se evalúan los efectos del Cambio Climático en su hidrología, modelizando la disponibilidad futura del recurso, los efectos sobre el régimen de caudales, el ciclo de sedimentos y como pueden verse modificados procesos como el aterramiento en el embalse de M^a. Cristina.

5.1. Selección de MCG regionalizados

La selección de los MCG se realizó comparando sus valores medios mensuales con los observados, dentro del Periodo de Control, considerando principalmente la precipitación, donde los problemas son más evidente. En función de esto, los MCG seleccionados fueron los que presentan un comportamiento estacional más parecido al real, evaluando conjuntamente otras características de su distribución temporal, como la probabilidad de cada mes de que se presenten días sin precipitación así como sus curvas de probabilidad de excedencia.

La comparación se realizó usando los puntos P10 de Spain02 V.04 y 8495 de la AEMET para cada MCG, debido a su proximidad, como se puede ver en la Fig. 2.5. Sin embargo, Déqué (2007) afirma que dos puntos cercanos no necesariamente son los más correlacionados, debido a los factores que influyen el proceso de regionalización, y recomienda comparar promedios de las estaciones observadas y regionalizadas disponibles. Esto no se consideró debido a que al realizar un promedio se perdería información sobre el número de días sin precipitación.

Los resultados de la regionalización de la información de precipitación proveniente de los MCG, mediante los métodos estadísticos Análogo y SDSM aplicados por la AEMET muestran que para cada MCG, su distribución media anual es muy parecida utilizando ambos métodos. Como se ve en la Fig. 2.13.b para MRI-CGCM3. Sin embargo, el método Análogo capta un poco mejor la estacionalidad de la precipitación observada, principalmente en octubre, el mes más húmedo del año, tratando de representar mejor el pico del mismo, algo que no ocurre con el método SDSM, esto se observa también al comparar los resultados para los MCG MPI-ESM-LR (Fig. 5.1.a) y CMCC-CM (Fig. 5.1.b).

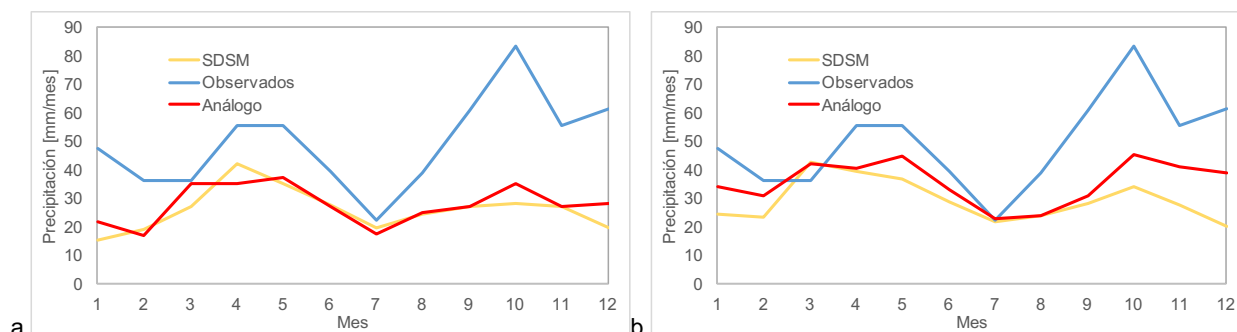


Figura 5.1. Comparación entre la precipitación media mensual observada en P10 de Spain02 V.04 y 8495 de la AEMET en el periodo de control (1971-2000) de los MCG regionalizados: MPI-ESM-LR (a) y CMCC-CM (b).

El método Análogo muestra además un número menor de días sin precipitación con respecto a las observadas, debido a que presenta un gran número de días con precipitaciones bajas, mientras la regionalización por el método SDSM presenta un mayor número de días secos. Como se puede ver en la Fig. 5.1.b para el MCG MRI-CGCM3 y en la Fig. 5.2 para los MCG MPI-ESM-LR y CMCC-CM. El primer caso resulta sencillo de corregir, pues al momento de ajustar los datos, un parámetro puede servir como umbral, reduciendo un gran número de valores a nulos. Mientras que en el segundo caso, solucionar este problema resulta más complicado, pues se trata de dar un valor de precipitación a una serie de días que no la tenían, sin referencia alguna. Este criterio complementa el de mejor estacionalidad y por ello se decidió únicamente trabajar con la información regionalizada utilizando el método análogo.

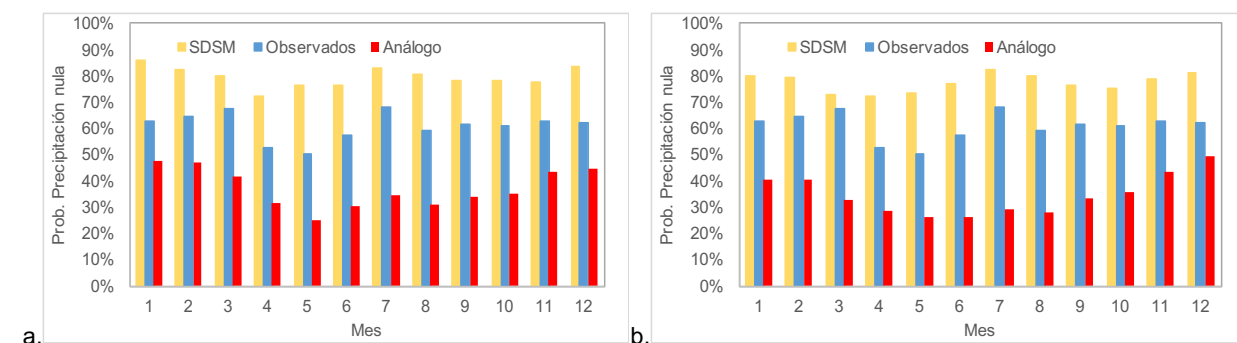


Figura 5.2. Probabilidad de precipitación nula mensual entre los valores observados en P10 de Spain02 V.04 y los regionalizados en 8495 de la AEMET en el periodo de control (1971-2000) para los MCG regionalizados: MPI-ESM-LR (a) y CMCC-CM (b).

Se seleccionaron seis de los MCG listados en la Tabla 2.2, estos fueron: MRI-CGCM3, MPI-ESM-LR, HadGEM2-CC, CMCC-CC, ACCESS1-1 y ACCESS1-3, con regionalización mediante análogos, debido a que son los que mejor captan la estacionalidad de las precipitaciones de la cuenca, presentando dos picos en el año, a pesar de que el de octubre, debería ser el mayor

en esta cuenca, como se aprecia en la distribución de sus precipitaciones medias mensuales (Fig. 5.3.a), contrario a lo ocurrido en los modelos descartados, como los mostrados en la Fig. 5.3.b donde apenas se percibe una estacionalidad marcada, y además se observan picos en meses distintos a los del periodo húmedo observado. Se debe señalar también que varios MCR como IPSL-CM5A-MR fueron descartados de manera directa debido a como se muestra en la Tabla 2.2 su información correspondiente a sus escenarios climáticos está incompleta.

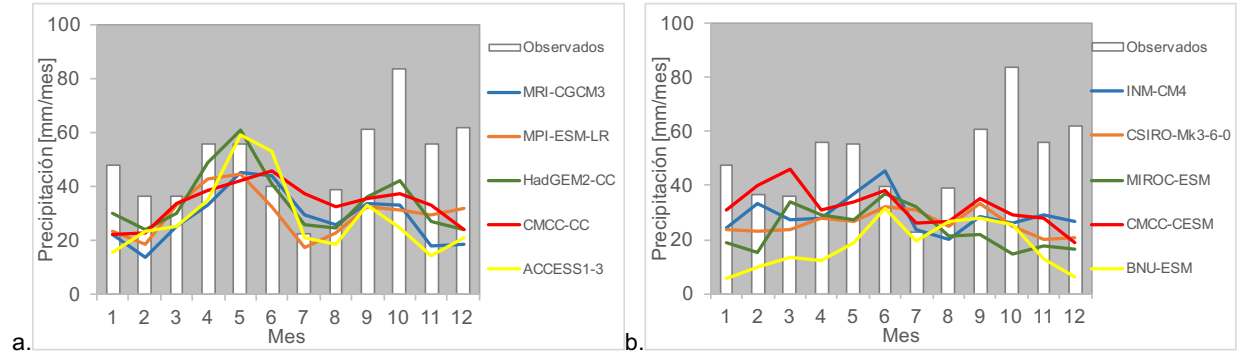


Figura 5.3. Comparación entre la precipitación media mensual observada en P10 de Spain02 V.04 y 8495 de la AEMET en el periodo de control (1971-2000) para los MCG regionalizados estadísticamente: seleccionados (a) y parte de los descartados (b).

5.2. Corrección de escenarios climáticos regionalizados

Los métodos de corrección del sesgo en la información proveniente de los MCG y sus regionalizaciones generalmente están basados en transformaciones estadísticas, donde para una variable modelizada (U_m) correspondiente a una variable observada (U_o) se busca una función (h) tal que se consiga una relación como la representada en la Ec. 28, corrigiendo a la primera variable. Conociéndose la función de distribución de probabilidades tanto para la variable observada (F_o) como para la simulada (F_m) se puede llegar a una transformación estadística a través de su probabilidad integral (Angus, 1994) como la representada en la Ec. 29 (Gudmundsson y col., 2012).

$$U_o = h(U_m) \quad (28)$$

$$U_o = F_o^{-1}(F_m(U_m)) \quad (29)$$

La relación presentada en la Ec. 29 puede modelizarse de manera directa planteando una relación cuantil-cuantil, de manera: lineal o polinomial (Ec. 30) y de otras formas como se muestra en Gudmundsson y col. (2012), obteniendo una variable corregida (\hat{U}_m). Estimando o calibrando como en el caso de la relación polinomial, los parámetros a , b , y c , buscando una mayor aproximación con respecto a U_o . La Fig. 5.4 muestra la curva de probabilidad de excedencia de precipitación para los MCG MPI-ESM-LR y HadGEM2-CC y la información observada, dentro del periodo de control (1971-2000). Apreciándose que las mismas no son parecidas, sin embargo estas representan la información de cuantiles que puede ser relacionada como en la Ec. 29 para realizar el ajuste polinomial.

$$\hat{U}_m = U_m^2 \cdot a + U_m \cdot b + c \approx U_o \quad (30)$$

Se debe considerar que esta metodología corrige el sesgo en U_m para que tenga un comportamiento (distribución de probabilidad) similar a U_o , más no busca que sean iguales, es

decir, se intenta obtener una variable \hat{U}_m en cada tiempo i , de tal manera que exista una variable U_o de magnitud similar que pudiera darse en un tiempo j diferente, pero que coinciden en un mismo cuantil k . Pues que como ya se ha dicho, las series provenientes de los MCG buscan representar el comportamiento real de variables climáticas como la precipitación o temperatura, y no modelizar las mismas a través del tiempo, como suele llegarse a pensar.

