



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Reducción de escala temporal para series de caudales en
régimen natural: aplicación a la Demarcación Hidrográfica
del Júcar

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Navarro Ros, Antonio

Tutor/a: Paredes Arquiola, Javier

Cotutor/a: Bergillos Meca, Rafael Jesús

Cotutor/a externo: Regidor Perona, María Carmen

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Trabajo de fin de máster

Reducción de escala temporal para series de caudales en régimen natural: aplicación a la Demarcación Hidrográfica del Júcar

Intensificación: *Ordenación de cuencas*

Autor:

Antonio Navarro Ros

Tutor:

Javier Paredes Arquiola

Cotutor:

Rafael Bergillos Meca

Cotutora externa:

María Carmen Regidor Perona

Junio, 2024



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: Reducción de escala temporal para series de caudales en régimen natural: aplicación a la Demarcación Hidrográfica del Júcar
Título del TFM en inglés: Downscaling for natural regime flow series: application to the Júcar River Basin Demarcation
Título del TFM en valenciano: Reducció d'escala temporal per a sèries de cabals en règim natural: aplicació a la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer
Alumno: Antonio Navarro Ros
Tutor: Javier Paredes Arquiola
Cotutor: Rafael Bergillos Meca
Cotutora externa: María Carmen Regidor Perona
Fecha de lectura: julio, 2024

Resumen
<p>Resumen</p> <p>El presente trabajo de fin de máster tiene como objetivo el desarrollo de una metodología para convertir las series mensuales de aportaciones en series diarias con la finalidad de tener un uso posterior para la definición de regímenes de caudales ecológicos por parte de la Confederación Hidrográfica del Júcar.</p> <p>Para abordar el objetivo del trabajo se proponen y aplican métodos basados en: (a) bajada de escala a partir de datos de caudales directos, y (b) bajada de escala a partir de resultados de modelos precipitación-escorrentía previamente calibrados y validados.</p> <p>Respecto a la bajada de escala a partir de datos directos, se plantean y se programan en Python cuatro alternativas para desagregar los caudales mensuales a diarios: (1) distribución uniforme de caudales diarios durante todo el mes, (2) distribución de caudales diarios con interpolación Akima entre los caudales mensuales del mes anterior, el mes actual y el mes siguiente, (3) distribución uniforme modificada según factores de variación basados en el análisis estadístico de las series disponibles de caudales diarios y mensuales, y (4) distribución interpolada mediante estadístico de las series disponibles de caudales diarios método Akima y posteriormente modificada</p>

según factores de variación basados en el análisis estadístico de las series disponibles de caudales diarios y mensuales.

En cuanto a la bajada de escala a partir de modelos precipitación-escorrentía, se emplea la herramienta EvalHid del Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL para construir modelos HBV y, una vez construidos, se plantean dos alternativas: (1) calibración y validación de los modelos a escala mensual y aplicación a escala diaria, y (2) calibración y validación de los modelos a escala diaria y aplicación a escala diaria.

Los seis métodos mencionados son aplicados en seis zonas de estudio en las cabeceras de las cuencas de los ríos Júcar, Turia y Mijares, comprobándose la precisión de cada método mediante comparación con series de caudales diarios disponibles en dichas zonas. El método más preciso se emplea posteriormente para extender la reducción de escala a toda la cuenca del río Júcar. Esto permite disponer de series de caudales diarios en toda la cuenca, lo cual posibilita la mejora en la definición de los regímenes de caudales ecológicos en todas las masas de agua, entre otras muchas aplicaciones.

Resum

El present treball de fi de màster té com a objectiu el desenvolupament d'una metodologia per a convertir les sèries mensuals d'aportacions en sèries diàries, amb la finalitat de tenir un ús posterior per a la definició de règims de cabals ecològics per part de la Confederació Hidrogràfica del Xúquer.

Per abordar l'objectiu del treball es proposen i s'apliquen mètodes basats en: (a) baixada d'escala a partir de dades de cabals directes, i (b) baixada d'escala a partir de resultats de models precipitació-escorrentia prèviament calibrats i validats.

Pel que fa a la baixada d'escala a partir de dades directes, es plantegen i es programen a Python quatre alternatives per desagregar els cabals mensuals a diaris: (1) distribució uniforme de cabals diaris durant tot el mes, (2) distribució de cabals diaris amb interpolació Akima entre els cabals mensuals del mes anterior, el mes actual i el mes següent, (3) distribució uniforme modificada segons factors de variació basats en l'anàlisi estadística de les sèries disponibles de cabals diaris i mensuals, i (4) distribució interpolada mitjançant estadística de les sèries disponibles de cabals diaris mètode Akima i posteriorment modificada segons factors de variació basats en l'anàlisi estadística de les sèries disponibles de cabals diaris i mensuals.

Quant a la baixada d'escala a partir de models precipitació-escorrentia, s'empra l'eina EvalHid del Sistema Suport de Decisió AQUATOOL per construir models HBV i, un cop construïts, es plantegen dues alternatives: (1) calibratge i validació dels models a escala mensual i aplicació a escala diària, i (2) calibratge i validació dels models a escala diària i aplicació a escala diària.

Els sis mètodes esmentats són aplicats en sis zones d'estudi a les capçaleres de les conques dels rius Xúquer, Túria i Millars, comprovant-se la precisió de cada mètode mitjançant comparació amb sèries de cabals diaris disponibles en aquestes zones. El mètode més precís s'empra posteriorment per a estendre a reducció d'escala tota la conca del riu Xúquer. Això permet disposar de sèries de cabals diaris a tota la conca, la qual cosa possibilita la millora en la definició dels règims de cabals ecològics a totes les masses d'aigua, entre moltes altres aplicacions.

Abstract

The objective of this master's thesis is the development of a methodology to convert the monthly series of inflows in daily series with the purpose of using them for the definition of environmental flow regimes by the Jucar River Basin Authority.

To address the objective of this work, methods based on: (a) downscaling from direct flow data, and (b) downscaling from the results of previously calibrated and validated rainfall-runoff models are proposed and applied.

With respect to downscaling from direct data, four alternatives are proposed and programmed in Python to disaggregate monthly flows to daily flows: (1) uniform distribution of daily flows during the whole month, (2) distribution of daily flows with Akima interpolation between the monthly flows of the previous month, the current month and the following month, (3) uniform distribution modified according to variation factors based on the statistical analysis of the available series of daily and monthly flows, and (4) distribution interpolated by statistical of the available series of daily flows Akima method and subsequently modified according to variation factors based on the statistical analysis of the available series of daily and monthly flows.

Regarding downscaling from rainfall-runoff models, the EvalHid tool of the AQUATOOL Decision Support System is used to build HBV models and once built, two alternatives are proposed: (1) calibration and validation of the models at monthly



scale and application at daily scale, and (2) calibration and validation of the models at daily scale and application at daily scale.

The six methods mentioned above are applied to six study areas in the upper part of the Júcar, Turia and Mijares river basins, and the accuracy of each method is checked by comparison with daily flow series available in these areas. The most accurate method is subsequently used to extend the downscaling to the entire Júcar river basin. This makes daily flow series available for the entire basin, which makes it possible to improve the definition of environmental flow regimes in all water bodies, among many other applications.

Palabras clave: Bajada de escala, caudales diarios, factores de variación, modelo precipitación-escorrentía, Demarcación Hidrográfica del Júcar.

Paraules clau: Baixada d'escala, cabals diaris, factors de variació, model precipitació-escorrentia, Demarcació Hidrogràfica del Xúquer.

Key words: Downscaling, daily flows, variation factors, rainfall-runoff model, Júcar River Basin District.



Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Confederación Hidrográfica del Júcar por otorgarme la beca que ha hecho posible la realización de este trabajo de fin de máster. Del mismo modo que agradezco a todo el equipo humano con el que he compartido espacio de trabajo durante seis meses, que me han hecho sentir parte de un equipo y que han contribuido a mi desarrollo profesional con su disposición y hospitalidad. Mención especial a mi cotutora en la CHJ, María Carmen Regidor Perona, quien con su apoyo y mentoría ha facilitado mi etapa como becario.

También quiero mostrar un sentido agradecimiento a mi tutor Javier Paredes y a mi cotutor Rafael Bergillos por su dedicación y orientación a lo largo de la elaboración del trabajo. Su experiencia y ayuda han sido fundamentales para mi desarrollo académico y personal.

Asimismo, doy las gracias a mi familia, pareja y amigos, cuyo apoyo e interés ha sido incondicional. En especial a mi abuelo, quien siempre se ha sentido orgulloso de mis estudios y cuyo interés por esta nueva etapa ha sido un motor para mí. Allí donde estés, gracias.



Índice

1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	3
3. Área de estudio	3
3.1. Demarcación Hidrográfica del Júcar	3
3.1.1. Precipitación	5
3.1.2. Temperatura	6
3.1.3. Evapotranspiración	8
3.1.4. Puntos de estudio piloto.....	9
3.3. Cuenca del Júcar	11
4. Recopilación y análisis de la información.....	13
4.1. Datos hidrológicos	13
4.1.1. Estaciones de aforo	13
4.1.2. Series de caudales con restitución a régimen natural	15
4.2. Datos meteorológicos	17
4.3. Tratamiento de los datos	18
5. Metodología.....	19
5.1. Bajada de escala a partir de un modelo precipitación-escorrentía.....	19
5.1.1. Modelo HBV	20
5.1.2. Proceso de calibración	26
5.2. Bajada de escala a partir de patrones temporales de datos históricos.....	32
5.2.1 Generación de factores de variación.....	32
6. Análisis de los métodos de bajada de escala en los casos piloto	35
6.1. Aplicación del modelo precipitación-escorrentía	35
6.1.1. Resultados calibración escala diaria	35
6.1.2. Influencia de la escala temporal	51
6.1.3. Influencia de la discretización espacial	53
6.2. Aplicación del método de desagregación con patrones temporales históricos	55
6.3. Comparación de resultados de ambos métodos	57
7. Aplicación del modelo precipitación-escorrentía en la cuenca del río Júcar.....	61
7.1. Desarrollo del modelo.....	62
7.2. Calibración y resultados aportaciones intermedias.....	63
7.3. Modelo completo cuenca del Júcar.....	84
7.4. Cálculo patrones diarios.....	88
8. Conclusiones.....	89



9. Líneas de investigación futuras	90
Bibliografía.....	92
ANEJO 1. Resultados calibración EVALHID en los puntos de estudio piloto	95
1.1. Resultados calibración EVALHID en Alarcón	95
1.2. Resultados calibración EVALHID en Arenós	95
1.3. Resultados calibración EVALHID en Arquillo	96
1.4. Resultados calibración en Cuenca	97
1.5. Resultados calibración en Pajaroncillo.....	97
1.6. Resultados calibración en Zagra.....	98
ANEJO 2. Comparación entre metodologías aplicadas en los puntos de estudio piloto.	99
2.1. Comparación entre metodologías aplicadas en Alarcón	99
2.2. Comparación entre metodologías aplicadas en Arenós	110
2.3. Comparación entre metodologías aplicadas en Arquillo	118
2.4. Comparación entre metodologías aplicadas en Cuenca	122
2.5. Comparación entre metodologías aplicadas en Pajaroncillo	133
2.6. Comparación entre metodologías aplicadas en Zagra	144

Índice de figuras

Figura 1. Territorio de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, donde se muestran las masas fluviales, las provincias que abarca y las demarcaciones con las que limita. Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (2022).	4
Figura 2. Mapa de precipitación media entre 1940 y 2018 en la DHJ (izquierda) y mapa de precipitación media entre 1980 y 2018 (derecha). Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (2022).	6
Figura 3. Porcentaje de reducción de la precipitación media en la DHJ entre el periodo (1940-2018) y (1980-2018) Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (2022).	6
Figura 4. Distribución en la DHJ de la temperatura media anual (°C) para el periodo de estudio de 1940-2018 (izquierda) y para el periodo reciente 1980-2018 (derecha). Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (2022).	7
Figura 5. Mapa de ETP media entre 1940 y 2018 (izquierda) y mapa de ETP media entre 1980 y 2018 (derecha). Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (2022).	9
Figura 6. Mapa de ETR media entre 1940 y 2018 (izquierda) y mapa de ETR media entre 1980 y 2018 (derecha). Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (2022).	9
Figura 7. Masas de agua superficial de la Cuenca Hidrográfica del Júcar y puntos de estudio piloto.	11
Figura 8. Ubicación de los puntos de estudio de la cuenca del río Júcar.	13
Figura 9. Red oficial de estaciones de aforo (ROEA) desde la plataforma SIA JUCAR. Fuente: SIA Júcar (2023).	14
Figura 10. Distribución espacial de las observaciones disponibles en el año 1991. Fuente: Peral et al. (2017).	18
Figura 11. Estructura del módulo EVALHID. Fuente: Paredes et al. (2017).	20
Figura 12. Estructura modelo HBV. Fuente: Shrestha et Solomatine (2008).	22
Figura 13. Coeficiente de filtración respecto SM y FC. Fuente: Paredes et al. (2017).	23
Figura 14. Relación Etr/ETP respecto PWP y FC. Fuente: Paredes et al. (2017).	24
Figura 15. Proceso de calibración.	29
Figura 16. Topología desagregada en el módulo EVALHID.	30
Figura 17. Topología agregada en el módulo EVALHID.	30
Figura 18. Calibrador de EVALHID.	31

Figura 19. Función objetivo resultante de la calibración en escala diaria en cada punto de estudio piloto.	35
Figura 20. Resultados calibración modelo EVALHID en Alarcón. Año hidrológico 1987-1988	37
Figura 21. Resultados calibración modelo EVALHID en Alarcón. Año hidrológico 1993-1994	38
Figura 22. Resultados calibración modelo EVALHID en Alarcón. Año hidrológico 2002-2003.	38
Figura 23. Resultados calibración modelo EVALHID en Cuenca. Año hidrológico: 1987-1988	39
Figura 24. Resultados calibración modelo EVALHID en Cuenca. Año hidrológico: 2002-2003	40
Figura 25. Resultados calibración modelo EVALHID en Cuenca. Año hidrológico: 1993-1994	41
Figura 26. Resultados calibración modelo EVALHID en Pajaroncillo. Año hidrológico: 1987-1988	42
Figura 27. Resultados calibración modelo EVALHID en Pajaroncillo. Año hidrológico: 1993-1994	43
Figura 28. Resultados calibración modelo EVALHID en Pajaroncillo. Año hidrológico: 2017-2018	43
Figura 29. Resultados calibración modelo EVALHID en Arenós. Año hidrológico: 2002-2003	45
Figura 30. Resultados calibración modelo EVALHID en Arenós. Año hidrológico: 1993-1994	46
Figura 31. Resultados calibración modelo EVALHID en Arenós. Año hidrológico: 2017-2018	46
Figura 32. Resultados calibración modelo EVALHID en el punto de estudio de Arquillo. Año hidrológico: 2009-2010	48
Figura 33. Resultados calibración modelo EVALHID en el punto de estudio de Arquillo. Año hidrológico: 2015-2016	48
Figura 34. Resultados calibración serie EVALHID en Zagra. Año hidrológico: 1987-1988	49
Figura 35. Resultados calibración serie EVALHID en Zagra. Año hidrológico: 1993-1994	50

Figura 36. Resultados validación serie EVALHID en Zagra. Año hidrológico: 2009-2010	51
Figura 37. Función objetivo resultante de la comparación entre series simuladas diarias y aforadas. A la izquierda se muestran los resultados de la simulación mediante los parámetros obtenidos de la calibración en escala mensual. A la derecha ídem, con calibración en escala diaria.....	52
Figura 38. Gráfica comparativa entre el caudal observado (azul), el caudal simulado en escala mensual mediante los parámetros de la calibración mensual (amarillo) y el caudal simulado mensual calibrado en escala diaria (verde).	53
Figura 39. Efecto configuración espacial en la estación de aforo de Alarcón.....	54
Figura 40. Aplicación de la distribución uniforme y de la distribución con interpolación.	55
Figura 41. Aplicación de la distribución uniforme e interpolada con la adición de factores estocásticos.	56
Figura 42. Aplicación de la distribución uniforme e interpolada con la adición de factores estocásticos.	57
Figura 43. Comparación entre todas las metodologías de patrones históricos y el modelo precipitación-escorrentía en la estación de aforo de Alarcón	58
Figura 44. Comparación entre metodologías en la estación de aforo de Alarcón durante año húmedo.	59
Figura 45. Comparación entre metodologías en la estación de aforo de Alarcón durante año seco.	60
Figura 46. Modelo agregado representativo de la cuenca intermedia de Tous en EVALHID.....	63
Figura 47. Resultados calibración del modelo EVALHID en Alarcón.....	64
Figura 48. Resultados validación del modelo EVALHID en Alarcón.....	65
Figura 49. Resultados calibración del modelo EVALHID en Contreras.....	66
Figura 50. Resultados validación del modelo EVALHID en Contreras.....	67
Figura 51. Resultados calibración EVALHID en El Molinar.....	68
Figura 52. Resultados validación serie EVALHID en El Molinar	69
Figura 53. Resultados calibración EVALHID en Cofrentes.....	69
Figura 54. Resultados validación EVALHID en Cofrentes.....	70
Figura 55. Resultado calibración serie EVALHID en Tous.....	71
Figura 56. Resultado validación serie EVALHID en Tous.....	72



Figura 57. Resultados calibración serie EVALHID en Bellús.	73
Figura 58. Resultados calibración serie EVALHID en Forata	74
Figura 59. Demanda neta por Unidad de Demanda agrícola (UDA). Fuente: Plan hidrológico de la CHJ 2022-2027.....	75
Figura 60. Distribución teórica porcentual de la demanda agrícola de la Plana Utiel-Requena.	76
Figura 61. Procedimiento de introducción de los bombeos en la celda subsuperficial del modelo HBV.	77
Figura 62. Resultado de la calibración de la serie EVALHID con bombeo en Bellús..	77
Figura 63. Resultados de validación de la serie EVALHID con bombeos en Belús.	78
Figura 64. Resultados de la calibración de la serie EVALHID con bombeos en Forata	79
Figura 65. Resultados validación serie EVALHID con bombeos en Forata	80
Figura 66. Resultados calibración serie EVALHID en Sueca	81
Figura 67. Resultados validación serie EVALHID en Sueca.	82
Figura 68. Modelo desagregado de la Cuenca del Júcar completo desarrollado en EVALHID.....	85
Figura 69. Serie diaria de aportaciones de la masa hidrológica superficial 18-05-02-01 de la cuenca intermedia de Alarcón.	86
Figura 70. Serie diaria de aportaciones de la masa de agua superficial 18-17 de la cuenca intermedia de El Molinar	86
Figura 71. Comparación series acumuladas al final de la cuenca del Júcar.	87

Índice de Tablas

Tabla 1. Sistemas de explotación dentro de la DHJ y la superficie que abarcan.....	5
Tabla 2. Metodología aplicada por la CHJ para el cálculo de restitución a régimen natural en los puntos de estudio.....	17
Tabla 3. Valores de referencia del criterio de Nash-Sutcliffe	27
Tabla 4. Visualización de los tres rangos utilizados para la calibración para cada uno de los parámetros.....	28
Tabla 5. Función objetivo de las series simuladas resultantes de cada metodología respecto la observada.....	61
Tabla 6. Valores de los parámetros de cada subcuenca según el punto de descarga.....	83
Tabla 7. Factores de variación por masa de agua superficial y día.....	89

1. Introducción

El agua es un bien indispensable para la vida, pero escaso en diversas regiones del mundo. La existencia de zonas secas por causas naturales y también por el consumo de los recursos hídricos destinados a determinadas actividades y servicios, entre otros factores, explican esta realidad (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022). En los sistemas donde la disponibilidad y la demanda de agua se encuentran ajustados, la presión ejercida ha ido en aumento como resultado de la aceleración del cambio climático. Este fenómeno ha reducido la cantidad de agua disponible mientras que simultáneamente se han incrementado las demandas hídricas (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022).