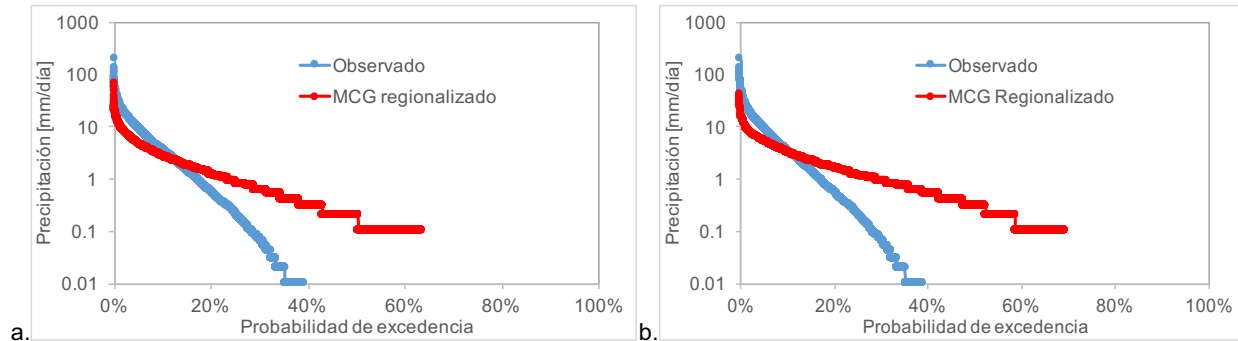


Figura 5.4. Curva de probabilidad de excedencia de precipitación de los valores observados en P10 de Spain02 V.04 y los regionalizados en 8495 de la AEMET en el periodo de control (1971-2000) para los MCG regionalizados: MPI-ESM-LR (a) y HadGEM2-CC (b).

A pesar de que no se busca que su distribución temporal coincida de manera exacta (día a día), se debe tener en cuenta las características estacionales de cada región, pues son parte de comportamiento, por ello se busca una distribución temporal consecuente con la realidad, algo que los resultados de los MCG regionalizados por la AEMET no están consiguiendo, como se ve en la Fig. 5.3.a donde se aprecia que no son captadas las precipitaciones en otoño, que representan las principales aportaciones en la cuenca de la Rambla de la Viuda y en general en las cuencas mediterráneas. En casos como este, se puede considerar aplicar la corrección de sesgo separando las variables temporales en periodos, como sus estaciones, que es lo que se ha hecho en este trabajo, ajustando la precipitación y temperatura de cada estación a través de la Ec. 30.

La corrección estacional se realizó separando las series temporales de precipitación y temperatura, en las cuatro temporadas con tres meses cada una: otoño, formado por, septiembre, octubre y noviembre; invierno, por diciembre, enero y febrero; primavera, por marzo, abril y mayo; y verano con los restantes, junio, julio y agosto. Obteniendo la relación entre U_o y U_m representada en la Ec. 29, a partir de la relación cuantil-cuantil de sus probabilidades de excedencia, como las mostradas en la Fig. 5.4, estimando los parámetros a , b y c de la Ec. 30 en cada temporada para los modelos seleccionados.

La Fig. 5.5.a muestra un diagrama cuantil-cuantil ($q-q$ plot) que representa gráficamente la relación planteada en la Ec. 30, donde se ajusta precipitación del MCG regionalizado MRI-CGCM3 en la temporada de otoño (P_{m_oto}), a los datos observados (P_{o_oto}), donde se ve representada la función ajustada con los tres parámetros. Al aplicar la función obtenida, obtenemos sus valores corregidos (\hat{P}_{m_oto}) cuyo ajuste pueden ser comparado con el observado mediante otro diagrama cuantil-cuantil, que nos indica de manera cualitativa la bondad del ajuste, donde mientras mejor ajustado esté cada punto, se encontrará más cercano a la diagonal como se muestra en la Fig. 5.5.b. Una vez corregida cada estación de manera separada se vuelven a juntar obteniendo la serie corregida (\hat{P}_m) en todo el periodo de tiempo.

Este proceso se repite considerando como U_o las series temporales de precipitación y temperatura de cada una de las 20 estaciones con información observada dentro de la cuenca

provenientes de Spain02 V04 (Fig. 2.5), con respecto a una estación representativa proveniente de la AEMET (U_m), pues como se dijo, la más cercana no necesariamente es la que mejor capta su comportamiento. Esta estación representativa puede seleccionarse analizando el comportamiento de la distribución anual media de las 11 estaciones de la AEMET. Obteniéndose al final en cada uno de los 20 puntos de SPAIN02 V04 su versión del MCG regionalizado corregido. Este proceso se repitió de manera automatizada mediante un *script* programado en Matlab© obteniendo las 20 series de precipitación, temperatura máxima y mínima para los 6 MCG seleccionados en su periodo de control, obteniéndose 360 series corregidas en total.

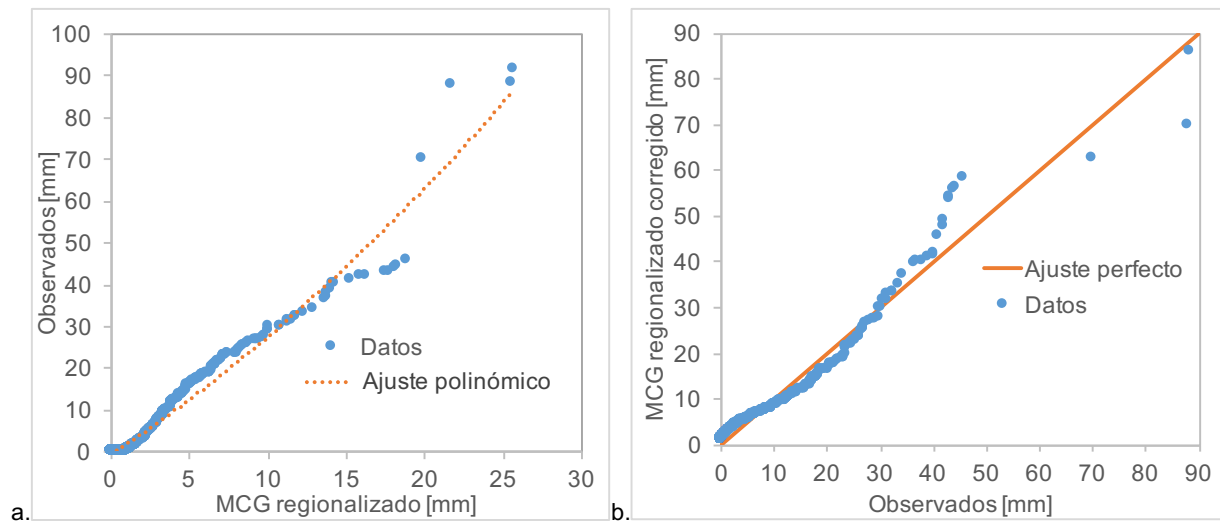


Figura 5.5. Diagrama cuantil-cuantil de precipitación en otoño en el periodo de control (1971-2000) entre: MCG regionalizado sin corrección y la información observada y su curva de ajuste polinomial (a) y; la información observada y el MCG regionalizado corregido y su curva de ajuste perfecto (b).

La Fig. 5.6.a muestra como varía la precipitación media mensual corregida a lo largo del año y su contraste con la sin corrección para el MCG MRI-CGCM3, donde a pesar de que no se logra captar totalmente la distribución anual observada, se ve una mejora notable con respecto a la que se tenía sin corregir, observándose una clara estacionalidad, con un máximo en otoño, acorde a la realidad, así mismo se ve una mejora considerable en el número de días secos, aumentando el número de días sin precipitación, asemejándose más a lo que ocurre en la cuenca, lo que se nota principalmente en el verano (Fig. 5.6.b).

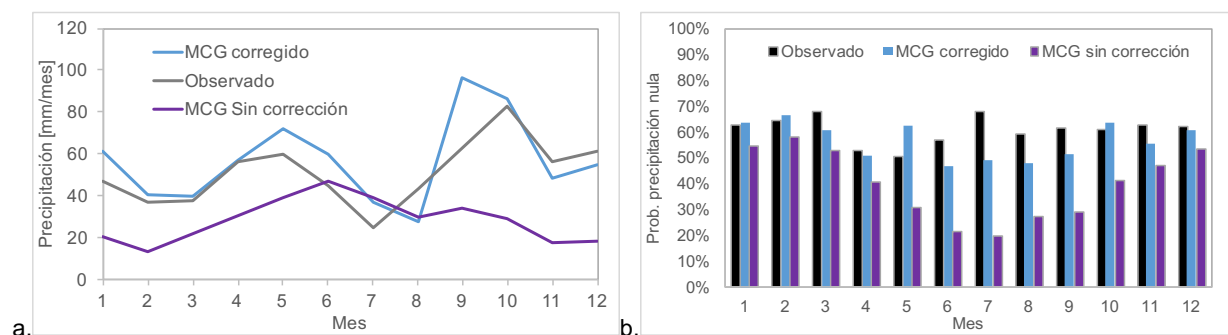


Figura 5.6. Precipitación media mensual (a) y Probabilidad media mensual de precipitación nula (b): Observada en el punto P10 de Spain02 V04 y; simulada en el punto 8477 de la AEMET del MCG regionalizado MRI-CGCM3 corregida y sin corregir.

La mejoría es también muy notable en las temperaturas máxima (Fig. 5.7.a) y mínima (Fig. 5.7.b), pasando a representar los valores observados de manera casi perfecta, salvo pequeñas diferencias en cada mes, corrigiendo el problema de magnitud que presentaba una gran subestimación en ambos casos. Los resultados de precipitación no son tan buenos como los de temperatura, debido a la distribución temporal tan irregular que suele tener la lluvia, sin embargo se puede considerar la representación de los MCG regionalizados y corregidos como aceptable y apta para la modelización del Cambio Climático.

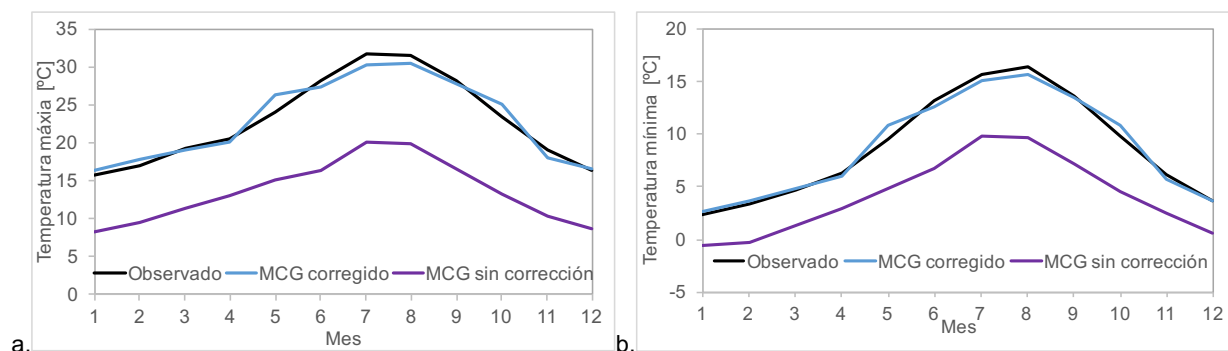


Figura 5.7. Temperatura media mensual, máxima (a) y mínima (b): Observada en el punto P10 de Spain02 V04 y; simulada en el punto 8477 de la AEMET del MCG regionalizado MRI-CGCM3 corregida y sin corregir.

Los ajuste polinomiales encontrados en el periodo de control se aplican también a los escenarios futuros respectivos, corrigiendo en estos también los errores de escala y regionalización previos, buscando una mejor representación de los efectos futuros del Cambio Climático en la cuenca. En estos se aprecia también una evidente mejoría, como en el caso del modelo MRI-CGCM3 al comparar escenarios de precipitación sin corrección (Fig. 2.12) con los corregidos (Fig 5.8) captándose ahora la tendencia mensual observada, conservando las características de los escenarios, con los efectos posibles del forzamiento radiactivo, como menos lluvias en los periodos secos y con picos más pronunciados en las temporadas húmedas. En las temperaturas máxima y en mínima el aumento proporcional de cada escenario se conserva, pero ahora con una magnitud más acorde a las temperaturas observadas.

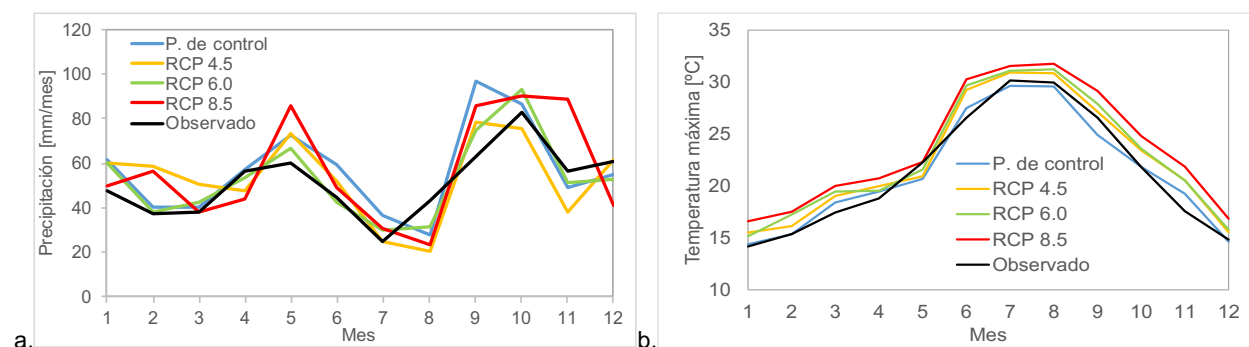


Figura 5.8. Precipitación (a) y temperatura (b) media mensual, media areal: observada y del MCG regionalizado MRI-CGCM3 corregido en los escenarios RCP.

Las series temporales de precipitación y temperaturas máximas y mínimas de los escenarios futuros fueron corregidas con un *script* complementario al que realizaba el ajuste, obteniéndose las 60 series de cada escenario. Por disponibilidad de información se decidió únicamente

trabajar con los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Teniendo para el primero información solo de tres de los MCG corregidos (MRI-CGCM3, MPI-ESM-LR y ACCESS1-1).

Debido a la conceptualización diferente de cada MCG, los escenarios RCP futuros de cada modelo pueden tener representaciones diferentes de lo que pueda pasar, y debido a que las hipótesis planteadas en cada caso son válidas, no se puede asegurar cual es más acertada, además estas aún tienen la influencia de la escala de los MCG, las abstracciones de los métodos de regionalización, y la incertidumbre introducida por el proceso de corrección.

Por ello, la metodología común de trabajo en Cambio Climático no suele centrarse en utilizar un solo MCG sino analiza los resultados de varios de manera conjunta, utilizando los resultados de estos como una franja de incertidumbre de los efectos posibles. Siendo este el procedimiento que se ha utilizado en este trabajo para analizar los cambios que se producen entre el periodo de control y los distintos escenarios RCP. Comparando la distribución media anual como se hizo en la selección de los modelos adecuados, y su periodo de retorno: en el periodo de control (1971-2000), que debe prentar un comportamiento semejante al observado; como en cada periodo futuro representado por los escenarios RCP, donde se puedan apreciar los efectos del Cambio Climático, considerando sus 30 años finales (2071-2100), pues es donde más notorios serán dichos efectos.

La Fig. 5.9 muestra de manera conjunta la distribución media anual de las precipitaciones en el periodo de control y en los escenarios de los diferentes MCG regionalizados corregidos, como se recalcó en la metodología. Apiciándose una distribución estacional representada en la franja formada por todos los modelos, tanto en el periodo de control como en los escenarios RCP. No se aprecia una gran diferencia de magnitudes en RCP 4.5, abriendo apenas un poco más la franja con respecto al periodo de control, de igual forma en el escenario RCP 8.5 que a pesar de ser parecida, presenta un comportamiento más errático.

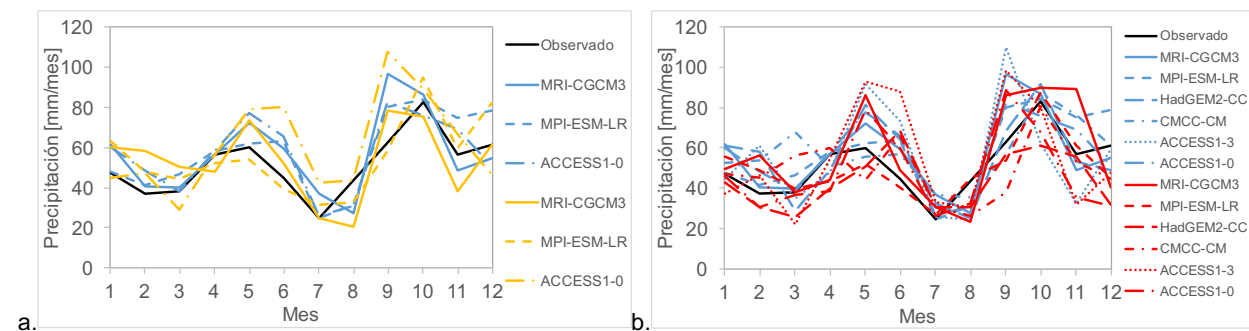


Figura 5.9. Precipitación media mensual, media areal: observadas y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control (azul), escenarios RCP 4.5 (naranja) y RCP 8.5 (rojo).

El periodo de retorno fue ajustando utilizando funciones de distribución de probabilidad acumulada, como la Exponencial, Log-Normal, Gumbel, GEV o TCEV, buscando la que mejor represente la información seleccionada, siendo esta las precipitaciones diarias máximas de cada año en cada periodo. Este proceso se realizó utilizando el software AFINS (IIAMA, 2017) que permite ajustar los parámetros de cada función automáticamente y contrastar los resultados de cada función, facilitando la selección de la más adecuada.

Analizando los periodos de retorno obtenidos tras ajustar cada uno a una función de distribución de probabilidad acumulada Log-Normal, que fue la que mejor se ajustó a los datos de precipitación de la cuenca, observados y provenientes de los MCG. Se puede apreciar en la

Fig. 5.10.a, que para el escenario RCP 4.5 su franja de retorno es parecida a la del periodo de control, observándose una disminución en la magnitud de la tormenta de retorno, más notable en el MCG MRI-CGCM3. Lo cual es acorde a la conceptualización de este escenario, donde los efectos del FR no se suponen muy superiores a los del periodo de control.

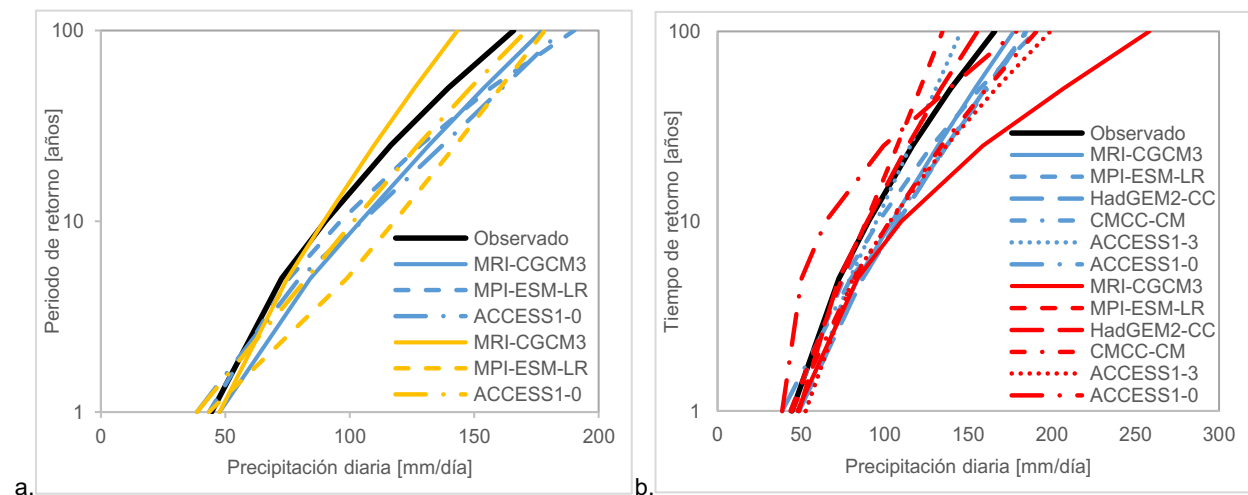


Figura 5.10. Periodo de retorno de precipitación diaria máxima anual: observada y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control (azul), escenarios RCP 4.5 (naranja) y RCP 8.5 (rojo).

Los periodos de retorno para el escenario RCP 8.5 se ven en la Fig. 5.10.b donde la incertidumbre de los posibles efectos aumenta, con respecto a la franja del periodo de control, ampliándose las posibilidades de lo que pudiera pasar, con algunos MCG presentando una mayor magnitud de precipitación de retorno mientras otros sugieren una menor, esto puede ser debido a la reducción general en la magnitud de precipitaciones, que puede aumentar el periodo de retorno en ciertos modelos, y por otro lado, el aumento en el número de eventos extremos que suelen considerar algunos MCG en su conceptualización aumenta la magnitud de la tormenta de retorno, recalcando la importancia de diferenciar la conceptualización de cada modelo y utilizar varios MCG.

Los periodos de retorno para el escenario RCP 8.5 se ven en la Fig. 5.10.b donde la incertidumbre de los posibles efectos aumenta, con respecto a la franja del periodo de control, ampliándose las posibilidades de lo que pudiera pasar, con algunos MCG presentando una mayor magnitud de precipitación de retorno mientras otros sugieren una menor, esto puede ser debido a la reducción general en la magnitud de precipitaciones, que puede aumentar el periodo de retorno en ciertos modelos, y por otro lado, el aumento en el número de eventos extremos que suelen considerar algunos MCG en su conceptualización aumenta la magnitud de la tormenta de retorno, recalcando la importancia de diferenciar la conceptualización de cada modelo y utilizar varios MCG.

De las Fig. 5.9 y 5.10 se puede concluir que los efectos del Cambio Climático en la precipitación no son tan agravantes debido a que esta no se modifica en gran medida en el escenario RCP 4.5. con respecto al periodo de control mientras que en el escenario RCP 8.5. se mantienen cercanas, pero con un aumento en la incertidumbre sobre la frecuencia de los eventos extremos.