En este contexto, es necesario tener en cuenta dos fenómenos importantes ligados al consumo de agua: la sobreexplotación del recurso para satisfacer las demandas y la regulación de las masas fluviales, cuyos efectos conducen en muchas ocasiones a la fragmentación de los ríos y a la degradación de los ecosistemas asociados (Pellicer-Martínez y Martínez-Paz, 2016; Tharme, 2013). Las consecuencias no sólo se deben considerar pérdidas de carácter ambiental, como la pérdida de biodiversidad y de servicios ecosistémicos, sino también de carácter sociocultural, al ser numerosas las poblaciones que históricamente han basado su economía y cultura en los ríos que atraviesan su territorio, entre otros factores (Arthington et al., 2018).

Esta compleja interacción entre los diferentes agentes que afectan a la cantidad y calidad del agua conlleva una serie de desafíos en la gestión integrada de los recursos hídricos. En este marco, la comprensión y predicción de los caudales de los ríos deviene en un factor imprescindible en la gestión de recursos hídricos. Aportan la información necesaria para tomar decisiones que satisfagan las necesidades de la sociedad de manera sostenible y preserven los ecosistemas.

El presente trabajo de fin de máster (TFM) se centra en la aplicación de técnicas de reducción de escala temporal para series de caudales en régimen natural aplicadas a la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ)

La Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) emplea el módulo de simulación hidrológica Patrical (Perez-Martín, 2005), que trabaja en escala mensual, para la evaluación de los recursos hídricos. Sin embargo, se requiere la disponibilidad de series



diarias de recursos hídricos en la planificación hidrológica con el fin de alcanzar un mayor grado de detalle. Trabajar con datos diarios confiere una resolución temporal más detallada, pues se captura mejor la variabilidad estacional e intramensual de los caudales y se obtiene una serie de patrones hidrológicos más rigurosos para la posterior aplicación en la modelación. En conjunto, permite mejorar la comprensión y gestión del agua de la demarcación.

En la planificación, varios elementos clave requieren datos en escala diaria para su análisis preciso, como la definición de los regímenes de caudales ecológicos. El caudal ecológico, definido como el caudal necesario para preservar los ecosistemas acuáticos, así como la vegetación de ribera y zonas húmedas, contribuye a alcanzar el buen estado o potencial ecológico en ríos y aguas de transición (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022).

Con el fin de alcanzar el objetivo establecido, se han aplicado metodologías que se fundamentan en técnicas estadísticas y modelos hidrológicos precipitación-escorrentía. Estos métodos se han aplicado en varios puntos de la cuenca del Júcar, donde se ubican estaciones de aforo que permiten la obtención de series temporales de datos observados. Es fundamental que los estudios sean aplicados en áreas de la cuenca con régimen natural.

La primera parte del presente trabajo se basa en la obtención de una metodología que permita reproducir datos diarios de aportaciones en régimen natural en los tramos fluviales de los ríos Cabriel, Júcar, Millares y Turia, todos ellos dentro de la DHJ. El análisis de los resultados permitirá seleccionar la metodología más adecuada, lo que supondrá una mejora en la planificación y gestión de los recursos hídricos para la CHJ. La segunda parte consiste en la aplicación de la metodología escogida en la cuenca hidrográfica del río Júcar para alcanzar uno de los principales objetivos de este trabajo: la obtención del caudal ecológico diario en diferentes masas de agua superficial.

2. Objetivos

El objetivo principal del presente TFM es desarrollar una metodología que permita reducir la escala temporal de las series de caudales con las que trabaja la CHJ.

Para ello, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un modelo estadístico basado en patrones históricos de caudales y un modelo precipitación-escorrentía que opere en escala diaria.
- Seleccionar y justificar el método más apropiado para el caso de estudio.
- Aplicar la metodología seleccionada a la cuenca del río Júcar para obtener series diarias en cada una de las masas de agua superficiales definidas por la CHJ.

3. Área de estudio

En este apartado se describe la DHJ porque es el ámbito total del trabajo. Seis puntos de estudio dentro de la misma se utilizan en la primera parte de este análisis. La parte final se centra en la cuenca hidrográfica del Júcar.

3.1. Demarcación Hidrográfica del Júcar

La DHJ se ubica en la franja oriental de la península ibérica, en el territorio comprendido por las cuencas que confluyen hacia el mar Mediterráneo entre la desembocadura del río Cenia y la desembocadura del río Segura. Con una superficie de 42756.4 km², su extensión abarca cinco comunidades autónomas: Aragón (Teruel), Castilla la Mancha (Cuenca y Albacete), Cataluña (Tarragona), la Comunidad Valenciana (Alicante, Castellón y Valencia) y la Región de Murcia.

En la figura que se muestra a continuación, se aprecia que el territorio incluido dentro de la DHJ no abarca la totalidad de la provincia correspondiente (Figura 1). La representación territorial de la Comunidad Valenciana constituye aproximadamente la mitad de la superficie total, seguida por las comunidades de Castilla-La Mancha, con el 37.6 %, Aragón con el 12.6 % y una presencia geográfica mínima en comparación para Cataluña y Murcia (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022).

Desde un punto de vista geográfico se pueden diferenciar dos ambientes en la DHJ: uno interior, constituido por zonas montañosas donde tiene lugar la mayoría de las precipitaciones que originan las cabeceras de los principales ríos, junto con la recarga de los acuíferos y, en contraposición, un ambiente litoral, caracterizado por amplias llanuras en su mayoría, donde destacan las tierras de cultivo y la presencia de los principales

núcleos de población. Es significativo indicar la importancia del régimen subterráneo en el mantenimiento de caudal en las masas de agua superficiales, al ser su principal aportación anualmente.



Figura 1. Territorio de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, donde se muestran las masas fluviales, las provincias que abarca y las demarcaciones con las que limita. Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (2022)

Una particularidad de la DHJ es que está compuesta por varios ríos que desembocan en el mar, a diferencia de las demás demarcaciones intercomunitarias, donde las masas fluviales tienden a converger en una sola. En la tabla 1 se muestra el área de cada sistema de explotación.

Sistema de explotación	Área incluyendo aguas costeras (km ²)	Área excluyendo aguas costeras (km ²)
Cenia - Maestrazgo	2.318,84	2.033,00
Mijares-Plana de Castellón	5.068,65	4.818,78
Palancia - Los Valles	1.131,41	1.086,90
Turia	7.532,36	7.231,71
Júcar	22.380,23	22.207,80
Serpis	1.186,02	985,17
Marina Alta	1.172,43	838,62
Marina Baja	750,30	606,65
Vinalopó- Alacantí	3.348,26	2.947,77
Total DHJ	44.888,50	42.756,41

Tabla 1. Sistemas de explotación dentro de la DHJ y la superficie que abarcan. Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (2022)

3.1.1. Precipitación

La distribución espacial y temporal de la precipitación en la DHJ exhibe un alto grado de heterogeneidad. Las áreas más húmedas se encuentran en la cabecera de las principales cuencas y en la franja sudeste de la demarcación, donde la orografía local desempeña un papel determinante en la formación y retención de fenómenos de precipitación. El origen de los cursos fluviales de la cuenca está estrechamente relacionado con estas zonas geográficas húmedas (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022). A excepción del área descrita, la zona sur de la DHJ se caracteriza por precipitaciones muy bajas a lo largo del año (Figura 2).

La variabilidad interanual está fuertemente influenciada por los fenómenos meteorológicos locales, con gran parte de la precipitación de la zona del litoral concentrada en los meses de septiembre y octubre, conocidos como épocas de gota fría. Por otra parte, la temporada en la que se registra la mayor cantidad de lluvia en las cuencas altas es durante los meses de primavera (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022). El verano tiende a ser seca dentro de toda la demarcación, con la aparición ocasional de eventos convectivos.

En las últimas décadas, se ha observado una tendencia generalizada de disminución en la precipitación en gran parte del área de la DHJ, afectando principalmente a las cabeceras de las cuencas fluviales. En cambio, en las zonas próximas al litoral y algunos puntos ubicados en la cuenca media de sus respectivos sistemas fluviales, se observa un ligero aumento de la precipitación media (Figura 3).

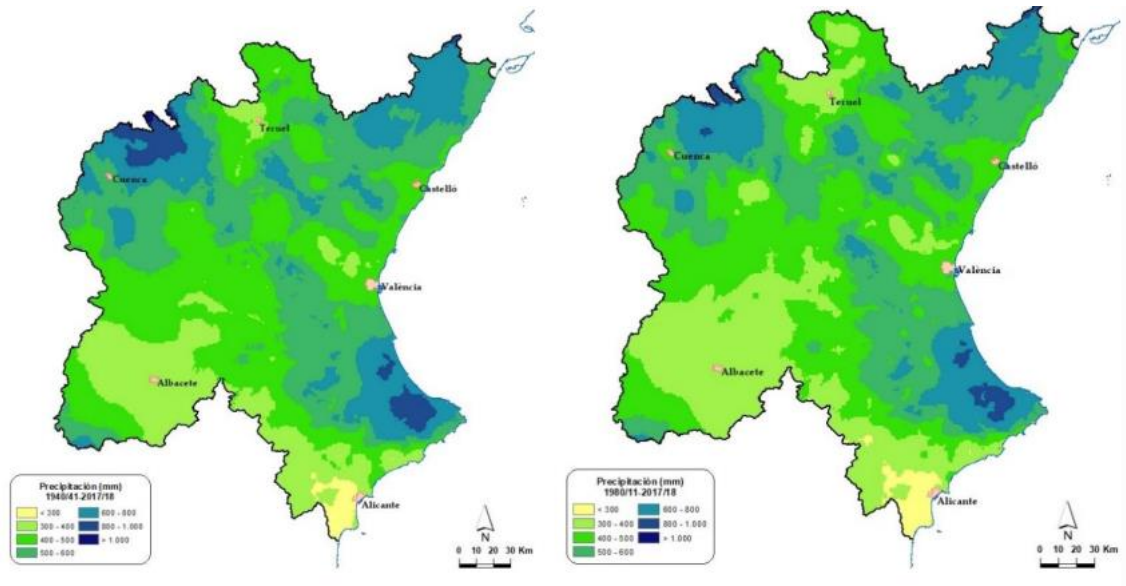


Figura 2. Mapa de precipitación media entre 1940 y 2018 en la DHJ (izquierda) y mapa de precipitación media entre 1980 y 2018 (derecha). Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (2022)

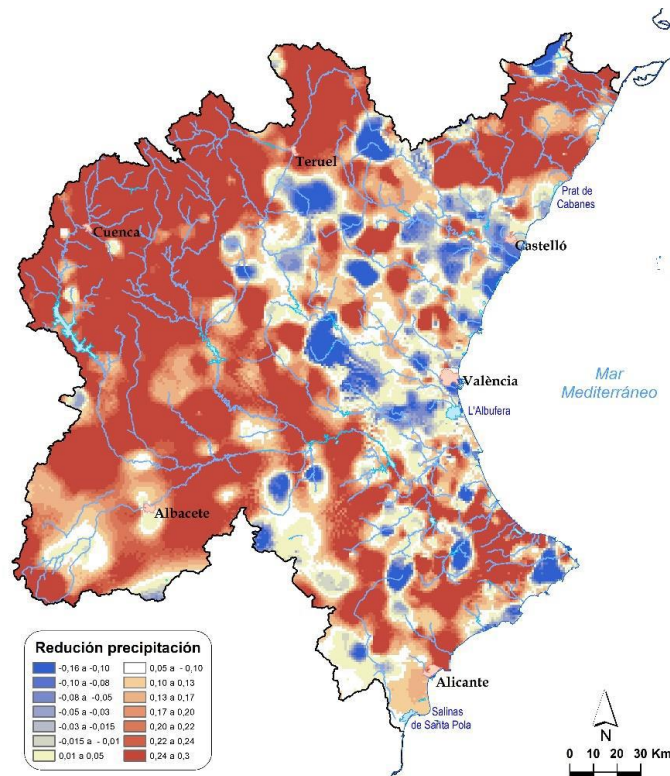


Figura 3. Porcentaje de reducción de la precipitación media en la DHJ entre el periodo (1940-2018) y (1980-2018). Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (2022)

3.1.2. Temperatura

La temperatura media anual en la DHJ en el periodo 1940-2018 presenta una distribución donde se advierten dos tipos de climas distintos:

1. En la zona interior, predomina el clima continental, caracterizado por inviernos fríos y prolongados, así como veranos secos y calurosos. Es importante considerar los efectos de la altitud, la topografía y la situación geográfica para diferenciar entre el interior norte de la DHJ (provincia de Teruel, Serranía de Cuenca y determinadas zonas del interior de la provincia de Castellón) y el interior Sur, (provincia de Albacete y ciertas áreas del interior de las provincias de Valencia y Alicante). En el interior sur, la diferencia de temperaturas máximas en verano y su duración son muy significativas, lo que genera una disparidad climática respecto al área interior norte, más fría y con menor rango de temperaturas.
2. En el litoral, la influencia del mar Mediterráneo modera las temperaturas, especialmente en las más próximas a la costa, lo que resulta en inviernos suaves y veranos menos extremos en comparación a la zona interior de las provincias de la Comunidad Valenciana. La distribución de las temperaturas en esta área está condicionada también por la orografía y por situación geográfica, siendo más calurosas, por lo general, las zonas situadas en el litoral sur.

Se puede observar un aumento importante de las temperaturas en toda la franja litoral, en el interior de la Comunidad Valenciana y en la provincia de Albacete dentro del periodo de estudio más reciente (1980-2018), comparado con la serie completa (1940-2018) (Figura 4). Sin embargo, en las zonas de cabecera de los principales ríos de la DHJ, la temperatura media anual ha experimentado un ligero descenso.

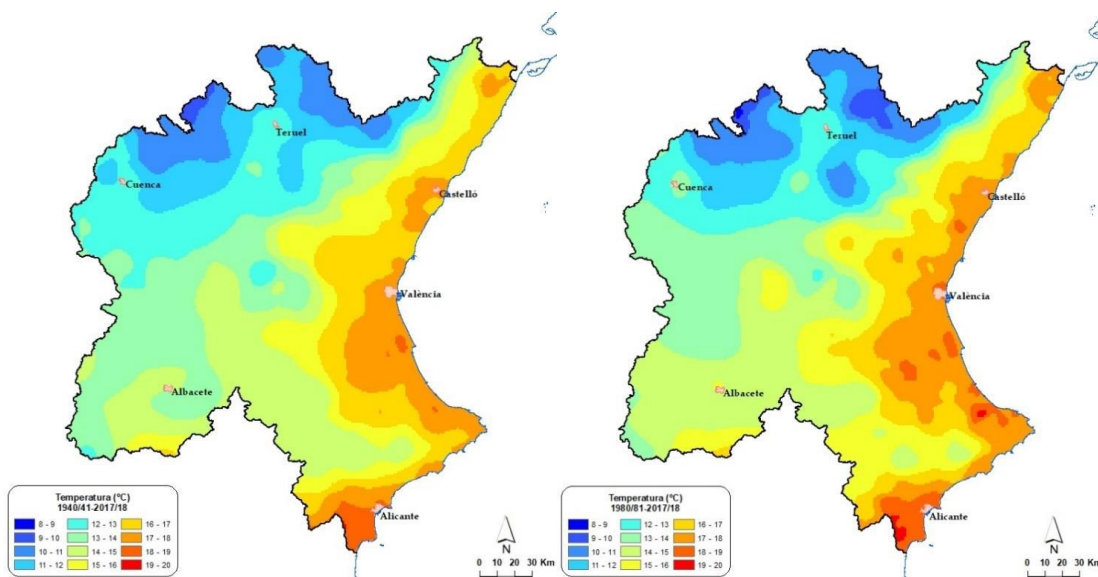


Figura 4. Distribución en la DHJ de la temperatura media anual (°C) para el periodo de estudio de 1940-2018 (izquierda) y para el periodo reciente 1980-2018 (derecha). Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (2022)

3.1.3. Evapotranspiración

La evapotranspiración es un concepto que combina dos fenómenos físicos diferentes pero interrelacionados, y que tienen una gran incidencia en la evaluación de los recursos hídricos: la evaporación desde el suelo junto con la transpiración de la vegetación. Estos procesos determinan la cantidad de agua que se transfiere a la atmósfera (Thornthwaite, 1948). La evapotranspiración potencial (ETP) se define como la cantidad de evapotranspiración que se produciría si las condiciones de humedad del suelo y el desarrollo de la vegetación fueran óptimas, según las condiciones meteorológicas y del suelo dentro durante el periodo estudiado (Thornthwaite, 1948). Por otro lado, la evapotranspiración real (ETR) se define como la cantidad de evapotranspiración que realmente ocurre bajo las condiciones existentes. La ETR puede ser menor que la ETP, pero nunca mayor.

Dentro de la DHJ la ETP presenta una distribución acorde con el nivel de aridez de cada zona, siendo el sureste de la demarcación y parte del litoral las áreas que poseen los valores más altos de ETP (Figura 5). Por otro lado, la distribución los valores de la ETR muestra diferencias significativas en dos grandes zonas geográficas (Figura 6). En el interior, se observa una disposición prácticamente opuesta en las zonas más montañosas en comparación con los valores mostrados en la figura 5. Esto se debe a que en este territorio se alcanzan las condiciones de humedad y vegetación necesarias para que los valores de la ETR se aproximen a los valores de la ETP.

De la misma manera, en el territorio que ocupa la provincia de Albacete, aunque la ETP alcanza las cifras máximas de la DHJ, los valores de la ETR son mínimos debido a la falta de humedad en el suelo a pesar de las altas temperaturas. No obstante, en la mayoría del territorio litoral, a excepción de la zona sur, los valores máximos de ambos fenómenos coinciden. Esto se explica por las altas temperaturas combinadas con una mayor humedad en el suelo en estas áreas.

Hasta un 80 % del agua introducida en la DHJ a partir de la lluvia se evapotranspira, dejando un 20 % en forma de recurso hídrico (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022). Asimismo, las figuras 5 y 6 que se presentan a continuación muestran un aumento general de la ETP en las últimas décadas en todo el territorio, en contraposición a una importante reducción de la ETR. Este cambio es resultado de la reducción de las precipitaciones en el área de estudio generándose menos cantidad de recurso y, asimismo, del aumento de las temperaturas que se han analizado de manera previa.