En cuanto a las temperaturas, todos los MCG regionales corregidos en el periodo de control presentan un comportamiento similar al observado, sin embargo, en los escenarios RCP se ve

una franja que indica diferentes magnitudes de los efectos del Cambio Climático, como en la precipitación, pero en este caso, todas indicando un aumento. Las temperaturas máximas tienen un aumento que varía entre 1 y 3 °C en el escenario RCP 4.5 (Fig. 5.11.a) mientras que en RCP 8.5 este es de entre 2 y 5 °C (Fig. 5.11.b) lo que supone un aumento considerable en ambos casos. Un aumento similar se aprecia en las temperaturas mínimas, tanto en el escenario RCP 4.5 como en RCP 8.5 como se aprecia en la Fig. 5.12.

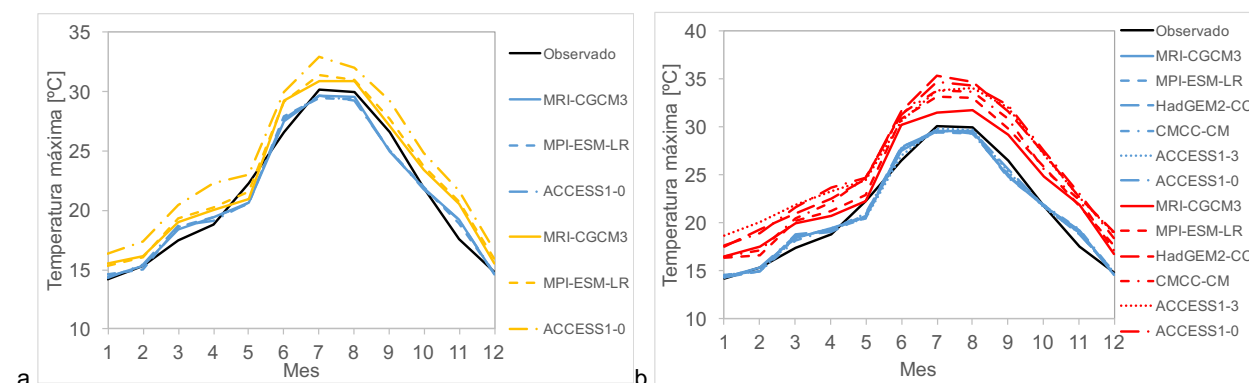


Figura 5.11. Temperatura máxima media mensual, media areal: observadas y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control (azul), escenarios RCP 4.5 (naranja) y RCP 8.5 (rojo).

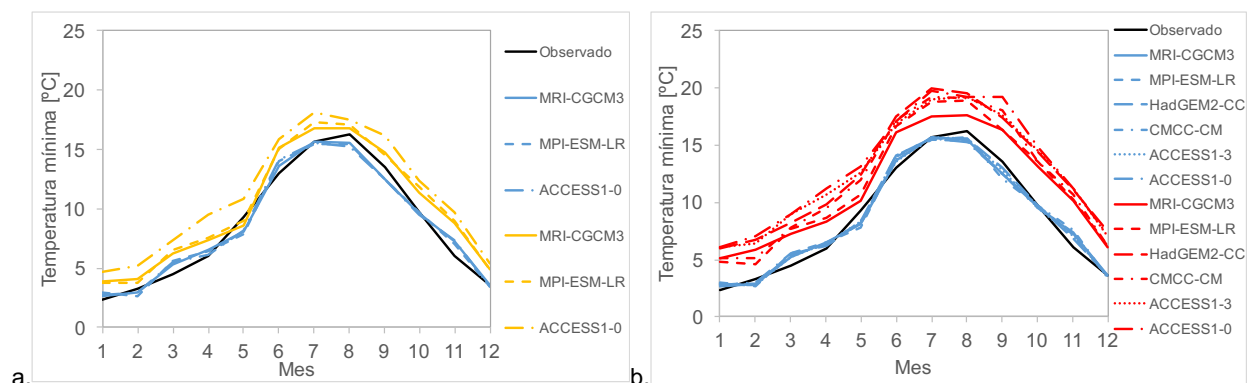


Figura 5.12. Temperatura mínima media mensual, media areal: observadas y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control (azul), escenarios RCP 4.5 (naranja) y RCP 8.5 (rojo).

5.3. Implementación del modelo TETIS utilizando los escenarios de Cambio Climático

Al igual que en la implementación con información observada, se debe estimar ciertos parámetros y variables temporales de entrada previo a la modelización, como los parámetros espaciales y la evapotranspiración de referencia (ET_0), debido a que no se cuenta con suficiente información sobre la variación temporal de los parámetros espaciales bajo el efecto del Cambio Climático, que se podría presentar en parámetros como el uso del suelo, se decidió utilizar los mismos que se han venido usando en los procesos previos.

Al contar con series de temperatura máxima y mínima, la ET_0 puede ser calculada para las 20 estaciones de la cuenca para cada MCG seleccionado, tanto en su periodo de control como en los escenarios futuros, de la misma forma en que se hizo con la información observada, utilizando la ecuación de Hargreaves (Ec. 13). Los valores obtenidos de ET_0 , nos brinda ya una

idea de los efectos de los cambios de temperatura en la cuenca, al poder contrastarlos entre Periodo de Control y Escenarios RCP.

La ET_o calculada para los diferentes MCG se muestra en la Fig. 5.13, donde se aprecia para el periodo de control, que al igual que en las temperaturas máximas y mínimas, la distribución de los valores medios anuales de ET_o de cada MCG es similar a la calculada con información observada. En el escenario RCP 4.5 la magnitud es de un orden similar en la mayoría de meses, aumentando significativamente durante los meses cálidos del verano, observándose un aumento de al menos 20 mm/mes en dicho periodo. En el escenario 8.5 el aumento es progresivo con respecto al aumento de temperatura estacional, notándose diferencias incluso en los meses fríos, siendo considerables en las temporadas templadas de primavera y otoño, y muy significativa en durante el verano, presentado un aumento de casi 30 mm/mes. Siendo señal del elevado estrés hídrico que podría representar en la cuenca el aumento de temperaturas, lo que puede afectar en gran medida la humedad del suelo.

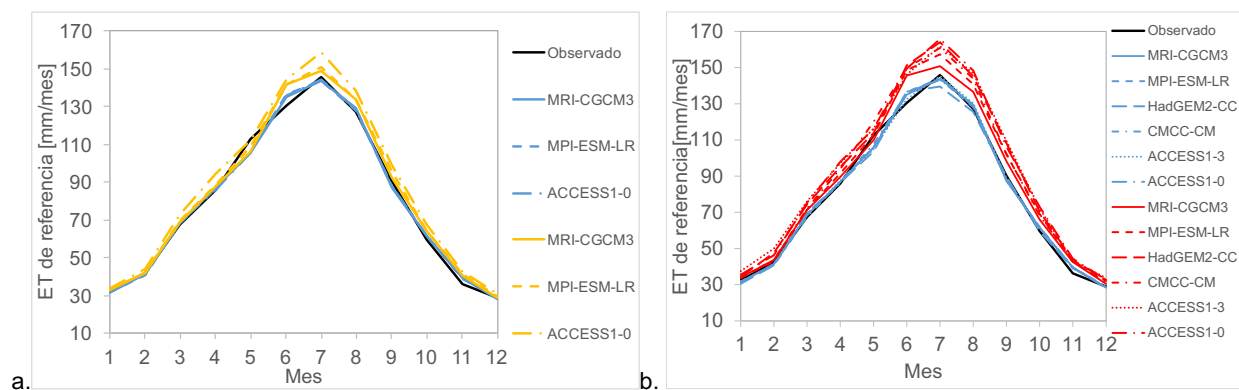


Figura 5.13. Evapotranspiración de referencia. media mensual media areal: observadas y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control (azul), escenarios RCP 4.5 (naranja) y RCP 8.5 (rojo).

Los factores correctores así como los parámetros de pérdidas en cauce utilizados para la implementación con la información de los MCG son los obtenidos previamente con la información observada, pues se considera que estos son representativos para la cuenca.

Los efectos del Cambio Climático en las variables simuladas, como los caudales, se aprecian modelizando el Periodo de Control así como los escenarios RCP de cada MCG seleccionado, contrastándolos, de la misma forma como se realizó con las variables temporales de entrada. Considerando los resultados de todos los modelos de manera conjunta como franjas, debido a que las variables temporales simuladas arrastran las mismas características de las variables de entrada, con respecto a la conceptualización de cada MCG, las técnicas de regionalización, la corrección de las mismas, y ahora incluso la influencia del modelo.

Debido a que las variables temporales de salida, de cada MCG modelizado tienen una distribución diaria diferente a la información observada, sus hidrogramas o sedimentogramas no pueden compararse de manera directa. Por ello, se evalúa la representación de la distribución de los valores medios anuales, evaluando así los efectos del Cambio Climático en cada temporada. El efecto global en la disponibilidad futura de recurso se evaluó observando las curvas de retorno de caudales, en un periodo de 100 años, de la misma forma como se hizo con las precipitaciones, esta metodología ha sido utilizada por otros autores como Bussi (2014)

Tras la implementación del modelo, los caudales mensuales simulados a lo largo del año para los diferentes MCG se pueden ver en la Fig. 5.14. El periodo de control presenta una distribución parecida a la de la información observada, pero sobrestimando los valores en el periodo más húmedo, en varios casos, sin representar la caída de recurso que se observa en noviembre, siendo en los MCG el mes más húmedo, y no octubre como en información observada, esto puede deberse a la corrección estacional, que se aplica a los meses de cada temporada por igual, sin embargo, a nivel general son resultados aceptables, considerando que sirven como franja de referencia para evaluar los efectos de los escenarios RCP.

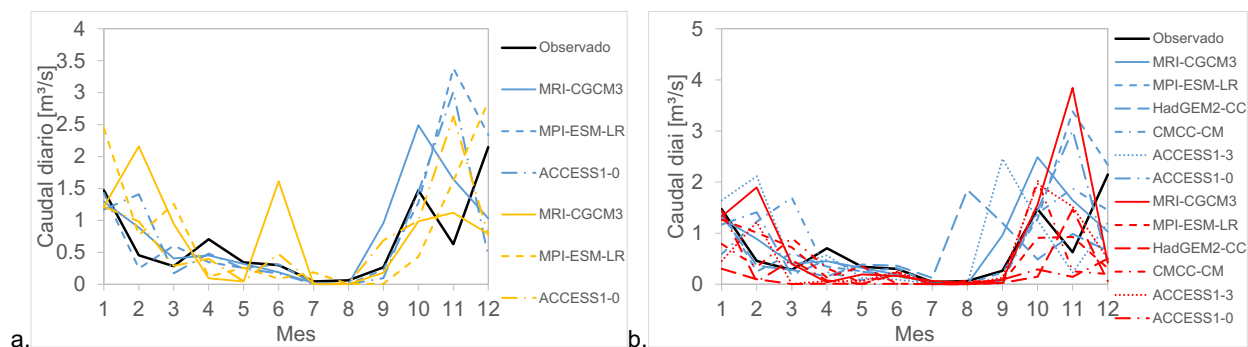


Figura 5.14. Caudal diario medio mensual en M^a. Cristina: observado y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control (azul), escenarios RCP 4.5 (naranja) y RCP 8.5 (rojo).