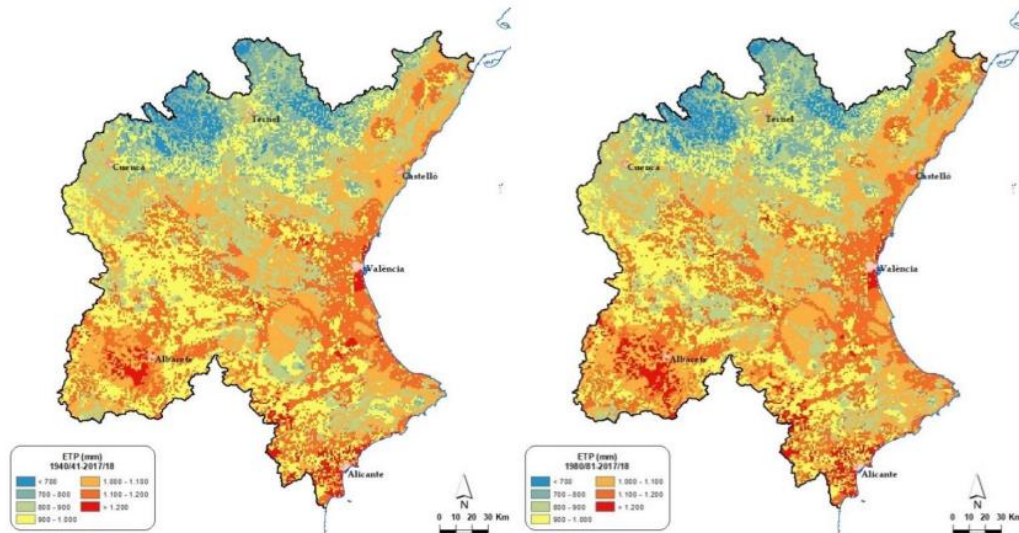


Figura 5. Mapa de ETP media entre 1940 y 2018 (izquierda) y mapa de ETP media entre 1980 y 2018 (derecha).
Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (2022)

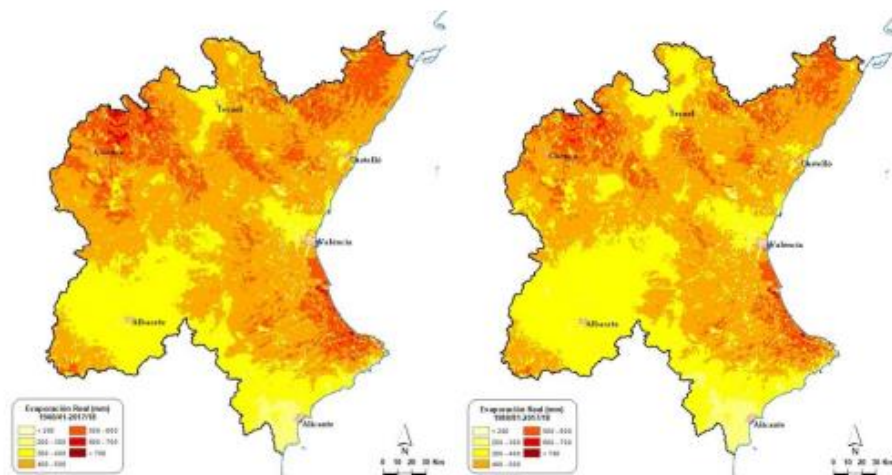


Figura 6. Mapa de ETR media entre 1940 y 2018 (izquierda) y mapa de ETR media entre 1980 y 2018 (derecha).
Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar (2022)

3.1.4. Puntos de estudio piloto

Para el estudio de la metodología más adecuada para la reducción de escala de las series de caudales, se ha decidido seleccionar seis estaciones de aforo en régimen natural ubicadas en los tres sistemas de explotación principales de la DHJ: el sistema del río Júcar, el del río Turia y el del río Mijares.

Las estaciones de aforo seleccionadas son, en orden alfabético: Aguas arriba de Arenós, Castellar, Cuenca, Gea de Albarracín, Pajaroncillo y Zagra (Figura 8). Durante el presente estudio, las estaciones de Aguas arriba de Arenós, Castellar y Gea de Albarracín se

estudiarán bajo los nombres de los embalses que se encuentran inmediatamente aguas debajo de su ubicación, es decir, Arenós, Alarcón y Arquillo respectivamente.

Estas estaciones han sido seleccionadas principalmente por su ubicación en cabecera, considerándose que el caudal que miden se encuentra en régimen natural, sin alteraciones significativas, y con todas las estaciones en funcionamiento en la actualidad. Además, estas estaciones proporcionan datos en escala diaria y mensual, lo cual es fundamental ya que los caudales que registran son imprescindibles para el balance hídrico de la CHJ al estar ubicadas en la cuenca alta de los principales sistemas fluviales.

Para llevar a cabo el estudio, se precisa la división de la DHJ en subcuencas, utilizando, las masas de agua superficial del Plan Hidrológico de Cuenca 2022-2027. Para este análisis se han empleado las superficies y códigos de cada una de estas masas de agua.

Se ha considerado que las subcuencas aguas arriba de los puntos de estudio se encuentran en régimen natural, con las siguientes apreciaciones:

- En el sistema del Júcar, se ha considerado que la influencia del embalse de la Toba, situado aguas arriba de la estación de aforo de Cuenca, no es notable en el régimen hídrico diario debido a su función como estación hidroeléctrica. También se ha tenido en cuenta que las demandas que puedan generarse en la ciudad de Cuenca no modifican suficientemente el caudal observado.
- En el sistema del Turia, se ha considerado que no existe influencia por parte del embalse de Arquillo y de las demandas de agua de la ciudad de Teruel en el caudal aforado en la estación de Zagra, debido a la renovación de recurso con la entrada de varios afluentes importantes, como el río Ebrón.
- En el sistema del Mijares, sólo cabe reseñar que no se ha considerado que los cultivos adyacentes a los tramos fluviales tengan una influencia suficientemente alta como para imposibilitar el estudio en la estación de aforo de aguas arriba del embalse de Arenós.

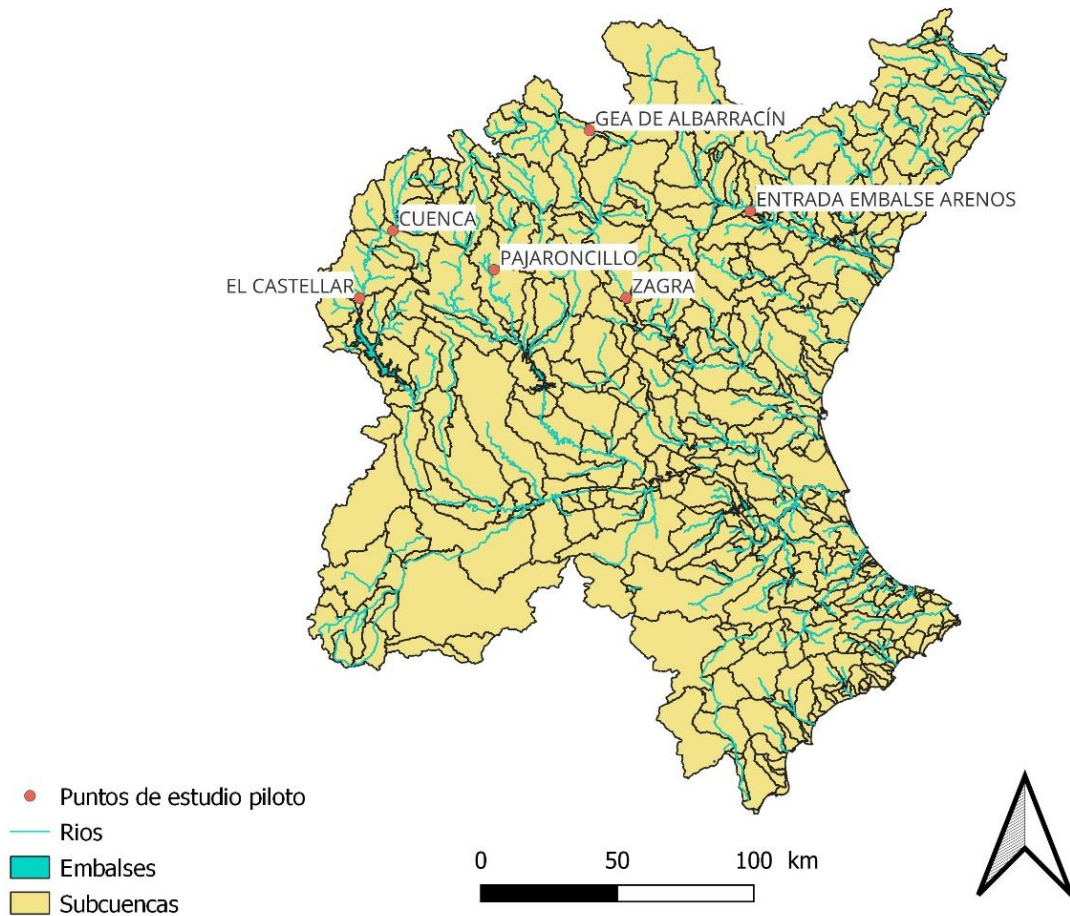


Figura 7. Masas de agua superficial de la Cuenca Hidrográfica del Júcar y puntos de estudio piloto

3.3. Cuenca del Júcar

La parte final de este trabajo analizará la Cuenca del río Júcar. Para ello se ha dividido la superficie completa en ocho áreas diferentes con el fin de estudiar individualmente sus características hidrológicas.

Los puntos de estudio en la Cuenca del Júcar que determinan cada una de las áreas son los siguientes:

- Río Júcar: Embalse de Alarcón (2894.20 km²), Embalse del Molinar (7049.32 km²), Embalse de Tous (2042.18 km²) y Sueca (2658.98 km²).
- Río Cabriel: Embalse de Contreras (3333.21 km²), Cofrentes (1615.14 km²).
- Río Albaida: Embalse de Bellús (488.829 km²).
- Río Magro: Embalse de Forata (1025.67 km²).

Estas áreas de estudio presentan características geográficas muy diferentes entre sí. Las cabeceras del río Júcar y de su principal afluente, el río Cabriel suponen dos áreas (Figura

7) que se caracterizan por la influencia de la orografía y del relieve, lo que provoca precipitaciones que generan recursos superficiales a través de numerosos tributarios y almacenamiento subterráneo (Gil, 2006).

En el tramo medio se encuentra el denominado Júcar manchego, que abarca la superficie más extensa de todas las zonas de estudio antes de descargar en el embalse del Molinar. Esta área presenta características opuestas, con una extensa llanura sin arroyos que descarguen en la red principal. A pesar de las bajas precipitaciones, las aportaciones son constantes a lo largo del año. La descarga en la cuenca proviene de las aportaciones del importante acuífero de la Mancha Oriental, cuya agua proviene no sólo de las precipitaciones, sino también de numerosos aportes laterales (Gil, 2006).

En contraste, el río Cabriel en el área entre Contreras y Cofrentes avanza conformando un flujo más encajado, dando lugar al espacio natural de las Hoces del Cabriel. Por último, el área definida hasta el punto de descarga situado a la salida del Embalse de Tous es la más oriental del tramo medio. Se caracteriza por ser un sistema altamente complejo, con la unión del río Cabriel y Júcar sumado a las aportaciones de algunos tributarios importantes como el río Escalona o Zarra y por albergar un flujo completamente alterado debido a la concatenación embalses hasta la descarga en Tous.

Los ríos Albaida y Magro tienen origen en el interior de la Comunidad Valenciana y la zona fronteriza de la provincia de Cuenca respectivamente (Figura 8). Ambos forman pequeñas cuencas hidrográficas hasta confluir con el río Júcar en el tramo bajo de la cuenca. El primero nace en la Sierra de Benicadell y su caudal depende de los numerosos manantiales de la zona y de los periodos de lluvias intensas mediterráneas. El segundo, por su parte, nace en la sierra de Mira, y presenta un fuerte desnivel en los primeros kilómetros de recorrido hasta llegar a zonas de llanura de la plana Utiel-Requena. Ambos ríos presentan un régimen alterado desde prácticamente su nacimiento principalmente debido a las importantes demandas agrícolas.

El último punto de estudio se encuentra en las inmediaciones de Sueca, en el tramo bajo de la cuenca hidrográfica del Júcar. El relieve se encuentra muy suavizado, con los tramos fluviales que atraviesan terreno llano. Antes de llegar al punto de estudio, se produce la descarga de los tributarios Albaida y Magro en su confluencia con el río Júcar.

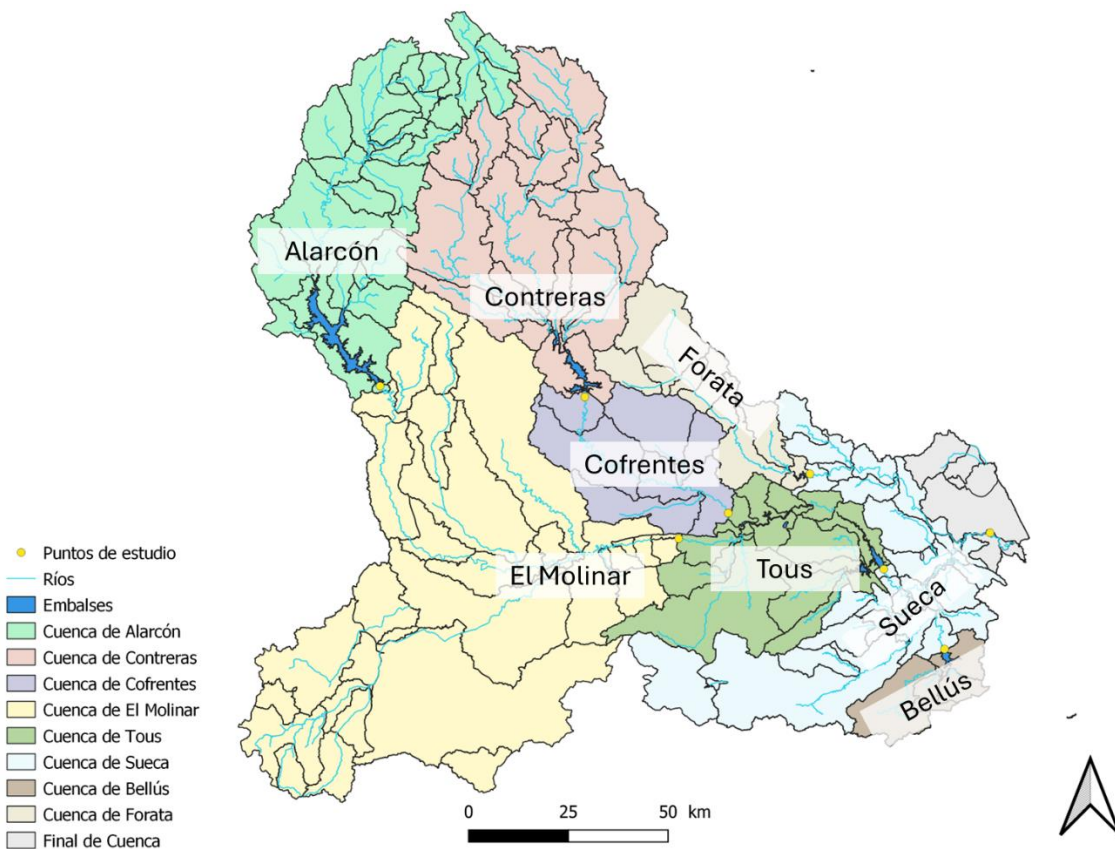


Figura 8. Ubicación de los puntos de estudio de la cuenca del río Júcar

4. Recopilación y análisis de la información

En este apartado se detalla el procedimiento seguido para obtener la información necesaria para el caso de estudio.

4.1. Datos hidrológicos

Los datos hidrológicos se han obtenido principalmente mediante el Sistema de Información del Agua de la CHJ (S.I.A. Júcar), una interfaz de carácter público que proporciona acceso a información gestionada por la CHJ. Otra fuente relevante de datos ha sido Geshidro, una interfaz exclusiva de la CHJ, que ofrece una mayor gama de información hidrológica.

4.1.1. Estaciones de aforo

Mediante la interfaz Sistema de Información del Agua de la CHJ (SIA Júcar) se ha accedido a la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA), donde se han obtenido los

caudales de las estaciones de aforo seleccionadas (Figura 9). Aunque existen numerosas estaciones a lo largo de la DHJ, para el caso de estudio se han utilizado las siguientes:

- Cuenca del Júcar: Alarcón, Cuenca y Pajaroncillo.
- Cuenca del Turia: Arquillo y Zagra.
- Cuenca del Mijares: Arenós.

Los datos se han extraído en unidades de hectómetros cúbicos (hm^3) en escalas diaria y mensual. Se ha definido un periodo de cuarenta años para el estudio, que abarca desde el 1 de octubre de 1980 hasta el 31 de diciembre de 2020.

Hay tres excepciones por la inexistencia de datos en el periodo seleccionado. Las estaciones de Arenós y Cuenca tienen datos desde 1991, mientras que la de Arquillo, desde 2008. En estos casos, se ha optado por utilizar el periodo máximo de datos posible, es decir, el rango 1991-2020 y 2008-2020 respectivamente.

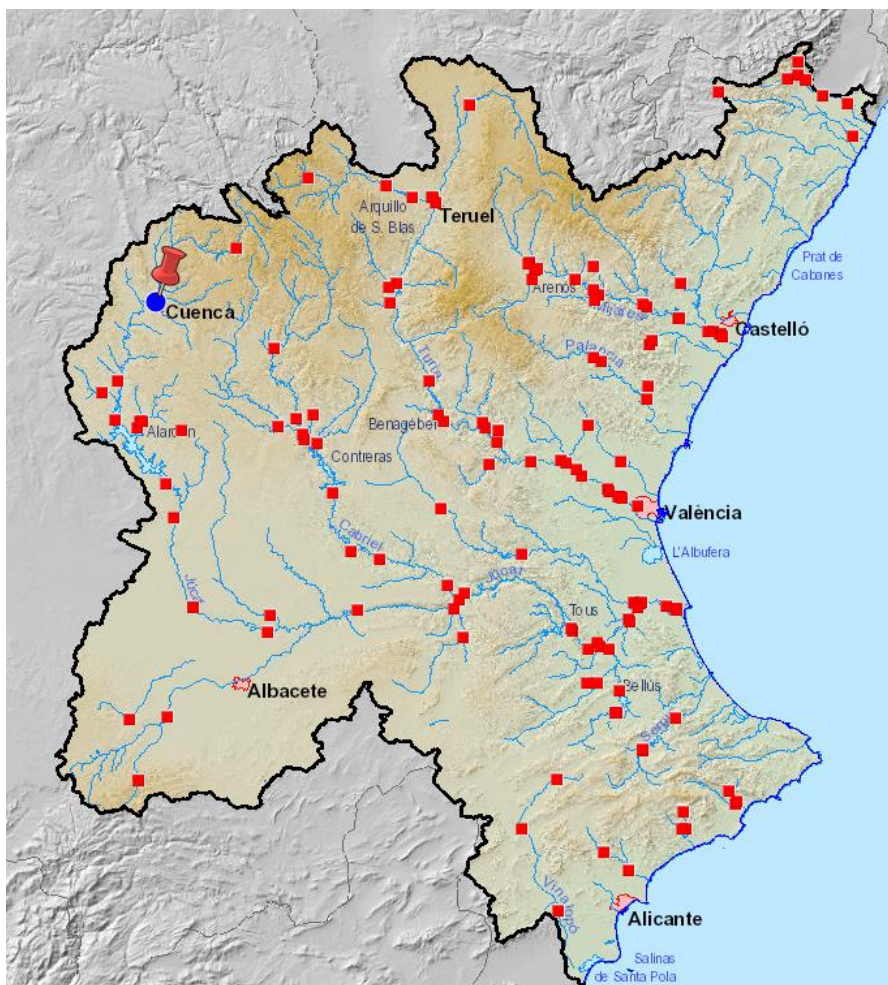


Figura 9. Red oficial de estaciones de aforo (ROEA) desde la plataforma SIA JUCAR. Fuente: SIA Júcar (2023)

4.1.2. Series de caudales con restitución a régimen natural

Las series de caudales en régimen natural son necesarias para calibrar modelos precipitación-escorrentía. En la cuenca del río Júcar, la mayoría de las estaciones de aforo se encuentran en régimen alterado, por lo que, para poder realizar el estudio, se han utilizado series de caudales restituidas a régimen natural. Tanto los datos como la metodología empleada para la obtención de estas series fueron proporcionados por la interfaz Geshidro de la CHJ.

Al igual que en el apartado anterior, los datos se recopilaban en unidades de caudal en hectómetros cúbicos (hm^3). Sin embargo, la escala temporal analizada fue mensual debido a que las series restituidas no cuentan con valores diarios. Además, las series tienen datos hasta diciembre del año 2019.

A continuación, se detallan los puntos seleccionados y la metodología utilizada para la obtención de cada una de las series en régimen natural.

Punto de estudio	Periodo de estudio	Metodología aplicada
Embalse de Alarcón	oct 1980 – may 1995	Suma aforos (Castellar+Belmontejo+Río Albadalejo + Río Gritos)
	jun 1995 – dic 2020	Balance Entradas embalse + Evaporación
Embalse del Molinar	oct 1980 – dic 2020	Diferencia entradas Molinar y entradas Alarcón sumado a los bombeos
Embalse de Contreras	oct 1980 – dic 2020	Balance = Entradas embalse + Evaporación + Filtraciones
Cofrentes	oct 1980 – dic 2020	Serie intermedia Aforo Cofrentes – Entradas Contreras + Retracciones
	oct 1980 – sep 1982	Serie intermedia TurbMillares + VAlarcón + EvapAlarcón + VEmbarcaderos + VContreras + EvapContreras + FiltContreras
	oct 1982 – jul 1983	Serie intermedia

Tous		SalEmbarc + VAlarcón + EvapoAlarcón + VEmbarc + VContreras + EvapoContreras + FiltContreras
	ago 1983 – dic 1987	Serie intermedia TurbMillares+ VAlarcón+EvapoAlarcón+ VEmbar+ VContreras+EvapoContreras+FiltContreras
	ene 1988 – jul 1988	Serie intermedia SalEmbarc + VAlarcón + EvapoAlarcón + VEmbarc + VContreras + EvapoContreras + FiltContreras
	ago 1988 – sep 1988	Serie intermedia TurbMillares + VAlarcón + EvapoAlarcón + VEmbar + VContreras + EvapoContreras + FiltContreras
	oct 1988 – sep 1989	Serie intermedia EA39(Confluencia río Cabriel y Júcar) + VAlarcón + EvapoAlarcón + VContreras + EvapoContreras+FiltContreras- RetFiltContreras+DetMancha
	oct 1989 – sep 1996	Serie intermedia EntNaranjero + VAlarcón + EvapoAlarcón + VCortesII + VContreras + EvapoContreras + FiltContreras - Ret filt Contreras + bombeos Mancha + VLaMuela + VMolinar
	oct 1996 – dic 2020	Serie intermedia EntTous + VAlarcón + EvapoAlarcón + VCortesII + VContreras + EvapoContreras + FiltContreras – RetFiltContreras + DetMancha + VLaMuela + VNaranjero + vMolinar
Embalse de Bellús	oct 1980 – sep 1991	Patrical
	oct 1991 – sep 2008	Coef * Aforo Montaberner
	oct 2008 – dic 2020	Entradas Bellús + Evaporación
Embalse de Forata	oct 1980 – sep 1994	Coef * Patrical
	oct 1994 – dic 2020	Entradas forata + Evaporación

Sueca	oct 1980 – dic 2020	Serie intermedia Tous-Forata-Bellús AforoHuertoMulet-AforoAntella - (AportSubt + RetornoRiegos) – SalBellús - SalForata
--------------	---------------------	---

Tabla 2. Metodología aplicada por la CHJ para el cálculo de restitución a régimen natural en los puntos de estudio.
Fuente: adaptado de información de la CHJ (2021)

4.2. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos se recogen en la base de datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Estos datos provienen de una rejilla denominada ROCIO_IBEB de 5km, donde se interpolan los valores diarios de precipitación acumulada en 24 horas, así como las temperaturas máximas y mínimas, obtenidas de un extenso conjunto de estaciones de la AEMET (Figura 10). Las estaciones seleccionadas están distribuidas geográficamente con el fin de cumplir con los criterios de homogeneidad y completitud (Peral et al., 2017). El periodo de datos disponibles comprende desde enero del año 1951 hasta diciembre del año 2020.

Para generar los campos diarios de precipitación, se realiza un análisis de interpolación estadística que emplea un algoritmo lineal y asigna pesos según la distancia a las estaciones cercanas. Posteriormente, se analizan y ajustan los resultados mediante métodos estadísticos, considerando la variación estacional y el efecto de la geografía, como la influencia de la orografía en la distribución de la precipitación en el área de estudio (Peral et al., 2017).

La metodología para obtener las series climáticas de temperatura difiere, ya que se basa en análisis históricos del modelo de predicción numérica HIRLAM, la cual utiliza AEMET. Estas series históricas se corrigen a partir de los datos observados para conseguir una serie más robusta (Amblar et al., 2020).



Figura 10. Distribución espacial de las observaciones disponibles en el año 1991. Fuente: Peral et al. (2017)

4.3. Tratamiento de los datos

Los datos meteorológicos obtenidos ofrecen información sobre la latitud y longitud del centroide de cada celda de la rejilla. Para obtener los valores climáticos en una subcuenca primero se determina su propio centroide. Luego, se asigna un peso a cada celda adyacente en función de su distancia respecto al centroide de la subcuenca. Este peso indica la influencia que cada celda representa sobre la subcuenca: a mayor área de la celda en contacto con la subcuenca, mayor será su peso. La suma total de los pesos de las celdas contiguas debe ser igual a la unidad.

Una vez calculados los pesos, se multiplican por las series climáticas de cada una de las celdas y se suman para obtener la precipitación y las temperaturas representativas de cada subcuenca. Esta información se utiliza para calcular la ETP utilizando la fórmula de Hargreaves (1985), que se muestra a continuación:

$$ETP = 0.0135 * (T_{med} + 17.78) * R_s$$

Donde:

ETP , Evapotranspiración Potencial diaria en mm/día

T_{med} , Temperatura media en grados Celsius

R_s , Radiación solar incidente en mm/día

La radiación solar incidente, R_s , se obtiene mediante la evaluación de la radiación solar extraterrestre R_0 , es decir, la radiación que alcanzaría el suelo si no existiese la atmósfera (Hargreaves et al. 1985). La fórmula para calcular R_s se detalla a continuación:

$$R_s = R_0 * KT * (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

Donde:

R_s , Radiación solar incidente en mm/día

R_0 , Radiación solar extraterrestre en mm/día

KT , Coeficiente empírico según el uso del suelo, generalmente 0.162 para regiones de interior y 0.19 en costeras

T_{max} y T_{min} , Temperatura máxima y mínima en grados Celsius, respectivamente.

5. Metodología

En este apartado se detallan las metodologías aplicadas en los puntos de estudio piloto con el propósito de obtener series diarias de caudales en régimen natural en el área de estudio.

5.1. Bajada de escala a partir de un modelo precipitación-escorrentía

Esta metodología se centra en la evaluación del recurso hídrico a partir de la modelación precipitación-escorrentía en tramos de río en régimen natural. Para ello se ha utilizado el módulo informático Evaluación de los Recursos Hídricos (EVALHID) (Paredes et al., 2014), el cual desarrolla modelos de precipitación-escorrentía en cuencas subdivididas por subcuencas. Este programa permite analizar el recurso que se produce en dichas áreas mediante la introducción de datos mensuales o diarios de precipitación, evapotranspiración y temperatura (Paredes et al., 2017). EVALHID está integrado en el Sistema de Soporte de Decisión AQUATOOL (Andreu et al., 1996), facilitando así el análisis de la gestión del agua.

Sus principales ventajas son la posibilidad de desarrollar modelos que simulan el comportamiento de cuencas grandes y complejas en la escala temporal que se considere adecuada, siempre que existan datos disponibles. Además, permite trabajar con datos diarios, lo cual es indispensable para el objetivo de este estudio.

El funcionamiento de EVALHID se resume en la figura 11, donde se observan los datos que se introducen en el modelo. Por un lado, se incluyen los datos de precipitación y de ETP de cada una de las subcuencas de estudio mediante un archivo de texto. Por otro lado, se introducen los datos de cada subcuenca, que son la superficie, la presencia de episodios nivales, los parámetros del modelo y las variables de estado.

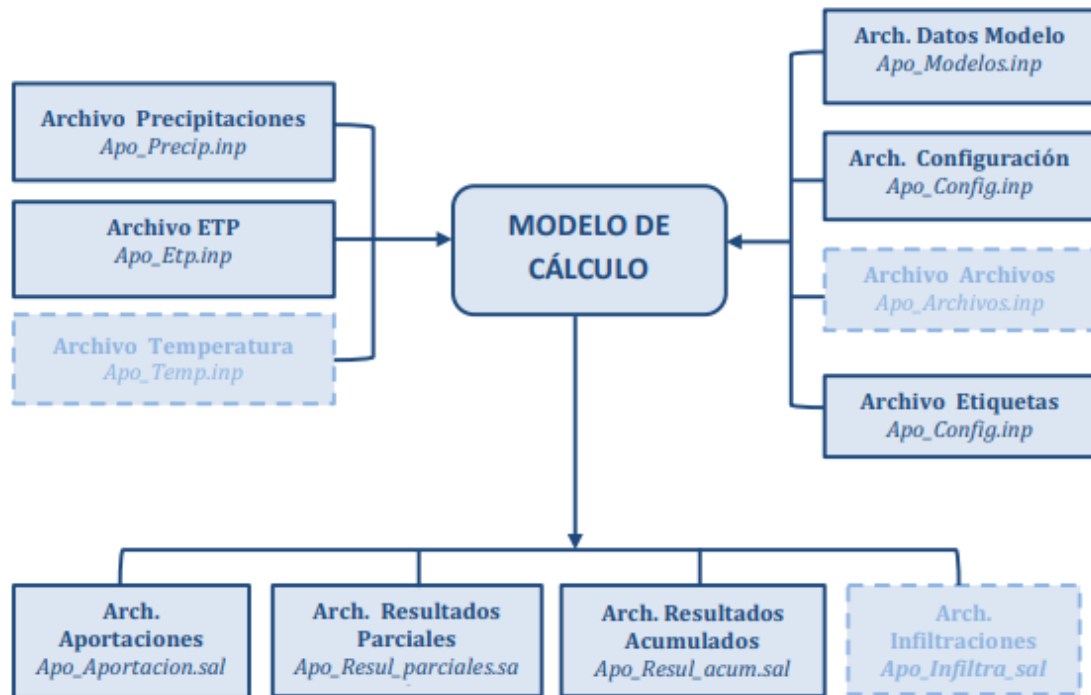


Figura 11. Estructura del módulo EVALHID. Fuente: Paredes et al. (2017)

El modelo EVALHID contiene diferentes modelos precipitación-escorrentía para su aplicación: Témez (Témez, 1977), HBV (Bergström, 1995) y Sacramento (Burnash et al., 1973). La elección del modelo más adecuado debe basarse en su idoneidad para la zona de estudio en cuestión.

Un análisis sobre el río Turia realizado por Casas (2013) revela que el modelo HBV se ajusta mejor al flujo hídrico en el área del presente estudio que el modelo de Témez. Esto es notable ya que el modelo Témez, al ser nacional y ampliamente utilizado, podría haberse considerado como la opción predeterminada. Sin embargo, la complejidad del movimiento del agua en el área de estudio requiere un enfoque diferente que el proporcionado por el modelo Témez, que carece de la capacidad para representar un flujo con características intermedias ente el superficial y el subterráneo. Por lo tanto, se considera que los resultados obtenidos en la cuenca del Turia son extrapolables a otras cuencas de la DHJ, ya que comparten características similares.

5.1.1. Modelo HBV

En sus inicios, el modelo HBV fue desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SHMI) para predecir la escorrentía que llegaba a las centrales hidroeléctricas nórdicas, pero con el tiempo ha evolucionado para adaptarse a diversos ámbitos geográficos, incluyendo el presente estudio. Se trata de un modelo

semidistribuido, donde cada una de las subcuencas generadas se trata como una unidad hidrológica con una superficie determinada, cuyas aportaciones se combinan en un punto central o final.

Los datos requeridos para ejecutar el modelo incluyen series de precipitación y evapotranspiración, con la temperatura como dato opcional. Estos datos pueden introducirse tanto en escala mensual como en diaria para su posterior análisis. El modelo HBV cuenta con ocho parámetros y tres variables de estado que reflejan las condiciones naturales de la cuenca. En caso de utilizarse parámetros diferentes para cada una de las cuencas estudiadas, es necesario tener en cuenta que los valores que se alcanzan en áreas contiguas tienden a ser semejantes.

El modelo se compone de cuatro módulos principales:

- Fusión y acumulación de nieve.
- Precipitación efectiva y humedad del suelo.
- Evapotranspiración.
- Estimación de la escorrentía.

El funcionamiento básico del modelo HBV es el siguiente: la precipitación se procesa como lluvia o nieve según la temperatura, en caso de que se hayan introducido los datos de esta (aunque en este estudio se ha considerado prescindir de la nieve en el proceso de análisis). La parte de la precipitación que contribuye a la humedad del suelo puede generar precipitación efectiva y contribuir a la escorrentía superficial, mientras que el exceso se acumula en la humedad del suelo. En caso de que la cantidad de agua sea suficiente, puede transmitirse a la atmósfera mediante la evaporación (Figura 12).

A partir de la humedad acumulada en el suelo y de las características específicas introducidas, se genera el proceso de infiltración, que permite el movimiento del flujo hacia la celda subsuperficial y, posteriormente, a través de la percolación, hacia la celda subterránea. La suma de los flujos generados en estas tres celdas proporciona la escorrentía total en el punto de desagüe de la cuenca, que consiste en la combinación de la escorrentía directa con la escorrentía proveniente del interflujo (que incluye descarga rápida y descarga lenta) y la escorrentía subterránea, todo ello multiplicado por el área de la cuenca.

El modelo HBV presenta una serie de parámetros libres que permiten definir las características de la cuenca estudiada y modificar los resultados de la simulación del modelo en función de estas características.

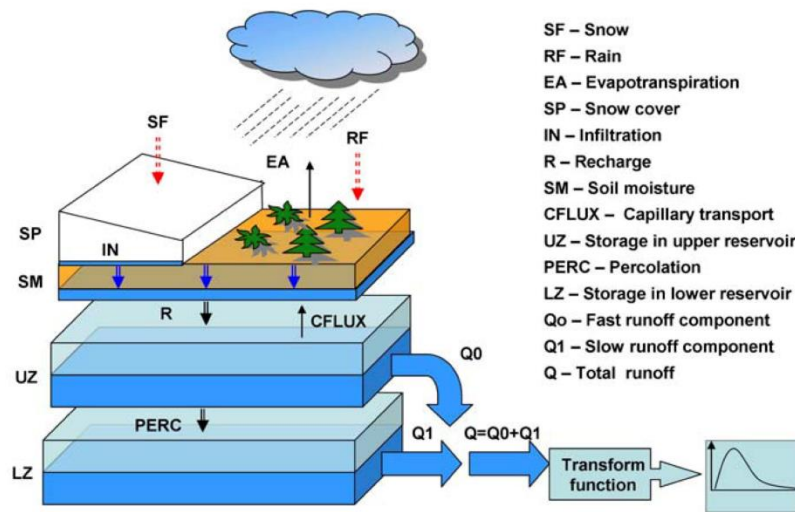


Figura 12. Estructura modelo HBV. Fuente: Shrestha et Solomatine (2008)

-Módulo de humedad del suelo

La precipitación introducida en la cuenca se divide en distintos componentes: en primer lugar, una porción de la lluvia que forma parte del contenido en humedad almacenado en una fina capa del suelo (SM) queda disponible para la evapotranspiración (ETR). En segundo lugar, parte del agua precipitada se infiltra (Inf) hacia la capa subsuperficial del suelo. Este proceso depende del contenido de humedad del suelo (SM) y de los parámetros que rigen las características de la cuenca. La tercera y última componente se trata de la escorrentía directa, que se produce cuando el contenido de humedad del suelo (SM) supera la capacidad de campo (FC) establecida para la cuenca.

Infiltración

El proceso de infiltración se determina en función de la humedad del suelo mediante la siguiente ecuación:

$$Inf_t = \left(\frac{SM_{t-1}}{FC} \right)^\beta * P_t$$

Donde:

- Inf Infiltración efectiva (mm)
- SM Humedad del suelo (mm)
- FC Máxima capacidad almacenamiento del suelo (Capacidad de campo) (mm)
- P Precipitación diaria (mm)
- β Coeficiente de forma (parámetro del modelo)

La variación del coeficiente β modifica el valor del coeficiente de filtración. Dado el cociente entre SM y FC, que indica el déficit de humedad en el suelo, el parámetro β controla la cantidad de agua que contribuye a la escorrentía. A mayor valor de β menor coeficiente de filtración (Figura 13).