En el escenario RCP 4.5 (Fig. 5.14.a) la distribución muestra un comportamiento semejante al del periodo de control, presentando un pequeño aumento en el pico de primavera, y una disminución en el principal de otoño, también presentado en noviembre. En el escenario RCP 8.5 (Fig. 5.14.b) se observa un comportamiento semejante en primavera, mientras en otoño se observa una clara disminución del caudal medio diario.

En el periodo de retorno del escenario RCP 4.5 (Fig. 5.15.a) se ve un comportamiento similar al del periodo de control, sugiriendo que en este caso los efectos del Cambio Climático a pesar de ser notables, no se manifiestan en gran medida sobre los extremos. Por otro lado, en el escenario 8.5 (Fig. 5.15.b) se aprecia una clara disminución en la magnitud de los caudales de retorno, en toda su franja formada por los diferentes MCG, acorde a lo visto en su distribución mensual (Fig. 5.14.b) confirmando que el estrés de la cuenca puede aumentar considerablemente, tomando en cuenta que esta depende de los eventos de gran magnitud.

Algo que puede llamar la atención al evaluar el periodo de retorno de eventos extremos es que a pesar que los caudales simulados con la información de los MCG en su Periodo de Control tienen una distribución mensual con valores medios superiores a los observados (Fig. 5.14), la magnitud de su caudal de retorno tiende a ser inferior a la obtenida con información observada (Fig. 5.15), esto se puede deber a la forma en que los MCG están captando el comportamiento de la cuenca.

Observando los caudales máximos anuales ordenados obtenidos con el MCG MRI-CGCM3 y comparándolos con los observados (Fig. 5.16) se puede apreciar que los simulados tienen un crecimiento casi progresivo hasta llegar al máximo, mientras que los observados crecen de manera lenta hasta cierto valor, luego presentan un salto repentino a dos valores máximos, un comportamiento común en las cuencas mediterráneas de este tipo. Lo que justifica el efecto de que los valores medios de los MCG pueden verse superiores a los observados, mientras en sus valores extremos resultan inferiores. Esto recalca la importancia de concentrar la comparación

de los escenarios futuros en las magnitudes del periodo de control, usando las observadas más como una referencia de la magnitud general en la cuenca.

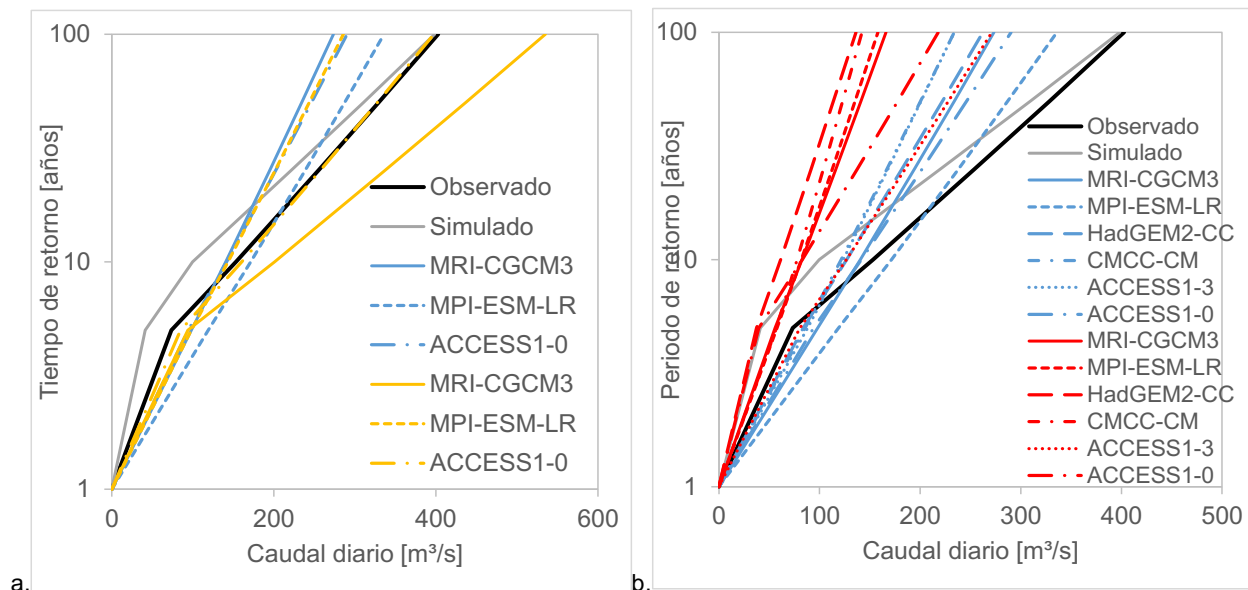


Figura 5.15. Periodo de retorno de caudal medio diario máximo anual: observado y de los MCG regionalizados corregidos en los escenarios: periodo de control (azul), escenarios RCP 4.5 (naranja) y RCP 8.5 (rojo).

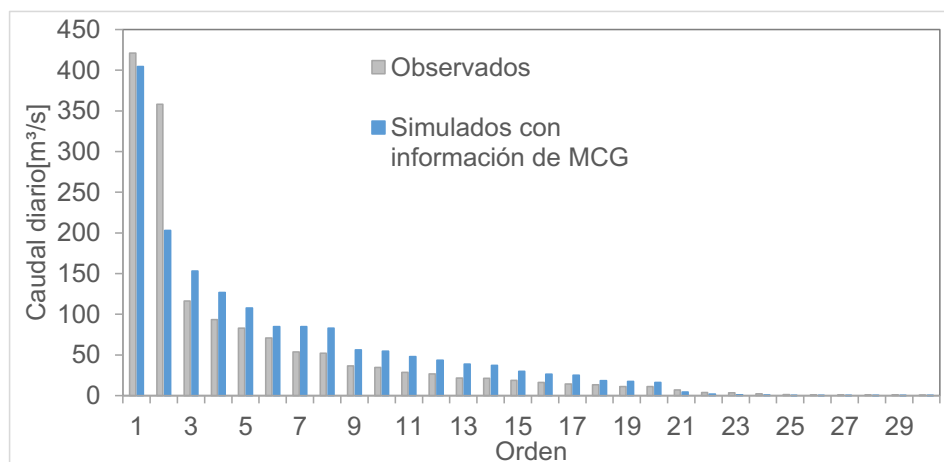


Figura 5.16. Caudales diario máximo anual ordenados: observados y simulados a partir de la información del MCG MRI-CGCM3 en la estación M^a. Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

Al comparar las curvas de retorno de precipitación (Fig. 5.10) y de caudal (Fig. 5.15), en el escenario RCP 4.5 se aprecia que no existe una gran variación de estas con respecto al periodo de control, lo que resulta lógico, pues al no disminuir las precipitaciones la rambla cuenta con las mismas entradas, sin embargo, en el escenario RCP 8.5 en donde la precipitación se ve similar al periodo de control, los caudales se ven afectados, disminuyendo su magnitud de retorno. Lo que confirma que los efectos del FR sobre la cuenca no actúan en gran medida sobre las precipitaciones, manteniendo estos aportes casi constantes, no obstante, los efectos sobre las temperaturas máximas y mínimas, que son las que rigen el proceso evapotranspiración si se ven muy modificadas, principalmente en el escenario RCP 8.5, (Fig. 5.13.b) pudiéndose atribuir al aumento de ETO a lo largo de todo el año la

disminución de la magnitud de los caudales de retorno (Fig. 5.15.b) y en los valores medios su temporada más húmeda (otoño) (Fig. 5.14.b).

Para evaluar el efecto en el ciclo de sedimentos se calculó para cada MCG su curva de disminución de capacidad del embalse, siguiendo la misma metodología explicada en el apartado 4.4. Partiendo en todos los casos de una capacidad inicial arbitraria pero representativa, que en función de la información batimétrica del embalse M^a. Cristina, se decidió de 20 Hm³. Restando el caudal de sedimentos simulado que llega al embalse en cada caso.

El efecto del Cambio Climático sobre el ciclo de sedimentos en la cuenca está relacionado a los cambios en su régimen de caudales, pues como se vio en la implementación del modelo sedimentológico, el proceso de transporte depende en gran medida de la magnitud de los eventos importantes. La Fig. 5.17 muestra como varía el proceso de aterramiento en el embalse de M^a. Cristina en el escenario RCP 4.5 y en el periodo de control, se ve que en ambos casos en un periodo de 30 años se puede esperar una disminución de la capacidad del embalse de aproximadamente 4 Hm³, acorde a los efectos en la hidrología, con un comportamiento parecido. Sin embargo, considerando la franja de incertidumbre, se puede considerar una reducción extra de hasta 1 Hm³ en este escenario.

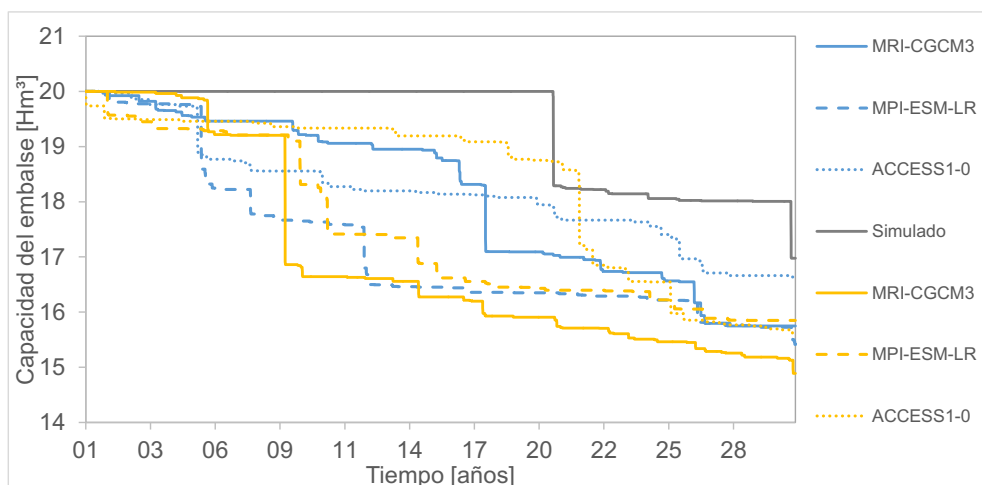


Figura 5.17. Curva de disminución de capacidad del embalse de M^a. Cristina, dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda en un periodo de 30 años. Simulada con información observada y proveniente de los MCG en el escenario RCP 4.5.

El efecto de la disminución de la frecuencia y magnitud de caudales de retornos (Fig. 5.15.b) en el escenario RCP 8.5 se ve reflejado en el proceso de aterramiento del embalse (Fig. 5.18), con una variación de casi 2 Hm³ entre los límites inferior y superior de su franja con respecto a la del periodo de control, volviendo el proceso más lento. Se puede apreciar un claro aplanamiento en la curva de disminución de capacidad, debido a la reducción de eventos extremos, que hace que el proceso se vuelva más lento en el escenario futuro. Sin embargo, como se puede ver para el caso del MCG MRI-CGCM3, un evento puede hacer que la capacidad se reduzca en gran medida, acorde a lo que se vio ya en la calibración del modelo de sedimentos (Fig. 4.8).