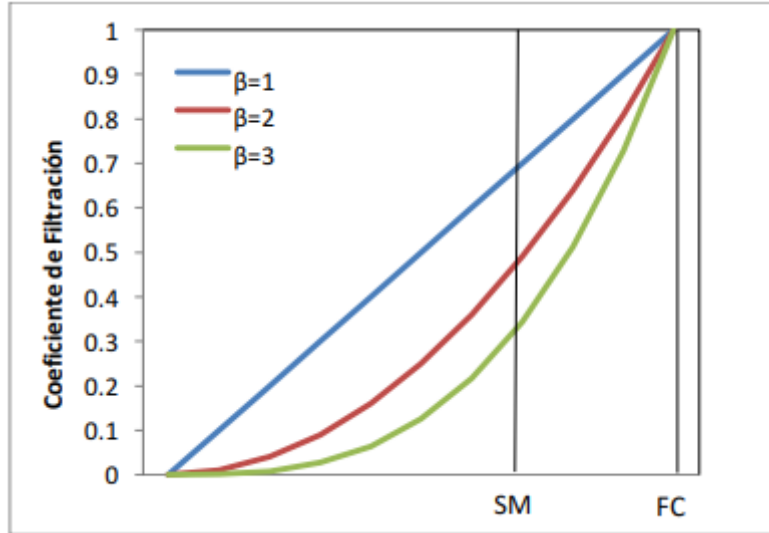


Figura 13. Coeficiente de filtración respecto SM y FC. Fuente: Paredes et al. (2017)

Módulo de evapotranspiración

En el anterior módulo se indicaba que parte de la precipitación se convierte en humedad del suelo y que puede ser evaporada o transpirada. Este fenómeno depende de la ETP y de la relación entre la humedad del suelo y el valor del parámetro de punto de marchitez permanente (PWP), tal y como se observa en las siguientes ecuaciones:

$$ETR_t = ETP_t * \left(\frac{SM_t}{PWP} \right) \quad \text{si } SM_t < PWP$$

$$ETR_t = ETP_t \quad \text{si } SM_t > PWP$$

Si la humedad del suelo en un momento dado es inferior al punto de marchitez, la ETR resultará ser la ETP multiplicada por el cociente entre la humedad del suelo y el punto de marchitez. De lo contrario, ETR y ETP serán iguales.

El punto de marchitez es indicativo de un déficit en la cantidad de humedad en el suelo que limita que se alcance la evapotranspiración máxima, afectando al crecimiento de las plantas. La figura 14 muestra la relación entre el parámetro PWP y la proporción entre ETR y ETP en función del valor de la FC.

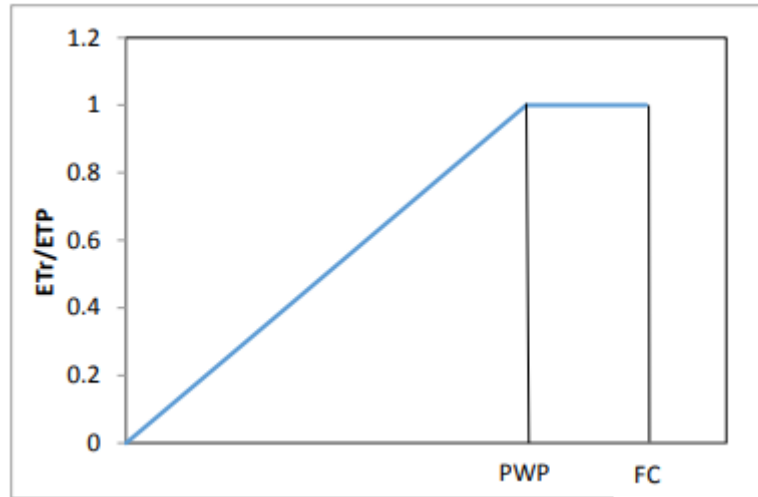


Figura 14. Relación Etr/ETP respecto PWP y FC. Fuente: Paredes et al. (2017)

-Balance de humedad en el suelo

Una vez la precipitación se ha transformado en agua infiltrada en la capa subsuperficial del suelo o en evapotranspiración, la fracción restante se incorpora a la humedad del suelo (SM). La siguiente ecuación resume el balance de humedad en el suelo:

$$SM_t = SM_{t-1} + p_t - ETr_t - Inf_t$$

-Cálculo de la escorrentía directa

Si tras un episodio de precipitación el resultado del balance de humedad en el suelo fuese un valor superior a la FC, el exceso se convertiría en aportación en forma de escorrentía directa (Qs) según el siguiente criterio:

$$Si SM_t > FC \begin{cases} Qs_t = SM_t - FC \\ SM_t = FC \end{cases}$$

-Cálculo de la escorrentía subsuperficial

El tanque subsuperficial recibe aportes por infiltración desde la celda superficial. En él se producen tres tipos de descargas subsuperficiales:

- La descarga rápida (Q0), que tiene lugar cuando el almacenamiento en el suelo (S1) es superior a un umbral determinado por el parámetro Lm. En caso de que se cumpla esta condición, el parámetro K0 regula la proporción de agua, como se aprecia en las fórmulas:

$$Q0_t = K_0(S1_{t-1} - Lm) \quad si \quad S1_{t-1} > Lm$$

$$Q0_t = 0 \quad si \quad S1_{t-1} < Lm$$

- La descarga lenta (Q_1), que se produce siempre que el tanque subsuperficial tenga agua almacenada. Se regula mediante el parámetro K_1 como se muestra a continuación:

$$Q_{1_t} = K_1 * S_{1_{t-1}}$$

- Por último, la descarga por percolación (Q_{perc}), que alimenta el tanque subterráneo mediante el movimiento vertical del agua. El flujo depende del valor del parámetro K_{perc} y al igual que el movimiento anterior, este tiene lugar siempre que el tanque subsuperficial presente agua almacenada.

$$Q_{perc_t} = K_{perc} * S_{1_{t-1}}$$

Una característica importante a tener en cuenta es que la suma de los parámetros K_0 , K_1 K_{perc} debe ser superior a 0 para que el balance dentro del tanque tenga sentido físico, y el coeficiente K_0 debe ser mayor a K_1 .

-Balance agua en la celda subsuperficial

El balance en el tanque subsuperficial queda definido por la siguiente ecuación:

$$S_{1_t} = S_{1_{t-1}} + Inf_t - Q_{0_t} - Q_{1_t} - Q_{perc_t}$$

-Cálculo del balance y la escorrentía subterránea

Las aportaciones al tanque subterráneo provienen de la percolación a partir del agua almacenada en la celda subsuperficial. El funcionamiento es similar al previamente descrito en el tanque superior: las salidas (Q_2) dependen tanto de la cantidad de agua almacenada (S_2) como del parámetro de descarga subterránea K_2 . El parámetro de descarga subterránea tiene que ser menor que el parámetro K_1 mencionado en el apartado anterior, debido a que la descarga subterránea debe ser más lenta que la descarga lenta en la celda subsuperficial.

La ecuación que representa la salida en forma de escorrentía subterránea se muestra de la siguiente manera:

$$Q_{2_t} = K_2 * S_{2_{t-1}}$$

El balance de la celda subterránea se calcula como:

$$S_{2_t} = S_{2_{t-1}} + Q_{perc_t} - Q_{2_t}$$

-Cálculo escorrentía total

A partir de los balances presentados previamente, se pueden determinar las escorrentías generadas en cada uno de los tanques que, en suma, forman la escorrentía total de la subcuenca estudiada, expresada en unidades de milímetros (mm). La aportación total de la cuenca se obtiene mediante la multiplicación de las escorrentías por su superficie para que el resultado final esté en unidades de caudal.

$$Q_t = (Q_{s_t} + Q_{0_t} + Q_{1_t} + Q_{2_t}) * A$$

5.1.2. Proceso de calibración

La calibración es el proceso que se realiza a partir del ajuste de los parámetros y variables de estado del modelo para que las series de datos simulados se asemejen lo máximo posible a las series de datos observados (Cabrera, 2012). En este apartado se indican las premisas adquiridas para este procedimiento.

Función objetivo

El análisis de la semejanza entre la serie de datos simulados y observados se realiza a partir de las funciones objetivo, ecuaciones que otorgan un valor numérico que indica la diferencia entre ambas series. La calibración se fundamenta en la optimización de esta función objetivo, minimizando dentro de lo posible la diferencia entre ambas series.

Para este estudio, se ha elegido la función objetivo de Nash-Sutcliffe (1970). Se trata de una de las funciones más empleadas en estudios hidrológicos debido a su capacidad para valorar el ajuste de la serie simulada en relación con la variabilidad de la observada. Esto permite alcanzar una distribución compleja, representativa de las series hidrológicas reales. En cambio, el uso de este coeficiente puede conllevar errores en la serie calibrada en forma de sobreestimación o subestimación respecto la aforada debido al uso de ecuaciones cuadráticas.

A continuación, se muestra la formulación de la función objetivo Nash-Sutcliffe y los valores de referencia (Tabla 3):

$$Nash = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}(t))^2}$$

Donde:

$Q_{sim}(t)$: Cantidad de agua simulada en hm^3

$Q_{obs}(t)$: Cantidad de agua aforada en hm^3

T : Intervalo de tiempo en unidades diarias o mensuales

n : Número de intervalos de tiempo

$\bar{\cdot}$: Valor medio

NASH	AJUSTE
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

Tabla 3. Valores de referencia del criterio de Nash-Sutcliffe. Fuente: Molnar (2011)

Rango parámetros del modelo

En esta sección se explicará el procedimiento empleado para definir un rango donde deben situarse los parámetros utilizados en el modelo HBV.

El modelo HBV consta de ocho parámetros que describen diferentes procesos hidrológicos, los cuales deben ser calibrados para maximizar la función objetivo. La calibración inicial se realizó dentro del rango teórico que el modelo HBV proporciona para sus parámetros. Sin embargo, estos rangos pueden no ser óptimos para la zona de estudio, ya que están diseñados para representar la realidad de diferentes territorios. Como resultado, algunos parámetros, pese a poder tener una función objetivo elevada, podrían no ser adecuados para la zona de estudio diseñada. Esto se explica al poderse obtener series simuladas similares a partir de diferentes conjuntos de parámetros.

Por ello, se decidió acotar los valores idóneos de los parámetros utilizando información de la bibliografía. Tras el análisis de un mapa de capacidad de almacenamiento elaborado por SIMPA, se observó que el valor límite debería rondar en los 250 mm y no los 650 que indica el rango predeterminado. Dado se trata de un mapa no georreferenciado, se ha considerado realizar esta acotación que suponga que cada subcuenca contenga los parámetros con valores parecidos de modo que presenten sentido geofísico. Esta reducción de rango proporciona resultados con valores de FC y PWP más realistas.

A pesar de esta optimización, es posible que la calibración haya producido valores de parámetros equiprobables, es decir, diferentes combinaciones de parámetros con valores

muy diferentes entre sí para una zona de estudio con unas características físicas semejantes pero que, por probabilidad, se pueden obtener. Para poder abordar esta problemática, se optó por realizar una homogenización del rango de valores de los parámetros a calibrar. Este nuevo rango ha sido el seleccionado para obtener las series simuladas.

	Bibliográficos		SIMPA		Homogenizados	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
β	1	5	1	5	1.8	4.5
FC	50	650	50	250	170	300
PWP	30	650	30	250	90	290
Lmax	0	100	0	100	20	80
K0	0.1	0.5	0.1	0.5	0.2	0.5
K1	0.01	0.4	0.01	0.4	0.035	0.12
K2	0.001	0.3	0.001	0.3	0.001	0.005
Kperc	0.001	1	0.001	1	0.09	0.25

Tabla 4. Visualización de los tres rangos utilizados para la calibración para cada uno de los parámetros

Escala de tiempo de la calibración

La calibración se puede llevar a cabo en paso diario, a partir de la precipitación y ETP introducidos en la base de datos, y compararlos con los datos diarios observados en las estaciones de aforo de los puntos de estudio piloto. Otra opción consiste en acumular los datos diarios y convertirlos a una escala mensual y realizar el mismo proceso mediante la comparación frente a los datos aforados mensuales. Estas son las dos opciones que se pueden plantear al emplear el modelo HBV (Figura 15). Al existir la disponibilidad de series diarias, se priorizó el cálculo del índice de Nash utilizando la escala diaria, resultando también interesante la obtención de resultados en escala mensual

Los periodos de estudio empleados para los puntos de estudio piloto han sido los siguientes:

- Alarcón, Pajaroncillo y Zagra.
 - Calibración: (octubre 1980 – septiembre 2000).
 - Validación: (octubre 2000 – diciembre 2020)
- Arenós.

- Calibración (octubre 1991 – septiembre 2005).
- Validación: (octubre 2005 – diciembre 2020).
- Arquillo.
 - Calibración (mayo 2008 – diciembre 2020).
- Cuenca.
 - Calibración (enero 1981 – septiembre 2000).
 - Validación (octubre 2000 – diciembre 2020).

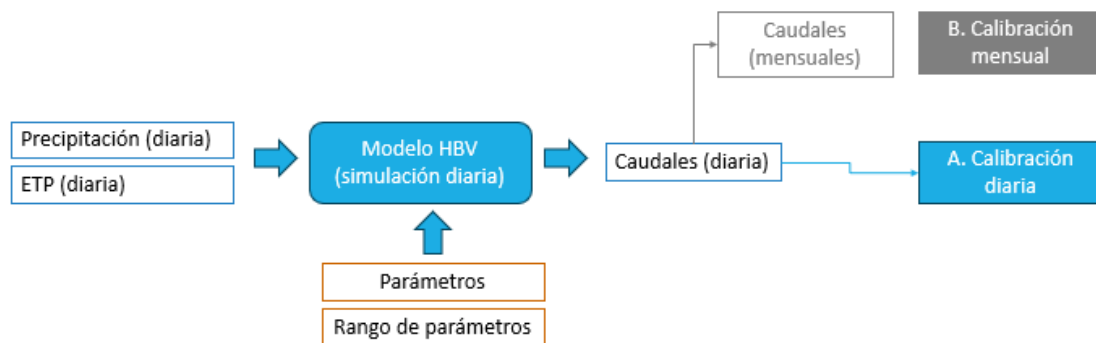


Figura 15. Proceso de calibración.

Configuración espacial

El programa EVALHID requiere la adición de al menos una subcuenca, un punto de aportación común y un nudo. En el presente trabajo se pueden llevar a cabo dos tipos de configuraciones espaciales para representar el sistema que se desea modelizar:

1. Topología desagregada:

En esta configuración se incluyen todas las subcuencas aguas arriba de la estación de aforo analizada añadiendo las características específicas de cada una de ellas. Tal y como se aprecia en la figura (Figura 16), se considera que toda la cuenca presenta los mismos parámetros y variables de estado a añadir al modelo HBV. Este método ofrece una representación detallada y precisa al considerar las características individuales de cada masa de agua.

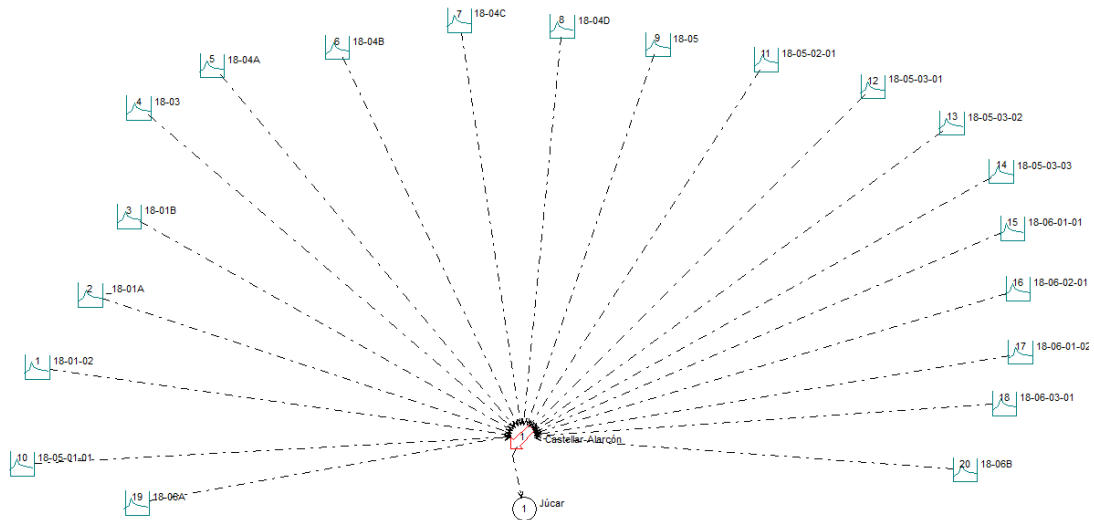


Figura 16. Topología desagregada en el módulo EVALHID

2. Topología agregada:

En este método, se considera una única cuenca agregada que abarca toda la superficie de las subcuencas previamente mencionadas, junto con las precipitaciones y evapotranspiración media. Del mismo modo que en el caso anterior, esta configuración representa una cuenca homogénea en toda su superficie (Figura 17). Esta simplificación se fundamenta en la reducción del número de datos a tratar, lo que facilita el análisis posterior y simplifica el trabajo.

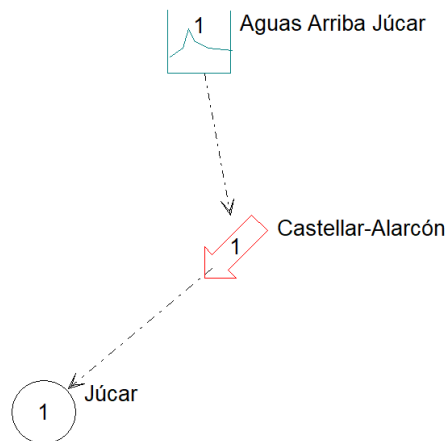


Figura 17. Topología agregada en el módulo EVALHID.

Calibrador de EVALHID

Para la calibración de los modelos generados, se determinó emplear la herramienta externa Calibrador para EVALHID (CalEv) (Paredes, 2018) dentro del Sistema de Soporte a la Decisión AquaTool (Andreu et al., 1996). CalEv tiene como finalidad la

optimización de los parámetros del modelo precipitación-escorrentía utilizado mediante la implementación de algoritmos que permiten realizar una calibración automática (Paredes, 2018). Esta herramienta tiene la capacidad de leer el modelo desarrollado en EVALHID, de manera que ahorra la introducción de una gran cantidad de datos.

Para su labor, CalEv necesita la introducción de un fichero de datos observados que incluya el nombre de la subcuenca correspondiente y la fecha de cada valor registrado. La herramienta permite seleccionar el periodo de estudio para la calibración y validación, pero sólo funciona si el modelo EVALHID ha sido simulado con la misma longitud de serie y en la misma escala de tiempo. Para valorar los resultados de la calibración, CalEv ofrece seis indicadores distintos de la función objetivo, aunque, en este estudio sólo se ha utilizado el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE).

La herramienta permite definir cuáles son los rangos numéricos donde deben situarse cada uno de los parámetros, y elegir, si se requiere, la calibración de todas las subcuencas en conjunto, de un subgrupo o de una sola.