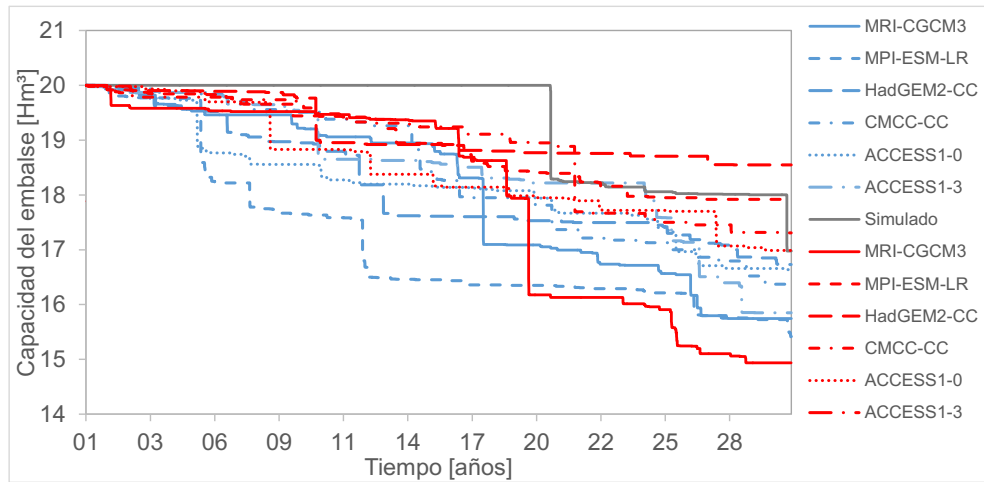


Figura 5.18. Curva de disminución de capacidad del embalse de M^a. Cristina, dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda en un periodo de 30 años. Simulada con información observada y proveniente de los MCG en el escenario RCP 8.5.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

El presente trabajo buscó implementar el modelo conceptual distribuido TETIS en la cuenca de mediterránea de la Rambla de la Viuda, desarrollando una herramienta que permita su modelización hidrológica y sedimentológica. Permitiendo evaluar las particularidades de este tipo de cuencas caracterizadas por tener un cauce efímero asociado a: su clima único, que presenta un régimen estacional de temperaturas similar al de los climas templados, y la aridez y escasas precipitaciones características de los climas secos; y a su litología marcada por un dominio calcáreo que dificulta la conexión entre río y acuífero y favorece la infiltración de agua en el cauce.

Los objetivos específicos de este trabajo fueron usar el modelo implementado para estimar las pérdidas que se producen en cauce, modelizar el transporte de sedimentos, y los efectos del Cambio Climático en la cuenca, de la revisión bibliográfica y de información disponible, metodología y los resultados de cada caso se puede concluir lo siguiente:

Sobre los materiales disponibles

El modelo TETIS permite evaluar las particularidades del ciclo hidrológico, considerando su variabilidad espacial y temporal, discretizando la cuenca a través de una malla de celdas asociadas a una serie de parámetros que permiten obtener la respuesta de la cuenca a los procesos de precipitación. Cuenta también con un submodelo sedimentológico incorporado basado en la formulación desarrollada en el modelo CASC2D-SED, que permite evaluar los procesos de erosión, transporte y depósito de sedimentos en ladera cárcavas y cauce.

El proceso partió de una implementación previa del modelo hidrológico en esta cuenca, aprovechando de ella información importante como: la caracterización y distribución de los parámetros especiales, la estimación de los parámetros geomorfológicos, y las variables temporales de entrada de: precipitación, temperatura y evapotranspiración, y de salida como caudales en varios puntos de la cuenca, utilizados para calibrar y evaluar el correcto desempeño del modelo.

Una evaluación preliminar de esta información permitió encontrar un desfase temporal entre las series de precipitación y caudal registradas. Observándose que eventos de gran magnitud la precipitación máxima se registraba un día antes que los caudales máximos, concluyéndose que esto era debido a: los diferentes intervalos de agregación utilizados comúnmente en cada caso, en precipitación de 7:00 a 7:00 mientras que en caudal de 0:00 a 0:00; al tiempo de concentración de la cuenca, que por su área es de aproximadamente 7 horas; y a las horas en las que se producen normalmente estos eventos en la cuenca, siendo generalmente entre la tarde y la madrugada, resultado obtenido de un análisis estadístico de la información. Provocando que la respuesta hidrológica de la cuenca a las precipitaciones de un día sean registradas al siguiente por su agregación a escala diaria. Esta particularidad encontrada recalca la importancia de evaluar la información disponible antes de su aplicación, pues el pasar por alto características como esta, puede ocasionar que los resultados obtenidos no sean representativos.

Sobre la estimación de pérdidas en cauce

La cuenca de la Rambla de la Viuda está formada por un suelo compuesto por un 80% de calizas y rocas fracturadas, que favorecen la desconexión entre el río y el acuífero, permitiendo

una infiltración constate de agua a través del lecho, comúnmente conocida como “efecto ducha”, produciendo en la cuenca un efecto de pérdidas de transmisión en cauce, que junto a la influencia del clima seco de la cuenca impiden la formación de un cauce permanente. Lo que concuerda con lo dicho por varios autores (Mateu, 1974; Segura, 1987; Thornes, 1976) en sus trabajos, confirmando la influencia de la litología en las cuencas mediterráneas.

Las pérdidas por transmisión son un fenómeno que se presenta en muchas cuencas alrededor del mundo, varias metodologías han sido desarrolladas para su estimación, aunque esta suele hacerse de manera global, sobre el volumen total, o en su efecto sobre el pico de descarga. Por ello este trabajo tuvo como parte de sus objetivos desarrollar una metodología que permita estimar la magnitud de estas pérdidas y su distribución espacial a lo largo de la cuenca. Utilizando para ello información espacial relacionada al proceso como los mapas de zonas kársticas dentro de la cuenca, y de relación entre flujo superficial y subterráneo en el cauce. Identificando en estos las posibles zonas donde se pueda dar el fenómeno.

La magnitud de las pérdidas se estimó considerando una relación de proporcionalidad entre las zonas con pérdidas y la magnitud de las mismas, estimando un parámetro que representa la velocidad de infiltración del agua en el cauce. Lo que tiene un sentido hidráulico pues siempre caudal que circula por una sección está relacionado con el área de la misma por la velocidad de circulación. Distinguiendo tres zonas con valores diferentes de velocidad de infiltración, en función del posible origen de las pérdidas, que son: cuando el cauce se encuentra dentro de zonas kársticas, tramos donde se identifica que existe conexión indirecta por efecto ducha, y la combinación de los anteriores.

Las pérdidas son representadas de manera distribuida a lo largo de la cuenca gracias a que TETIS es un modelo distribuido, que permite introducir las mismas en un punto representativo de cada tramo afectado. El valor de la velocidad de las pérdidas en las tres zonas, es estimada mediante una calibración manual conjunta a los factores correctores del modelo. Utilizando como criterio de evaluación el hidrograma simulado y el índice de eficiencia EF_2 .

La introducción de las pérdidas en el modelo representó una mejoría evidente en sus resultados, comparando los mismos con los de la versión previa que no consideraba estas. En los hidrogramas simulados de la estimación previa se observaban flujos en periodos donde no eran registrados en los datos observados y los mismos sobrestimaban la magnitud de los picos. Dichos errores son corregidos en esta nueva versión, reflejando un mejor desempeño en su evaluación cuantitativa al comparar los valores de EF_2 tanto en el periodo de calibración, como en los de validación.

Los resultados indican que las pérdidas alcanzan una magnitud de $8 \text{ m}^3/\text{s}$, repartidas a lo largo de casi 6.5 Km^2 de área dentro del cauce. Lo que confirma su influencia y la de la litología dentro de las cuencas mediterráneas, lo que resalta aún más al comparar su magnitud con el caudal medio diario de la cuenca, que no supera los $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, ayudando a explicar porque gran parte del año su cauce permanece seco.

Se confirma también la importancia de utilizar modelos que permiten representar la variabilidad espacial del ciclo hidrológico, como TETIS, pues si bien fenómenos como las pérdidas por transmisión pueden afectar su representación, información adicional permite corregir los problemas presentados, siendo esta otra ventaja sobre los modelos agregados.

Los buenos resultados alcanzados tras aplicar la metodología desarrollada para alcanzar este objetivo sugieren que esta puede considerarse satisfactoria, por lo que podría ser aplicada en cuencas de características similares.

Sobre la modelización del transporte de sedimentos

La modelización del ciclo sedimentológico suele presentar mayores dificultades que la modelización hidrológica, pues en la mayoría de las cuencas no se suele contar con información al respecto, siendo este el caso de la cuenca de la Rambla de la Viuda, donde no se cuenta con un registro temporal de los volúmenes de sedimentos circundantes en ella. Inconveniente que suele solventarse mediante el uso de mediciones indirectas (*Proxy data*), como los volúmenes de sedimento acumulados en los embalses, por efecto de la reducción de velocidad del agua en la entrada a los mismos.

Los volúmenes de sedimento acumulado se obtienen al comparar mediciones de la capacidad del embalse en diferentes periodos, donde la pérdida de capacidad de almacenamiento volumétrico representa el sedimento acumulado. Este fue el procedimiento seguido para estimar el volumen de sedimento acumulado en el embalse de M^a. Cristina dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda, al tener del embalse información de su capacidad inicial en tres tiempos diferentes, durante su inauguración en 1920, en 1991 y en el 2000.

El volumen de sedimento acumulado en el embalse varía con el tiempo por el efecto de consolidación que sufre el mismo, debido a la carga ejercida sobre él por el peso del sedimento depositado después, así como la presión del agua sobre él. Esta variación puede estimarse a través del cambio en su densidad aparente seca, mediante el uso de una constante de consolidación. Esta información adicional puede ser calculada a través de ensayos de laboratorio sobre muestras de campo. Pero en casos como este, donde no se dispone de las mismas, pueden ser estimados mediante métodos empíricos que considera la información sobre los componentes del sedimento que puede encontrarse en bibliografía.

No todo el sedimento producido aguas arriba en la cuenca queda atrapado en el embalse, parte continúa su transporte aguas abajo. La relación entre el volumen atrapado y el que llega al embalse suele representarse a través del índice de eficiencia de atrapamiento (*Trap efficiency*) que depende de la velocidad de sedimentación de las partículas, que está en función de sus características, textura y estructura; y el tiempo de retención de flujo en el embalse. Suele estimarse mediante balances entre mediciones de entrada y salida, que suele ser otro de los datos poco frecuentes. Por ello varios autores han desarrollado métodos empíricos para su estimación en función de datos de diferentes embalses. Siendo las curvas de Brune (1953) uno de los más utilizado, determinando el atrapamiento a partir de información de los caudales de entrada y la capacidad del embalse. Este método ha sido ajustado por otros autores agregando más información para obtener una mejor aproximación en embalses con otras características, como la expresión de Dendy (1974), que mejora la estimación en embalses pequeños, por lo que fue utilizada en este trabajo para obtener el valor del índice de eficiencia de atrapamiento en el embalse de M^a. Cristina.

El submodelo sedimentológico de TETIS permite modelizar el volumen de sedimento transportado hasta el embalse de M^a. Cristina, calibrando sus parámetros hasta que su valor se aproxime lo suficiente al volumen transportado calculado con la información indirecta. Obteniendo un sedimentograma simulado en la entrada al embalse, brindando una idea de la distribución temporal del proceso de transporte en la cuenca. Lo que al mismo tiempo permite ver la variación a lo largo del tiempo de la capacidad del embalse y su relación con los eventos

de precipitación. El modelo solo pudo ser calibrado en el periodo entre 1991 y 2000, pues no se contaba con información hidrométrica suficiente para su implementación antes de 1971, impidiendo validar los resultados obtenidos con el mismo.

Observando el sedimentograma obtenido se aprecia que el mismo guarda una relación directa con el hidrograma, presentándose picos de sedimento transportado al mismo tiempo en que se dan los picos de caudal. Guardando en los eventos de magnitud normal una relación aproximada de 0.005 metros cúbicos de sedimento transportado por cada metro cúbico de agua. Esta relación puede variar en función del material disponible, que generalmente es el producido y transportado previamente en ladera por eventos de pequeña magnitud, depositándose en cauce. Por ello en ciertos eventos, la relación se ve reducida a menos de la mitad, mientras en otros como el evento principal del periodo, de una magnitud 10 veces superior a los otros, la relación supera al doble de la antes propuesta, siendo de $0.012 \frac{\text{m}^3_{\text{sed}}}{\text{m}^3_{\text{agua}}}$.

La variación en el tiempo de la capacidad del embalse guarda una relación directa con los eventos de precipitación, observándose saltos de reducción en la curva de capacidad cuando se producen eventos de magnitud considerable. A lo largo del periodo se puede apreciar un descenso con una pendiente constante de $0.026 \text{ Hm}^3/\text{año}$, hasta inicios de noviembre de 2000, antes del evento principal, reduciéndose hasta entonces su capacidad solo 0.24 Hm^3 , tras este se ve reducida casi seis veces más, perdiendo 1.204 Hm^3 , siendo un salto imponente que incrementa la pendiente de descenso de una manera considerable. Confirmando la influencia de eventos de esta magnitud en el ciclo sedimentológico de este tipo de cuencas.

Sobre la estimación de los posibles efectos del Cambio Climático

Se conoce como Cambio Climático al resultado del desequilibrio en el balance energético de la Tierra causado por procesos y agentes naturales y/o antropogénicos. Se asume que la segunda es la causa dominante de más de la mitad de los cambios observados en la temperatura media global en el periodo 1950-2010. La estimación de sus efectos en los recursos hídricos es un tema que ha cobrado interés en los últimos años, principalmente en zonas con climas particulares como el mediterráneo, que además actualmente ya presentan un elevado estrés hídrico.

En España, la AEMET lleva la responsabilidad sobre el tema, y pone a disposición pública escenarios climáticos regionalizados para la geografía española, acorde a la información proveniente de varios Modelos de Circulación Global que trabajan con información proveniente del más reciente Informe de Evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático, representando los efectos del forzamiento radiactivo a través de diferentes Sendas Representativas de Concentración, que plantean escenarios futuros de: mitigación (RCP 2.5), estabilización (RCP 4.5 y 6.0) y aumento (RCP 8.5), junto a un escenario que representa el pasado reciente, en un llamado Periodo de Control, que permite evaluar su desempeño.

Los Modelos de Circulación Global son capaces de proporcionar simulaciones realistas únicamente a escala global, dividiendo la tierra en mallas de entre 300 a 500 km^2 siendo este su principal inconveniente, pues no capta fenómenos locales, limitando sus resultados a valores medios en áreas extensas, con una alta incertidumbre. Este problema intenta ser solucionado mediante la aplicación de los llamados métodos de regionalización o *downscaling*, que aumentan la resolución disponible mediante técnicas estadísticas y dinámicas, en función de las condiciones locales.

La regionalización de las simulaciones mejora su calidad, sin embargo, muchas veces, errores asociados a las particularidades climáticas de cada cuenca no logran ser solucionados. Como se observa en la información del Periodo de Control proveniente de la AEMET dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda, en donde la mayoría de la información proveniente de los diferentes modelos de circulación global utilizados no capta la estacionalidad de las precipitaciones de la cuenca, subestimando los valores medios mensuales, principalmente en los periodos más húmedos en primavera y en otoño, siendo este segundo el de mayor magnitud, no siendo captado en la mayoría de los casos. En temperatura, su estacional más simple es captada, sin embargo los valores medios mensuales de temperaturas máximas y mínimas son subestimados entre 5 y 10 °C.

Estos errores, conocidos en el contexto de Cambio Climático como sesgo, se suelen tratar de corregir mediante el uso de transformaciones estadísticas que relacionan la función de distribución de probabilidades de la información observada y simulada en el periodo de control, a través de su probabilidad integral, mediante una relación cuantil-cuantil. Siendo esto lo usado para corregir la información disponible en la cuenca, obteniendo un ajuste polinomial que corrige el sesgo en las variables simuladas, que considerando los problemas de estacionalidad, se aplicó de manera separa en cada temporada, en los modelos con mejor desempeño seleccionados previamente, siendo estos MRI-CGCM3, MPIESM-LR, HadGEM2-CC, CMCC-CC, ACCESS1-1 y ACCESS1-3.

La información corregida de los seis modelos seleccionados representa mejor el clima de la cuenca, principalmente la estacionalidad de las precipitaciones, y sus valores medios mensuales, sin embargo la información proveniente de estos aún presenta diferencias con la información observada e incluso entre ellos, esto se debe principalmente a la conceptualización de cada modelo, y la forma en la que capta la dinámica de la cuenca durante la regionalización y corrección. Todo esto aumenta la incertidumbre del proceso, por ello es recomendable trabajar con más de un modelo, utilizando la información de todos los modelos seleccionados como una franja de referencia.

Esta franja de referencia es utilizada para contrastar el periodo de control que representa la situación actual con los escenarios futuros, corregidos mediante la misma relación polinomial. Permitiendo identificar las posibles variaciones en precipitación y temperatura y su efecto en las variables calculadas como la evapotranspiración potencia y en las simuladas como los caudales de agua y sedimento y la capacidad del embalse. Por disponibilidad de información este trabajo consideró los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 que permitieron identifica los efectos futuros siguiendo niveles de emisión como los actuales y agravados.

En cuanto a precipitaciones, los escenarios RCP 4.5 y 8.5 no muestran mucha diferencia con respecto al periodo de control, presentando una distribución de valores medios mensuales similar, a pesar de que varios modelos presentan un comportamiento algo diferente al observado. Conservando también magnitudes y un periodo de retorno similar, a pesar de verse una mayor dispersión de la magnitud máxima del caudal de retorno.

Las temperaturas máximas y mínimas, que tras la corrección representan bien a las observadas, muestran un aumento proporcional a lo largo del año, que sugiere un incremento de entre 1 y 3 °C en el escenario RCP 4.5 y de entre 2 y 5 °C en RCP 8.5. Lo que se refleja en un aumento de la evapotranspiración de referencia, que en el primer caso se muestra un aumento mínimo a lo largo del año, salvo en los meses más cálidos del verano, llegando a ser de hasta de casi 20 mm/mes más que en el periodo de control. En RCP 8.5 se aprecia un

incremento a lo largo de todo el año, de aproximadamente 5 mm/mes en los meses de invierno, pero que se incrementa junto al aumento de temperatura, siendo casi de 10 mm/mes en primavera y otoño y de casi 30 mm/mes en verano.

Tras la modelización, la distribución mensual de los valores medios de caudal, en el periodo de control se ven similares a los observados en la mayoría de los meses, sobrestimando los caudales máximos en la temporada húmeda, pero sin embargo mostrándose inferior en magnitud con respecto a su caudal de retorno en un periodo de cien años. Esta diferencia se debe principalmente a lo antes dicho sobre la conceptualización y tamaño de malla utilizada por los modelos de circulación global, sin captar procesos específicos, por ello estos representan la frecuencia de eventos máximos con un incremento uniforme a lo largo del tiempo, mientras en las cuencas mediterráneas, suele presentarse mediante la aparición de picos de gran magnitud tras periodos secos largos.

Al comparar los caudales obtenidos en el escenario RCP 4.5 con los del periodo de control, se aprecia un comportamiento similar, con una reducción en la magnitud de los caudales valores medios del periodo húmedo, de igual forma, su curva de retorno no presenta grandes cambios, más allá de un aumento de la incertidumbre de lo que pudiera pasar. El escenario RCP 8.5 muestra una reducción considerable en la magnitud de los valores medios en otoño, el periodo más húmedo, lo que se ve reflejado también en la magnitud esperada en su periodo de retorno, mostrando una reducción considerable con respecto a los esperados en el periodo de control.

Debido a que el efecto del Cambio Climático en las precipitaciones del escenario RCP 8.5 no es muy grande, se puede atribuir la reducción en la magnitud de los caudales en el periodo húmedo del escenario RCP 8.5 al aumento de las temperaturas en este escenario, que incrementa considerablemente la evapotranspiración de referencia en la cuenca, aumentando el estrés hídrico sobre la misma, confirmando los efectos del forzamiento radioactivo en este tipo de cuencas.

El efecto manifestado en el ciclo de sedimentos sugiere que, en un periodo similar de tiempo de 30 años, el proceso de aterramiento en el embalse de M^a. Cristina tendrá la misma magnitud en el escenario RCP 4.5 que en el Periodo de Control, esperándose una reducción de capacidad similar de aproximadamente 4 Hm³. Mientras en el escenario RCP 8.5 la reducción en la frecuencia de valores extremos ralentiza el proceso, reduciendo a la mitad la pérdida de capacidad en el periodo, resultados acordes a los cambios previstos en la hidrología de la cuenca.

Finalmente se puede concluir que se alcanzó el objetivo general propuesto al principio de este trabajo, implementando adecuadamente un modelo que permite representar la hidrología de la cuenca y su ciclo sedimentológico mediante la utilización de información directa e indirecta, permitiéndonos estimar la magnitud de pérdidas que se producen en las cuencas mediterráneas debido a su litología particular, y la distribución temporal del transporte de sedimentos y el proceso de aterramiento que se puede producir en sus embalses. Permitiendo estimar los efectos que el Cambio Climático podría tener estos procesos.

Como conclusión adicional, se recalca la importancia del tratamiento de toda información de entrada previa a la realización de un trabajo similar, debido a los errores de diferente origen que se pueden encontrar la misma, considerando correcciones previas adecuadas. Ya que el desempeño del modelo y la calidad de sus resultados dependen plenamente de ello, pasar por alto esto puede llevar a la obtención de conclusiones erróneas.

CAPÍTULO VII. REFERENCIAS

AEMET, Agencia Estatal de Meteorología de España (2017). Proyecciones climáticas para el siglo XXI. Consultado el 30/01/2017. http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat

AEMET, Agencia Estatal de Meteorología de España, & IMP, Instituto de Meteorología de Portugal (2011). Atlas climático ibérico. Ministerio de Medio Ambiente Y Rural Y Marino. Madrid, España.

Ahmed, K.F., Wang, G., Silander, J., Wilson, A.M., Allen, J.M., Horton, R., & Anyah, R. (2013). Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the US northeast. *Global and Planetary Change* 100, 320–332.