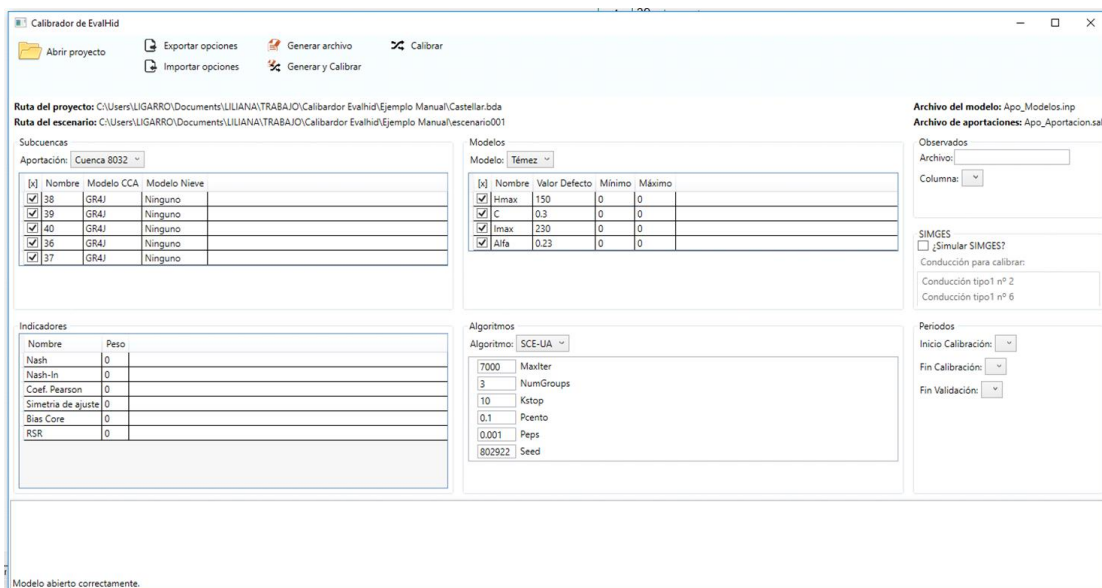


Figura 18. Calibrador de EVALHID

Para poder emplear el calibrador automático se necesita la aplicación de un algoritmo. CalEV ofrece la posibilidad de utilizar dos: el Suffled Complex Evolution (SCE-UA) desarrollado por la Universidad de Arizona y el Hipercubo Latino y Rosenbrock (HLR) desarrollado en la Universitat Politècnica de València (Paredes, 2018).

El algoritmo escogido para la calibración ha sido el SCE-UA (Duan et al. 1992), uno de los más utilizados históricamente para la solución de problemas de optimización. Una de

sus principales características es que trabaja mediante la modificación de una población de soluciones en lugar de una sola solución (Gómez, 2008). Esto permite reducir el error de finalizar la calibración en óptimos locales y aumentar la probabilidad de alcanzar el óptimo global con mayor fiabilidad.

5.2. Bajada de escala a partir de patrones temporales de datos históricos

La segunda metodología analizada en este trabajo se trata de la bajada de escala a partir de datos de caudales directos en los puntos de estudio. Es un procedimiento comúnmente utilizado para la obtención de series diarias a partir de datos históricos de caudales en régimen natural mensuales y diarios. Recientemente, ha sido incorporado como técnica de modelación al sistema de Water Availability System (Castellanos et al., 2022). Generalmente, se utiliza para la generación de patrones que permitan producir series simuladas en régimen diario con la finalidad de tomar decisiones sobre cuencas concretas. A mayor cantidad de datos disponibles para analizar, mejor será la optimización de las series resultantes de la modelación.

A diferencia de la metodología precipitación-escorrentía mostrada en el apartado anterior, esta no tiene en cuenta las características del territorio, sino que se basa en el cálculo estadístico de factores de variación a partir de las series disponibles. Su mayor limitación es la dificultad de ser utilizado en regiones donde los caudales observados no están en régimen natural. Para la obtención de las series se han generado diversos factores de variación que se explican a continuación.

5.2.1 Generación de factores de variación

Un factor de variación es un método estadístico que permite analizar la dispersión en una escala de tiempo determinada de la variable estudiada a partir de diversas metodologías. En el presente estudio se va a utilizar la técnica de desagregación de caudales mensuales en diarios, es decir, subdividir las cantidades mensuales registradas en valores diarios. La disponibilidad de datos en escala diaria y mensual permiten plantear cuatro métodos de desagregación de caudales, los cuales se exponen a continuación:

1. Distribución uniforme dentro del mismo mes

Se trata de la desagregación más sencilla, dividiendo el caudal mensual por el número días que tiene el mes en cuestión. La serie diaria es uniforme dentro del mismo mes y la suma de todos los caudales diarios es equivalente al caudal mensual observado inicialmente.

2. Distribución con interpolación entre el mes anterior, el actual y el siguiente

Esta técnica de desagregación sencilla se utiliza para obtener caudales diarios no uniformes a partir de los datos mensuales observados. El caudal diario a principios, mediados y final de cada mes se define a partir del caudal de los meses anterior, actual y posterior respectivamente. Esta metodología funciona mejor para periodos de caudales bajos que para caudales de crecida. Para su procedimiento se ha utilizado la interpolación Akima (Akima, 1970) que se construye a partir de polinomios de tercer orden utilizando datos de los puntos vecinos, es decir, de los caudales mensuales adyacentes. La ventaja de su uso se basa en que, al necesitar pocos datos, computacionalmente es muy eficiente y tiende a producir curvas suaves y realistas.

3. Distribución uniforme con factores de variación estocásticos

A partir del paso uniforme, se aplican unos factores de variación estocásticos según las distribuciones obtenidas en el paso 1. Esta opción radica en la modelación respecto la serie obtenida inicialmente para obtener una mayor variabilidad y así asemejarse más a una serie diaria real. Su procedimiento es similar al realizado en el paso 4.

4. Distribución interpolada con factores de variación estocásticos

A partir de la serie de interpolación, se aplican unos factores de variación estocásticos según las distribuciones obtenidas en el paso 2. A continuación, se detallan los pasos empleados para obtener la serie desagregada:

4.1) Como se explicó en la serie interpolada, se inicia el proceso a partir de las series mensuales, pasando el valor mensual a diario, ubicándose en la mitad del mes al que pertenece el dato.

4.2) Con la serie mensual anterior y posterior, se rellenan los caudales los días intermedios entre el valor diario situado al medio de cada mes y el mismo valor de los meses anterior y posterior mediante una interpolación del tipo Akima (Akima, 1970).

4.3) Las series diarias son utilizadas para calcular los factores de variación de las series diarias:

$$FV_i = \frac{qd_i}{qm}$$

Donde:

FV_i = Factor de variación de cada día

qd_i = Caudal diario para cada día del mes estudiado

qm_i = Caudal mensual del mes estudiado

4.4) Se obtiene la media, la desviación típica y los valores máximo y mínimo de los factores de variación por cada mes del año, definiéndose patrones de variabilidad.

4.5) Para cada mes del año se generan histogramas y se realizan las pruebas de normalidad. En el presente trabajo se han estudiado mediante subrutinas en lenguaje Python, obteniéndose gráficas de series diarias para cada mes.

4.6) La serie obtenida en el punto 2 es distorsionada utilizando un factor de variación generado a partir de la desviación típica de cada día del mes y las distribuciones normales de cada mes obtenidas en el punto 5. Esta generación se limita entre los valores mínimos y máximos que se han obtenido en el punto 4 para asegurar que los valores generados se mantengan dentro de un rango realista y observado.

4.7) Los resultados iniciales mostraban una oscilación excesiva en los datos. Para mitigar esta variabilidad, se aplicó una serie móvil de orden 5 a la serie de caudales diarios generados. La media móvil es una técnica estadística que consiste en el cálculo del promedio de un conjunto de valores consecutivos en el tiempo, permitiendo suavizar la variabilidad de los datos (Pérez, 2010). En el caso de la serie móvil de orden 5, el primer valor se extrae de la suma de los cinco primeros datos, dividido entre 5. La ventana de valores se desplaza día a día a lo largo de la serie temporal, promediando siempre los cinco valores consecutivos en el tiempo.

4.8) Finalmente, los valores de los caudales diarios deben ajustarse al valor mensual observado de cada mes. Para ello, se realiza un reescalado de los valores diarios de cada mes para que su suma coincida con el caudal mensual observado. De esta manera, se consiguen series diarias con una distribución compleja y natural, fruto de los caudales diarios observados, pero basada en los valores mensuales registrados.

Las primeras metodologías descritas son muy sencillas de implementar y rápidas de calcular. Sin embargo, pueden resultar en series diarias demasiado uniformes y no representar adecuadamente la variabilidad natural de las series de caudales diarios. En cambio, los métodos avanzados, que aplican factores de variación estocásticos, permiten

generar series diarias más ajustadas a los patrones históricos observados y que reflejan las fluctuaciones naturales de los caudales. Al requerirse un estudio lo más detallado y preciso posible, se ha escogido el método cuatro: distribución interpolada con factores de variación estocásticos.

6. Análisis de los métodos de bajada de escala en los casos piloto

En este apartado se analizarán los resultados de las dos metodologías utilizadas para los casos de estudio piloto.

6.1. Aplicación del modelo precipitación-escorrentía

La metodología ha sido aplicada a todas las estaciones de aforo correspondientes a los puntos de estudio piloto. A continuación, se muestran los resultados que mejor reflejan la valoración del método, incluyendo los resultados de la función objetiva y las series obtenidas mediante gráficos comparativos en cada punto de estudio.

6.1.1. Resultados calibración escala diaria

La figura 19 aporta información sobre el valor que ha tomado la función objetivo en la calibración en escala diaria en cada una de las series de las estaciones de aforo. En ella se pueden observar los resultados de cada grupo de rangos escogidos para la calibración. La función objetivo del rango homogeneizado el resultado que se tiene en cuenta para el presente estudio.

		Calibración	Validación			Calibración	Validación
Alarcón	Bibliografía	0.747	0.7	Cuenca	Bibliografía	0.842	0.77
	RANGO-SIMPA	0.747	0.705		RANGO-SIMPA	0.843	0.8
	Homogeneizado	0.751	0.7		Homogeneizado	0.852	0.795
Arenós	Bibliografía	0.614	0.29	Pajaroncillo	Bibliografía	0.656	0.755
	RANGO-SIMPA	0.67	0.356		RANGO-SIMPA	0.74	0.714
	Homogeneizado	0.493	0.48		Homogeneizado	0.76	0.711
Arquillo	Bibliografía	0.816		Zagra	Bibliografía	0.55	0.17
	RANGO-SIMPA	0.817			RANGO-SIMPA	0.578	0.573
	Homogeneizado	0.831			Homogeneizado	0.579	0.17

Figura 19. Función objetivo resultante de la calibración en escala diaria en cada punto de estudio piloto

Si se toma como referencia los criterios establecidos en la figura 8, se puede considerar que las series simuladas en los puntos de estudio de Arquillo, Alarcón, Cuenca y Pajaroncillo presentan unos resultados de calibración diaria muy buenos. Las estaciones

de Arenós y Zagra, en cambio, presentan resultados de calibración satisfactorios. Asimismo, excepto en el caso de la estación de Zagra, la función objetivo de la validación es similar a la obtenida mediante la calibración.

En relación con los valores de Nash obtenidos en cada rango aplicado de calibración, es importante destacar que, excepto en la estación de aforo de Arenós, se ha producido una mejora de la función objetivo a medida que se ha reducido el rango de parámetros disponibles. La homogenización de los rangos de parámetros no ha supuesto una disminución del valor de la función objetivo: en algunos casos, incluso ha mejorado. Esto sugiere que el modelo se vuelve más robusto al utilizar parámetros que utilizan características representables de la zona de estudio, resultando en una calibración, en general, positiva.

Se ha identificado que las series diarias simuladas obtenidas mediante EVALHID y calibradas utilizando la función objetivo Nash tienden a funcionar mejor durante los meses lluviosos que en los meses secos

A modo de ejemplo ilustrativo, se muestran, a continuación, las figuras pertenecientes a un año seco y un año húmedo. Se disponen de más figuras para cada punto de estudio en el anejo 1. Es importante recalcar que cada figura presenta una escala adecuada a sus valores máximos, por lo que la comparación de ajuste entre diferentes años hidrológicos podría inducir a errores de análisis.

Alarcón-El Castellar

En este apartado inicial, se muestra la comparación entre la serie aforada y la serie simulada en el año 1993-1994 (Figura 21) que corresponde al año donde se observan los efectos de la metasequía que afectó a toda España al mismo tiempo que los años húmedos 1987-1988 y 2002-2003 en el punto de estudio de Alarcón. Se aprecia cómo la serie generada por el modelo precipitación-escorrentía sigue una distribución similar a los datos medidos y que permite demostrar que el modelo puede reproducir los patrones de caudal a largo plazo, respaldado por los resultados de la función objetivo (Figura 19).

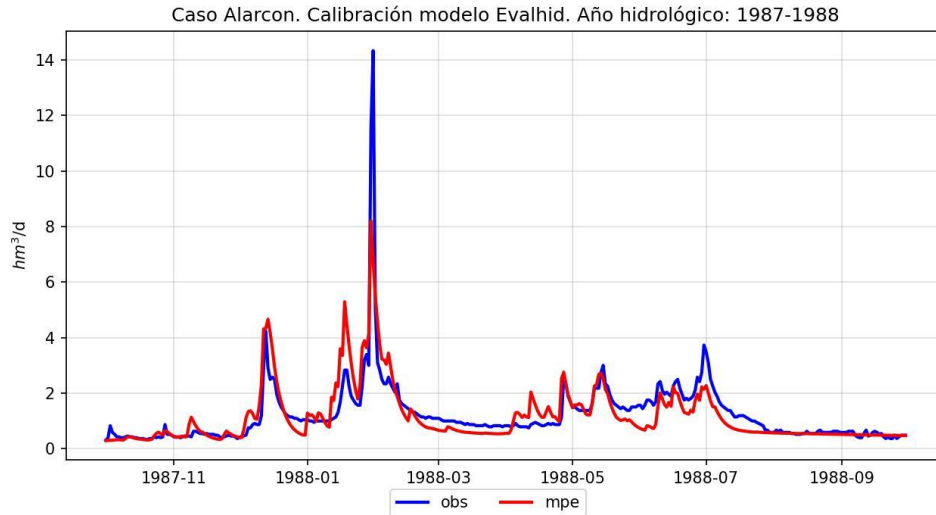


Figura 20. Resultados calibración modelo EVALHID en Alarcón. Año hidrológico 1987-1988

La estación de aforo de Alarcón-Castellar es el punto de mayor descarga de agua en toda el área de estudio, por lo que es crucial que la serie modelada debe sea capaz de simular correctamente los picos de caudal. En los meses húmedos (1987-1988, 2002-2003) que corresponden a las estaciones de invierno e inicios de primavera, el modelo prevé las crecidas en el hidrograma. Sin embargo, el ajuste varía según el pico de caudal: en 1987-1988, el año más húmedo (Figura 20), se infravalora el caudal máximo observado, aunque se ajusta correctamente a los demás máximos locales, a excepción de un episodio de precipitación en julio. Durante los periodos de baja precipitación se produce un peor ajuste, con mayores diferencias entre ambas series. El año hidrológico 2002-2003 (Figura 22) es buena muestra de ello, con descensos de caudal entre crecidas que infravaloran el caudal mínimo y con un mal ajuste durante el periodo de caudal base que se produce a partir del mes de junio, donde la serie generada se mantiene cercana a los datos aforados, pero muestra su incapacidad de simular la variabilidad que adquieren los datos aforados en los periodos de baja precipitación.

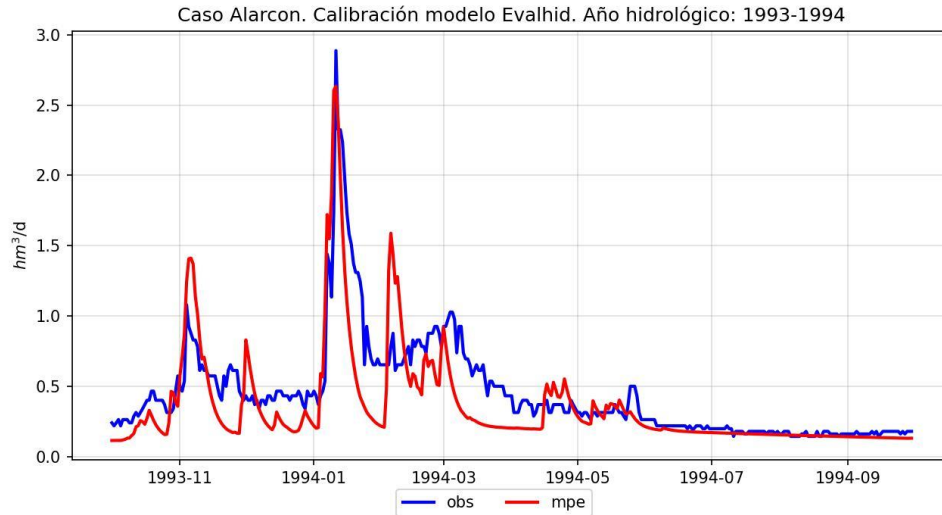


Figura 21. Resultados calibración modelo EVALHID en Alarcón. Año hidrológico 1993-1994

En el año seco (1993-1994), donde el valor máximo diario es de 3 hm^3 , se alcanza el dato de máximo caudal con facilidad, pero se inclina por infravalorar ligeramente los caudales de bajada y sobrevalorar los de crecida (Figura 21). De nuevo, durante el periodo de ausencia de precipitaciones, el caudal modelado tiende a formar una línea constante, tendiendo a subestimar la variabilidad de los datos aforados. Cabe destacar que se producen picos de caudal sin que ello sea reflejado en la serie de datos observados, lo cual es más evidente en años de menor producción. La mayor diferencia de este año respecto los otros estudiados es que se parte de un caudal base menor debido a las bajas precipitaciones de los años anteriores y que ello afecta a la calibración.

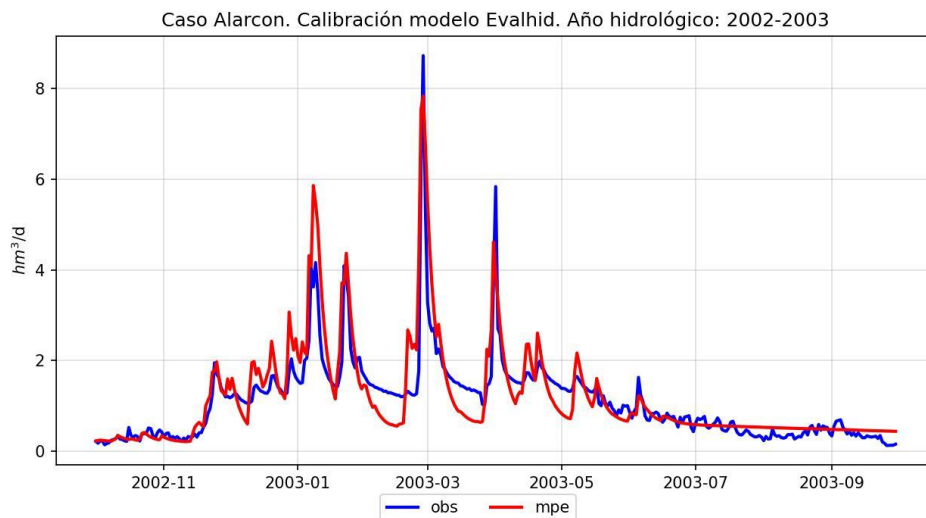


Figura 22. Resultados calibración modelo EVALHID en Alarcón. Año hidrológico 2002-2003

Los resultados del año 2002-2003 reflejan también una parte importante del estudio; se logra que el modelo presente capacidad para reproducir tanto picos de caudal como el caudal base en periodos fuera de la calibración (Figura 22). A pesar de algunas discrepancias, el modelo muestra capacidad para simular la tendencia general y eventos puntuales de crecidas.