Allen, R.G. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Roma, Italia.

Angus, J.E. (1994). The probability integral transform and related results. *SIAM Review* 36, 652–654.

Aranda, D. F. C. (1984). Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma San Luis de Potosí. Potosí, México.

Brown, C.B. (1943). Discussion of sedimentation in reservoirs by J. Witzig. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, pp. 1493–1500.

Brune, G.M. (1953). Trap efficiency of reservoirs. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 34, 407–418.

Bussi, G. (2014). Implementation of a distributed sediment model in different data availability scenarios. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València. Valencia, España.

Bussi, G., Francés, F., Montoya, J.J., & Julien, P.Y. (2014). Distributed sediment yield modelling: Importance of initial sediment conditions. *Environmental Modelling & Software* 58, 58–70.

Castany, G. (1971). Tratado práctico de las aguas subterráneas. Omega. Barcelona, España.

CEDEX, Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas. (2001). Estudio de Capacidad útil de embalses, Embalse de María Cristina, Castellón. Madrid, España.

CEDEX, Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas. (2017). Anuario de Aforos. Consultado el 08/03/17. <http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>

Churchill, M.A. (1948). Discussion of “Analysis and use of reservoir sedimentation data.” En: *Proceedings of the Federal Interagency Sedimentation Conference*. Bureau of Reclamation, US Department of the Interior, Washington DC. 139–140.

Cobo, R. (2008). Los sedimentos de los embalses españoles. *Ingeniería del agua* 15, 231–241.

Crespo, C. (2004). Mecánica de suelos y cimentaciones. Editorial Limusa. México, México.

Dávila, M.V. (2012). Modelación distribuida con “TETIS” dentro del marco del proyecto comparación de modelos distribuidos del NWS de EEUU aplicado en la “Región de Oklahoma”. Tesis de máster. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

De Castro, M., Martín-Vide, J., & Alonso, S. (2005). El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI. En: Evaluación Preliminar de Los Impactos En España Por Efecto Del Cambio Climático, España. 1–64.

Dendy, F.E. (1974). Sediment trap efficiency of small reservoirs. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 17, 899–901.

Déqué, M. (2007). Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. Global and Planetary Change 57, 16–26.

Duan, Q., Gupta, V.K., & Sorooshian, S. (1993). A shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. J. Optimiz. Theory Applic 76, 501–521.

Einstein, H.A. (1950). The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. US Department of Agriculture. Washington DC, Estados Unidos.

Engelund, F., & Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. TEKNISKFORLAG Skelbrekade 4, Copenhagen, Dinamarca.

EURO-CORDEX, Coordinated Downscaling Experiment - European Domain (2017). EURO-CORDEX Simulations. Consultado el 06/03/17. <http://www.euro-cordex.net/060376/index.php/en>

FIC, Fundación para la Investigación del Clima. (2017). ENSEMBLES: Ensemble-based Predictions of Climate Changes and their Impacts. Consultado el 15/03/17. <https://www.ficlima.org/ensembles/>

Francés, F., Vélez, J. I., & Vélez, J. J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. Journal of Hydrology, 332(1–2), 226–240.

Francés, F., Vélez, J., Munera, J.C., Medici, C., & Busii, G. (2012). Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v. 8. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Gudmundsson, L., Bremnes, J.B., Haugen, J.E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. Hydrology and Earth System Sciences 16, 3383–3390.

Heinemann, H.G. (1981). A New Sediment Trap Efficiency Curve for Small Reservoirs¹. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 17, 825–830.

Herrera, S., Gutiérrez, J.M., Ancell, R., Pons Reynés, M.R., Frías, M.D., & Fernández, J. (2010). Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). International Journal of Climatology, 32(1), 74–85.

Iglesias, A., Estrela, T., & Gallart, F. (2005). Impactos sobre los recursos hídricos. Evaluación Preliminar de Los Impactos en España. En: Efecto Del Cambio Climático, 303–353.

IGME, Instituto Geológico y Minero de España (2017). Síntesis Geológica de la Provincia de Valencia escala 1:200.000. Consultado el 03/03/2017. <http://igme.maps.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=7782bbda5c0a49a2ac2854d710d99d67>

IIAMA, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (2017). AFINS 2.0 Programa para el análisis de la frecuencia de extremos hidrológicos. Consultado el 26/04/17. <http://www.iiama.upv.es/iiama/index.php/transferencia/software/afins-2-0>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2017). Preguntas Frecuentes. ¿Cómo contribuyen las actividades humanas a los cambios climáticos? y ¿Cómo se comparan con las influencias humanas?. Consultado el 01/03/2017. https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html

IPCC, Equipo principal de redacción, Pachauri, R.K., & Meyer, L.A. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, Suiza.

Jordan, P.R. (1977). Streamflow transmission losses in western Kansas. *Journal of the Hydraulics Division* 103, 905–918.

Julien, P.Y. (2010). *Erosion and sedimentation*. Cambridge University Press. Cambridge. Reino Unido.

Julien, P., & Rojas, R. (2002). Upland erosion modeling with CASC2D-SED. *International Journal of Sediment Research* 17, 265–274.

Lane, L.J. (1990). Transmission losses, flood peaks, and groundwater recharge. In *Hydraulics/Hydrology of Arid Lands*, (ASCE), pp. 343–348.

Lane, E.W., & Koelzer, V.A. (1943). Density of sediments deposited in reservoirs. St Paul US Engineer District Sub-Office, Hydraulic Laboratory, University of Iowa, Estados Unidos.

Lane, L.J., Ferreira, V.A., & Shirley, E.D. (1980). Estimating transmission losses in ephemeral stream channels. In *Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest*. Nevada Academy of Science, Arizona, U.S.A.

Lara, J.M., & Pemberton, E.L. (1963). Initial unit weight of deposited sediments. In *Proceedings of the Federal Interagency Sedimentation Conference*, pp. 818–845.

Lopez, F. (1973). *La Vega alta del Segura (clima, hidrología y geomorfología)*. Tesis doctoral. Universidad de Murcia. Murcia, España.

Martín, F. (2003). *Las gotas frías/DANAs: ideas y conceptos básicos*. Instituto Nacional de Meteorología. España.

Masachs, U. (1954). El clima. Las aguas. En: Terán, M. *Geografía de España Y Portugal*. 2, 8–20.

Mateu, J. (1974). La Rambla de la Viuda. Clima e hidrología. Mateu Bellés, Joan F.. *La Rambla de La Viuda. Clima E Hidrología*. En: *Cuadernos de Geografía*, 15, 47-68.

Mateu, J.F. (1982). *El Norte del País Valenciano: geomorfología litoral y prelitoral*. Universidad de Valencia, Servicio de publicaciones. Valencia, España.

Miller, C.R. (1953). Determination of the unit weight of sediment for use in sediment volume computations. Bureau of Reclamation Project Planning Division. US Department of the Interior. Estados Unidos.

Montoya, J.J. (2008). *Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València. Valencia, España.

Morata, A. (2014). *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Agencia Estatal de Meteorología, Madrid, España.

- Murillo, J.M. (2013). La relación río-acuífero en la actual planificación hidrológica y su interrelación con la Red natura 2000. 8.º Congreso Ibérico de Gestão e Planeamento da Água 0, 819–829.
- Nash, I.E., & Sutcliffe, I.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. *Journal of Hydrology* 10, 282–290.
- Nistor, C.J., & Church, M. (2005). Suspended sediment transport regime in a debris-flow gully on Vancouver Island, British Columbia. *Hydrological Processes* 19, 861–885.
- Pérez, A.J., & Calvo, A. (1986). La distribución de las ramblas en el País Valenciano: una aproximación cuantitativa. *Cuadernos Geografía* 38, 61–74.
- Perlman, H. (2012). The Water Cycle. U.S. United States Geological Survey. Consultado el 28/01/2017. <https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>
- Puch, C. (1998). Grandes cuevas y simas de España. Espeleo Club de Gràcia. Madrid, España.
- Rango, A., & Dewalle, D. (2008). Snowmelt-runoff model (SRM). *Principles of Snow Hydrology*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 306–364.
- Refsgaard, J.C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 198, 69–97.
- Refsgaard, J. C., & Abbott, M. B. (1996). Distributed hydrological modelling. Kluwer Academic Publishers. Kluwer, Netherlands.
- Refsgaard, J.C., & Knudsen, J. (1996). Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research* 32, 2189–2202.
- Regüés, D., Balasch, J.C., Castelltort, X., & Soler, M. (2000). Relación entre las tendencias temporales de producción y transporte de sedimentos y las condiciones climáticas en una pequeña cuenca de la montaña mediterránea (Vallcebre, Pirineos orientales). *Cuadernos de Investigación Geográfica* 41–66.
- Rodríguez, E., Picatoste, J.R., & Heras, F.H. (2014). Quinto informe de evaluación del IPCC: Bases físicas. *Tiempo y Clima* 5.
- Rojas, R. (2002). GIS-based upland erosion modeling, geovisualization and grid size effects on erosion simulations with CASC2D-SED. Tesis doctoral. Colorado State University, Fort Collins, Estados Unidos.
- Sala, M., & Villanueva, R. J. B. (1996). Teoría y métodos en Geografía Física. Síntesis. Madrid, España.
- Samani, Z. (2000). Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126, 265–267.
- Sanabria, J., Marengo, J., & Valverde, M. (2009). Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno). Climate change scenarios using regional models for the Peruvian Altiplano (Department of Puno). *Revista Peruana Geo-Atmosférica* 1, 134–149.
- Sánchez, A. (2015). Estudio del régimen hídrico en la rambla de la viuda (provincia de castellón). Análisis de la influencia de la información estándar en el modelo hidrológico. Tesis de grado. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Sanz, M.E., Avendaño Ruz, C., Cobo, R., & Gómez Ariza, J.L. (1997). Determinación de la erosión en la Cuenca del Segura a partir de los sedimentos acumulados en sus embalses. *Geogaceta* 23, 135–138.

- Segura, F.S. (1987). Las Ramblas valencianas. Tesis doctoral. Universidad de València. Valencia, España.
- Segura, F., & Camarasa, A.M. (1996). Balances hídricos de crecidas en ramblas mediterráneas: pérdidas hídricas. En *Clima y agua. La gestión de un recurso climático*, 235–245.
- SMG, Santander Meteorology Group (2017). Spain02: A set of gridded precipitation and temperature datasets. Consultado el 06/03/17. <http://www.meteo.unican.es/es/datasets/spain02>
- Sos, V., & Sanfeliu, T. (1983). La geología de la provincia de Castellón y su bibliografía. Sociedad Castellonense de Cultura. Castellón, España.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P.M. (2014). *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press Cambridge, Cambridge, Reino Unido.
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2013). Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions? *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 5061.
- Thornes, J.B. (1976). Semi-arid erosional systems: case studies from Spain. Geography Department, London School of Economics and Political Science, Londres, Inglaterra.
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38, 55–94.
- Velez, J.J., & Botero, A. (2011). Estimation of the time of concentration and the lag time at San Luis creek basin, Manizales. *Dyna* 78, 58–71.
- Verstraeten, G., Poesen, J., de Vente, J., & Koninckx, X. (2003). Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology* 50, 327–348.