Cuenca

A continuación, se muestran los resultados de la calibración en Cuenca utilizando los mismos años que se han empleado para el estudio de Alarcón, situado aguas abajo.

El primer análisis que se puede extraer de las gráficas es que el modelo genera una menor cantidad de caudal que en el punto de Alarcón, lo cual es consistente con la ubicación de cada punto en la cuenca.

La serie generada por el modelo HBV consigue un ajuste muy positivo durante los años húmedos (Figura 23), consiguiendo que durante varios días las series representadas se superpongan. Durante el periodo de caudal base de inicios del año hidrológico de 1987, se alcanza un alto grado de variabilidad que emula la descarga medida, que mejora respecto el anterior punto de estudio. Destaca la simulación de los picos de caudales en ambos años, especialmente el ajuste que se realiza en febrero del año 1988, cuando el modelo captura una crecida diaria que es más del doble del caudal registrado en cualquier otro día.

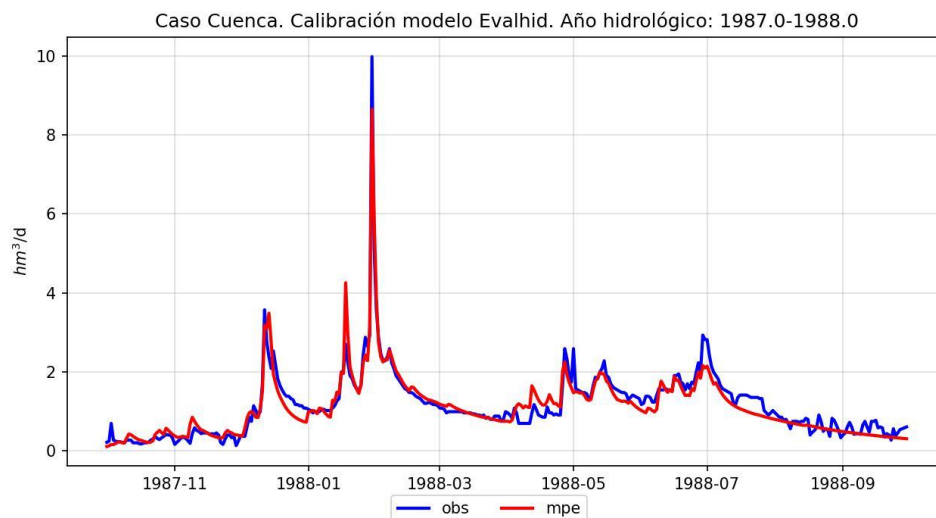


Figura 23. Resultados calibración modelo EVALHID en Cuenca. Año hidrológico: 1987-1988

De la misma manera que en Alarcón, el modelo presenta dificultades al simular el periodo de verano con ausencia de precipitaciones posterior a episodios de importantes descargas, especialmente en el año hidrológico 2002, donde se produce un gran desajuste de los caudales (Figura 24). De nuevo, la validación en el sistema del Júcar se ve conseguida gracias a los resultados mostrados en el año 2002-2003, con un ajuste muy positivo. En el año seco estudiado se produce también un desajuste tanto en las bajadas de caudal como en el caudal base situado a final del año hidrológico. El modelo tiende a sobrevalorar el recurso formado y sólo consigue un ajuste muy bueno en el máximo local.

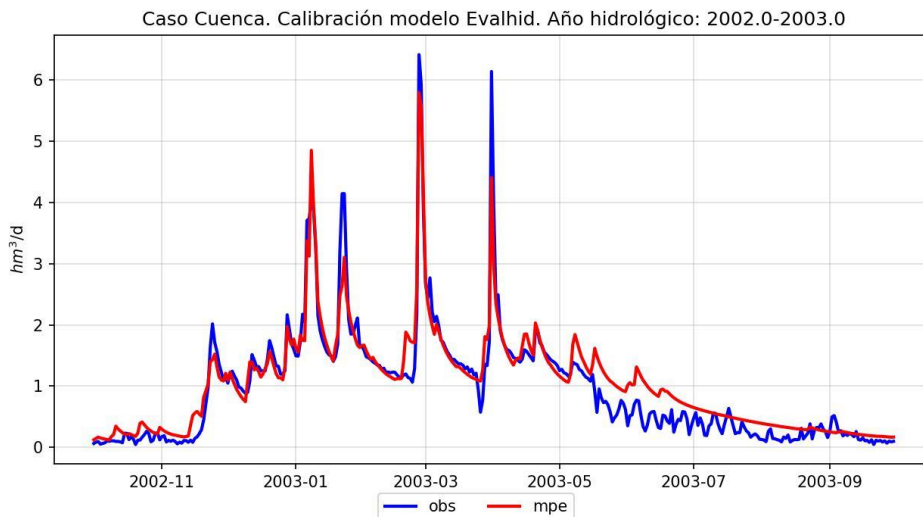


Figura 24. Resultados calibración modelo EVALHID en Cuenca. Año hidrológico: 2002-2003

Durante los años secos, la serie EVALHID logra un mejor ajuste respecto la serie de caudales restituidos en comparación a Alarcón. El modelo capta de manera correcta la tendencia de descenso de caudal a partir del inicio de la primavera. Pese a ello, tampoco se puede concluir que logre una buena reproducción, obteniéndose valores, especialmente en picos de crecida, que no coinciden ni cuantitativa ni temporalmente (Figura 25).

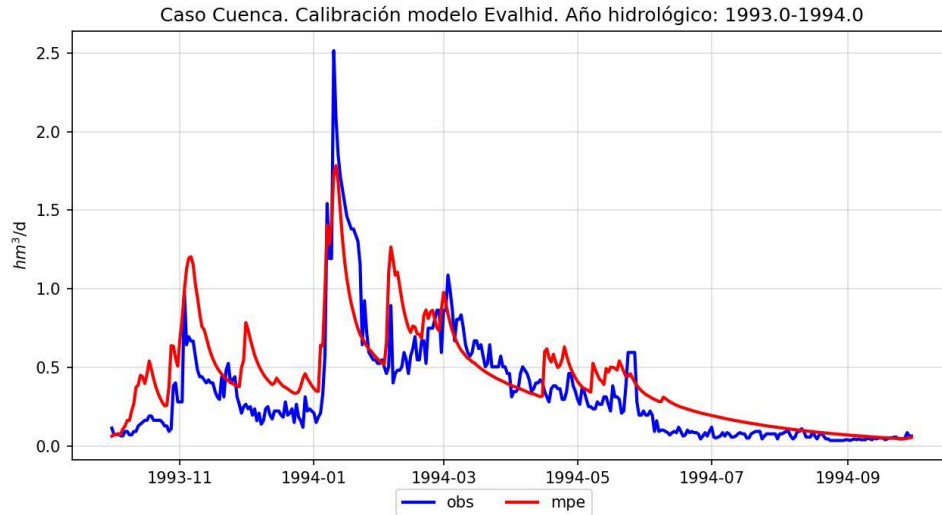


Figura 25. Resultados calibración modelo EVALHID en Cuenca. Año hidrológico: 1993-1994

El modelo EVALHID presenta unos resultados más positivos en Cuenca y esto se puede deber seguramente a la menor cantidad de subcuencas estudiadas que facilitan la calibración y a que la estación Alarcón está sujeta a una mayor incertidumbre al encontrarse aguas abajo de la ciudad de Cuenca. De la misma manera que en Alarcón, se puede deducir que el empleo de la función objetivo Nash-Sutcliffe (1970) provoca que, en caudales bajos o muy bajos, especialmente en años con baja precipitación, el modelo valore más ajustarse a un episodio de crecida que a la base. Aun así, ambos puntos de estudio han resultado un éxito para la validación del modelo.

Pajaroncillo

A continuación, se estudiarán los resultados del modelo EVALHID obtenidos en Pajaroncillo, única estación de aforo estudiada en el río Cabriel. En este caso también se muestran los mismos años húmedo (1987-1988) y seco (1993-1994) para representar los resultados del modelo sumado al año (2017-2018) para analizar su validación.

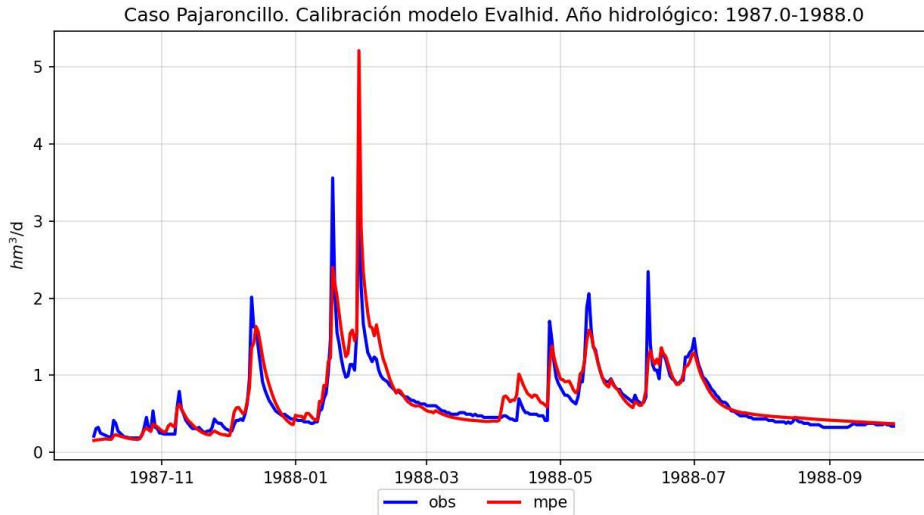


Figura 26. Resultados calibración modelo EVALHID en Pajaroncillo. Año hidrológico: 1987-1988

El primer dato que resalta una vez observados los resultados es la diferencia de caudal que se genera en la cuenca del Júcar en comparación con la cuenca del Cabriel, la segunda cuenca que más recurso produce de la demarcación.

El ajuste que se consigue en el año húmedo es muy positivo. Predice correctamente todos los días en que se producen los picos de caudal y también produce un buen ajuste durante los días de descenso de caudal (Figura 26). Sin embargo, se observa una infravaloración en la mayoría de los máximos de caudal y una sobrevaloración del pico global. En periodos sin precipitaciones se produce un cambio en el comportamiento de la serie modelada, con un ajuste considerablemente mejor, llegando a superponerse ambas series. Durante la estación de verano, el modelo reproduce adecuadamente la baja variabilidad del caudal.

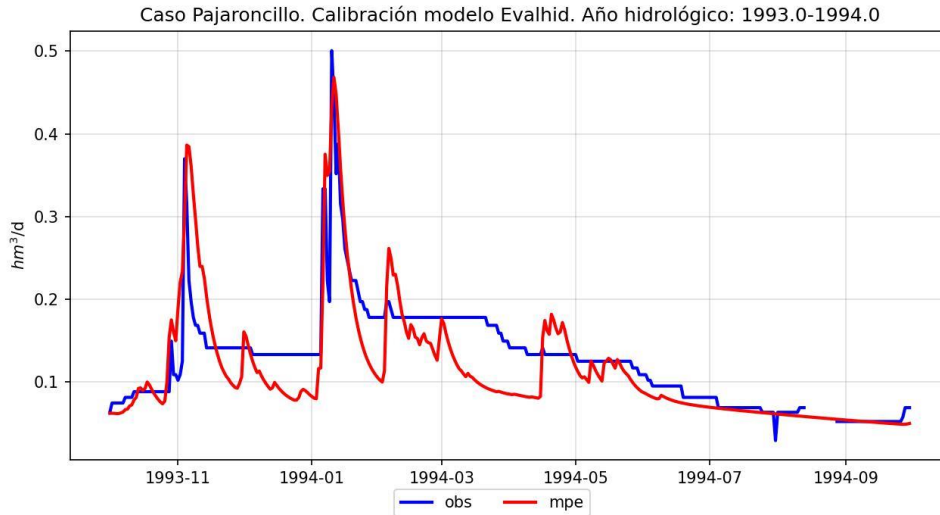


Figura 27. Resultados calibración modelo EVALHID en Pajaroncillo. Año hidrológico: 1993-1994

En el año seco no se produce prácticamente recurso, con máximos diarios de 0.5 hm^3 . El modelo sólo se ajusta de manera correcta a los dos picos de caudal pertenecientes a los meses de noviembre y de enero (Figura 27). Durante los meses de invierno a verano muestra un desajuste importante marcado por la ausencia de variación diaria en la serie aforada sin ser el modelo capaz de adquirir dicha secuencia. Se observa nuevamente un buen ajuste entre las series modelada y observada durante los meses de verano.

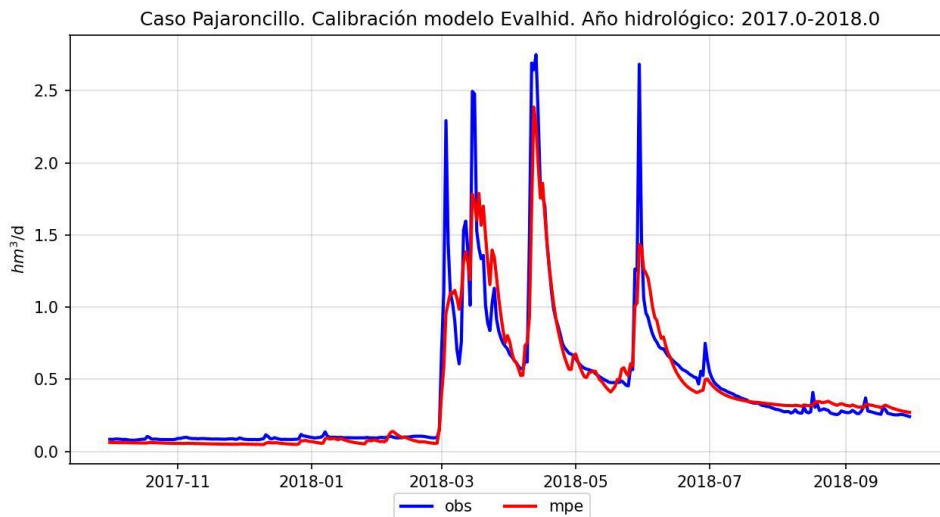


Figura 28. Resultados calibración modelo EVALHID en Pajaroncillo. Año hidrológico: 2017-2018

La validación vuelve a mostrar resultados satisfactorios, consiguiendo un gran ajuste en el año hidrológico 2017, aunque de nuevo destaca la infravaloración de los picos de caudal. El modelo se muestra robusto al poder simular correctamente un periodo que intercala ausencia de precipitaciones con precipitaciones muy puntuales (Figura 28). Las bajadas de caudal amortiguadas por la descarga del recurso subterráneo originado en los episodios de lluvias mencionados son también bien representadas por el modelo EVALHID.

En definitiva, el modelo en Pajaroncillo se muestra robusto durante los años húmedos mientras que durante los años secos presenta problemas para reproducir la poca variabilidad observada, aunque ajusta bien los picos de caudales. De nuevo, se puede considerar que la calibración a partir de la función objetivo Nash-Sutcliffe favorece estas características.

Los resultados positivos en la serie de Pajaroncillo se pueden analizar a partir de dos factores: La cercanía al nacimiento del río Cabriel y el área de estudio relativamente pequeña contribuye a un alto grado de régimen natural y la presencia de numerosos periodos con cambios bruscos en los caudales complica el proceso de calibración, pero el modelo logra reproducir correctamente las tendencias y obtener resultados satisfactorios.

Arenós

Se muestran los resultados del modelo EVALHID en comparación con los datos observados en el punto de estudio de Arenós, situado en el río Mijares. Para su estudio se han utilizado datos de un año seco (1993-1994), un año húmedo (2002-2003) y un año perteneciente al periodo de validación (2017-2018).

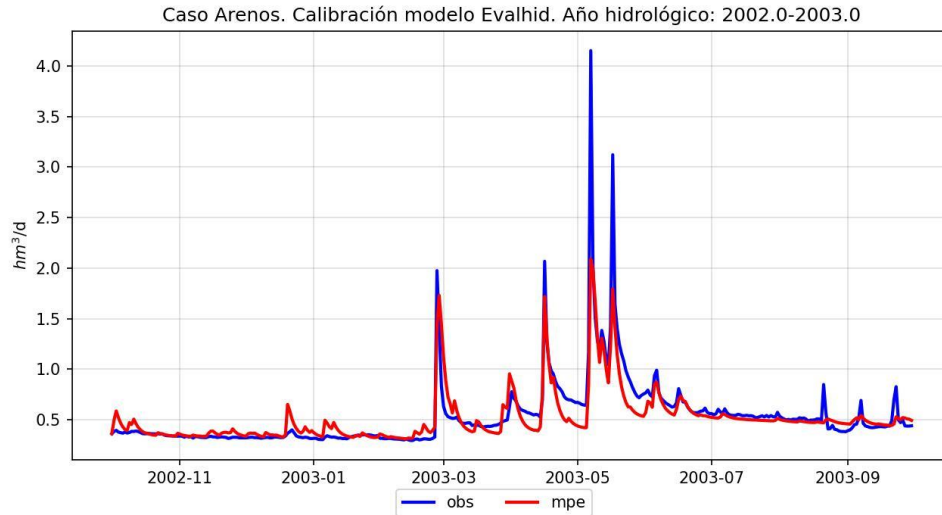


Figura 29. Resultados calibración modelo EVALHID en Arenós. Año hidrológico: 2002-2003

El punto de estudio de Arenós es el que peor función objetivo resultante obtiene tras la calibración y ello se refleja en las series obtenidas. En el análisis se evidencia que es el río menos caudaloso de los cuatro estudiados en este apartado al mismo tiempo que presenta el flujo más dependiente de las aportaciones subterráneas.

Pese al mal ajuste general, los años húmedos muestran un adecuado comportamiento de la serie modelada al simular los picos de crecida más importantes, aunque con una infravaloración del caudal. Asimismo, durante los meses de primavera el modelo presenta una mayor facilidad para captar correctamente las crecidas que las bajadas de caudal, sin conseguir simular las aportaciones subterráneas que permiten suavizar los descensos mencionados (Figura 29). Respecto a los periodos de estabilidad de invierno y verano, aunque la serie EVALHID está cerca en todo momento de la serie de caudales aforados, existen ciertas diferencias significativas.

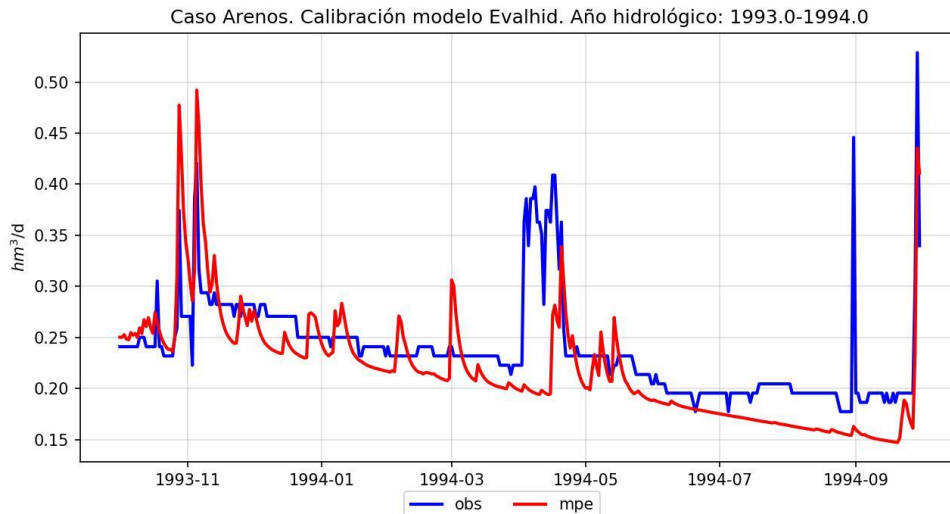


Figura 30. Resultados calibración modelo EVALHID en Arenós. Año hidrológico: 1993-1994

La situación del año seco es diferente, con un ajuste deficiente durante todo 1993-1994. El modelo genera numerosos picos de crecida que no se ven reflejados en la serie observada, y sólo es capaz de adecuarse ligeramente a la serie observada en cuatro de ellos (Figura 30). Los periodos de caudal base de la serie modelada tampoco siguen la misma tendencia que la observada. Se debe recalcar que el gráfico presenta un caudal máximo de $0.5 \text{ hm}^3/\text{día}$, por lo que se ha de tener en cuenta que los errores son pequeños pero significativos.

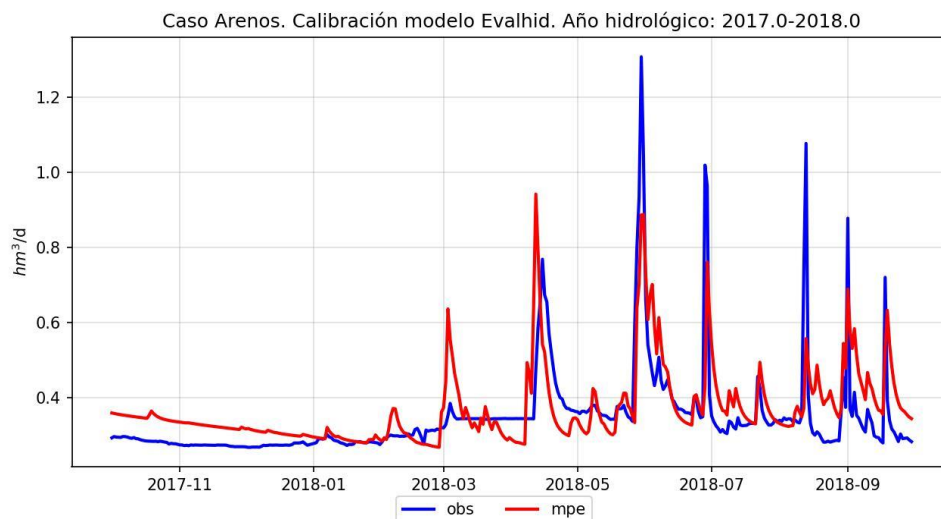


Figura 31. Resultados calibración modelo EVALHID en Arenós. Año hidrológico: 2017-2018

Por último, si se analiza el año escogido para la validación del modelo, se observa que se trata de un año de precipitación media. El modelo se adecua temporalmente a los picos de crecida, con una ligera infravaloración, pero no llega a alcanzar una variabilidad adecuada durante los periodos con ausencia de lluvia para replicar el caudal en la mayoría del año (Figura 31).

La dificultad que se ha podido observar en la calibración en Arenós puede ser debido a la importancia de las aportaciones subterráneas en el sistema sumado a la existencia de riegos por bombeo para cultivos en la llanura del Mijares, aguas arriba del embalse de Arenós. A ello se le debe sumar series de datos observados que no presentan variabilidad (Figura 30) y que dificultan la calibración.

El análisis del modelo precipitación-escorrentía permite analizar qué porcentaje de la precipitación consigue descargar en cauce en forma de escorrentía superficial o subterránea y cual sale del sistema en forma de evapotranspiración. En la DHJ destaca la importancia de la escorrentía subterránea en todas las cuencas de estudio, siendo la cuenca del río Mijares la más dependiente con diferencia de las aportaciones subterráneas.

Arquillo

Los últimos puntos de estudio forman parte de la cuenca del río Turia. En primer lugar, se estudiará el punto de estudio de Arquillo, situado en la cabecera del río. Debido a la falta de datos históricos, no se ha podido establecer un periodo de validación, por lo que el análisis se enfoca en un año húmedo y un año seco representativos a partir del 2008. El estudio debe tener en cuenta la escala de datos con la que se trabaja.

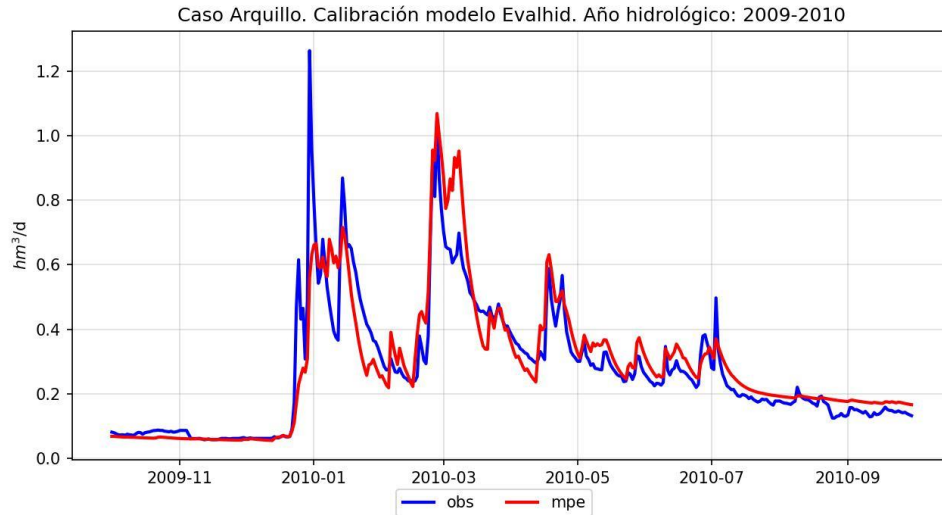


Figura 32. Resultados calibración modelo EVALHID en el punto de estudio de Arquillo. Año hidrológico: 2009-2010

El año húmedo es indicativo de los buenos resultados de calibración que el modelo obtiene en el punto de estudio de Arquillo. Aunque el caudal es bajo, el modelo consigue prever la mayoría de los picos de crecida, con excepción del máximo. También se debe destacar que, durante los periodos de descenso del caudal, el modelo logra una variabilidad que permite un gran ajuste respecto la serie de caudales observados y que dota de robustez al modelo (Figura 32). En cambio, la serie EVALHID, durante los meses sin precipitación, adquiere una tendencia plana que se aleja ligeramente de la variabilidad de los caudales naturales observados.

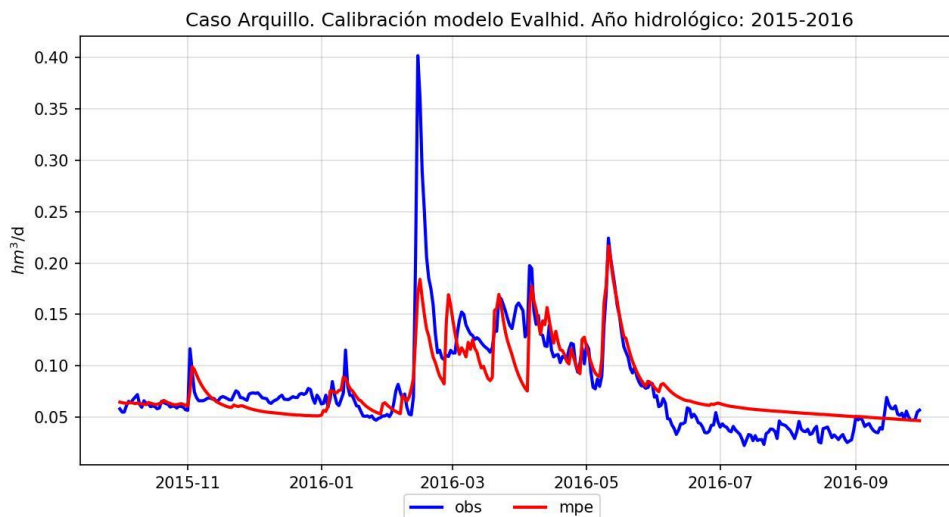


Figura 33. Resultados calibración modelo EVALHID en el punto de estudio de Arquillo. Año hidrológico: 2015-2016

El análisis del año seco es similar, con dos periodos de caudal base durante las estaciones de verano y otoño y un periodo de precipitaciones alternadas durante los meses restantes. De nuevo, el modelo capta correctamente la mayoría de los picos de caudal excepto el principal, el cual infravalora notoriamente (Figura 33). También se consigue que las fluctuaciones de la serie EVALHID durante los meses de precipitaciones tengan un buen ajuste, con algunas superposiciones entre ambas series, especialmente notables en el mes de abril. En cuanto a los periodos con ausencia de lluvias, se observa una diferencia notable entre ambos. El primero muestra un ajuste positivo que permite prever pequeñas crecidas en el caudal y descensos bruscos, teniendo en cuenta el bajo caudal. El segundo periodo se caracteriza por la línea constante que simula el modelo, sin variabilidad.

El análisis en la serie de Arquillo destaca la capacidad del modelo EVALHID de obtener buenas predicciones de caudales a pesar de la poca cantidad de recurso. Al igual que en las otras series, el modelo funciona mejor en años húmedos y presenta mayores limitaciones durante los periodos secos dentro de años secos.

Zagra

En este apartado se estudian los resultados de calibración en el punto de estudio de Zagra. Para su análisis se ha decidido escoger tres fechas de estudio del periodo de calibración que representen un año húmedo, uno seco y un año de la serie de validación que coincide con uno de los que se han analizado en el punto de estudio de Arquillo.

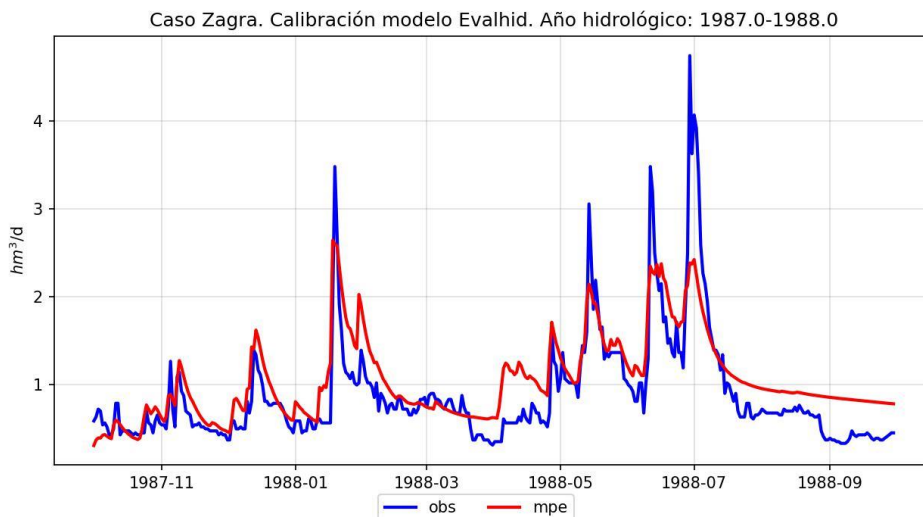


Figura 34. Resultados calibración serie EVALHID en Zagra. Año hidrológico: 1987-1988

Los resultados obtenidos en el punto de estudio de Zagra son los que peor función objetiva han obtenido teniendo en cuenta tanto los periodos de calibración como validación.

Durante el año hidrológico 1987-1988 se produce un ajuste aceptable donde destaca la previsión de los picos de caudal (Figura 34). Aun así, se observa una tendencia a subestimar los eventos más importantes y un ligero retraso temporal durante el mes de diciembre. La serie estudiada presenta un caudal muy variable fruto de lluvias intermitentes facilitando la adecuación inicial de la serie EVALHID. Los periodos con ausencia de lluvias, sin embargo, muestran la dificultad que presenta la modelización del punto de estudio, con series simuladas que se alejan de la serie de caudales observados durante dos periodos: de febrero a mayo y de julio a septiembre.

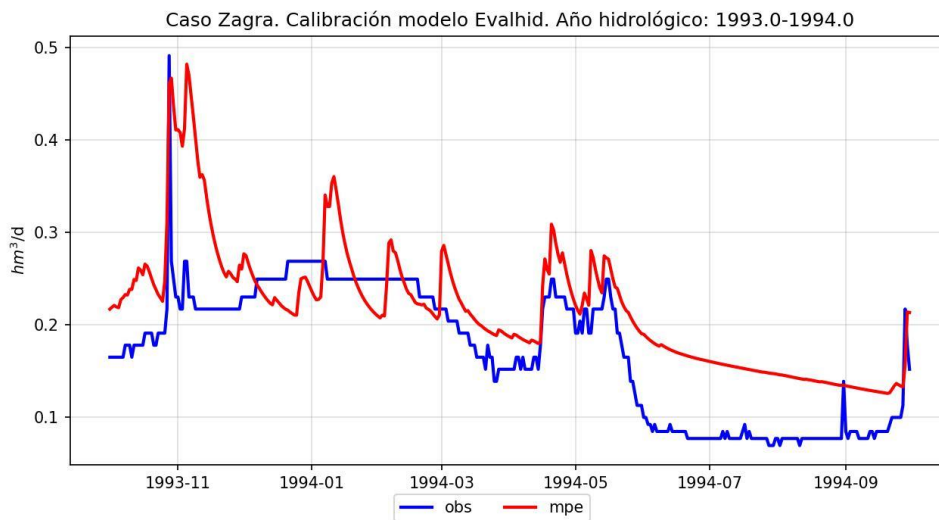


Figura 35. Resultados calibración serie EVALHID en Zagra. Año hidrológico: 1993-1994

Por otro lado, los resultados durante el año seco son deficientes, con picos de caudal mal representados, excepto el del mes de noviembre, y una discrepancia creciente entre los valores simulados y observados a medida que avanza el año (Figura 35). Los días de invierno y primavera se consigue que la serie tome valores simulen ligeramente su tendencia. A partir de verano, la serie se desajusta completamente.

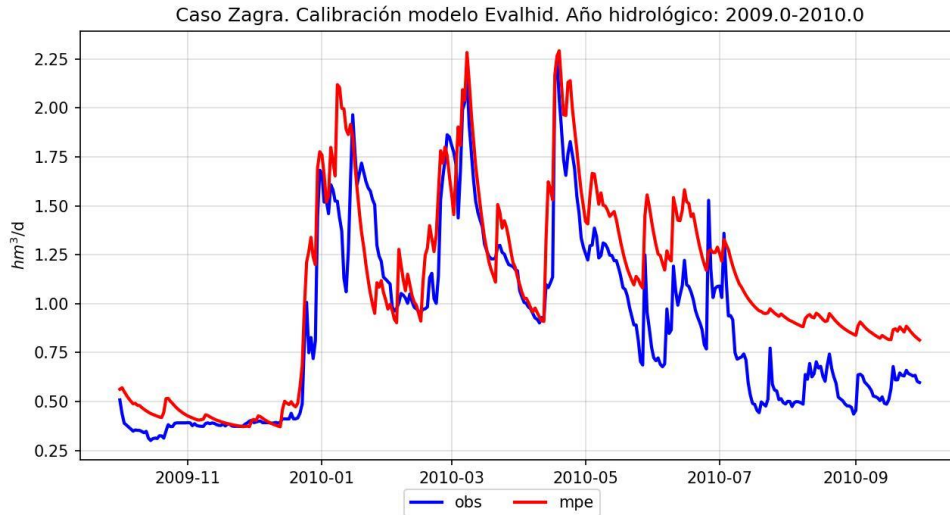


Figura 36. Resultados validación serie EVALHID en Zagra. Año hidrológico: 2009-2010

La última figura permite evidenciar las diferencias frente los resultados en Arquillo, situado en la cabecera del sistema (Figura 36). La estación de aforo de Zagra registra una mayor cantidad de recurso durante todos los días de estudio al recoger las aguas de diferentes tributarios aguas abajo. La gráfica muestra de nuevo un ajuste aceptable en algunos picos de crecidas, pero, como se evidencia, la calibración sufre un empeoramiento que destaca en los periodos sin lluvia. Esta variación en la calibración dentro de una misma cuenca de estudio sugiere que factores como los riegos alrededor de la ciudad de Teruel y la demanda urbana destinada a las viviendas del sur de Aragón puedan tener efectos en la cantidad de caudal registrado en Zagra, así como la presencia del embalse de Arquillo, lo que afecta a la calibración del modelo hidrológico.

6.1.2. Influencia de la escala temporal

La escala temporal que se utiliza en el modelo precipitación-escorrentía influye de manera significativa en la interpretación de los resultados. Para determinar la manera más eficiente de aplicar la metodología, se realizaron pruebas comparativas entre calibraciones diarias y mensuales en los puntos de estudio.

El análisis de la influencia de la escala temporal tiene como objetivo evaluar el impacto respecto la serie simulada diaria que los parámetros hayan sido obtenidos mediante calibración en escala diaria o mediante la acumulación mensual respecto la serie de caudales mensuales observados. Este análisis no sólo busca realizar un balance entre la precisión de simulación y la eficiencia computacional, sino también conocer si la

metodología se puede aplicar en puntos de estudio cuyas series en régimen natural se encuentren únicamente en una escala de tiempo mensual.

Inicialmente se realizó la comparación en cada uno de los puntos de estudio entre ambos métodos para obtener series de caudales diarios. Por una parte, se obtuvo la función objetivo fruto de la inclusión de los parámetros mensuales y se contrastó con la obtenida a partir de los parámetros diarios. Por otra parte, se realizaron comparaciones gráficas entre las series diarias resultantes y las series de caudales observados para poder observar las diferencias y las tendencias.

	CALIBRACIÓN MENSUAL		CALIBRACIÓN DIARIO	
	Nash diario		Nash diario	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
Alarcón	0.71	0.69	0.7505	0.6996
Arenós	0.393	0.476	0.493	0.48
Arquillo	0.827		0.817	
Cuenca	0.797	0.742	0.8524	0.7945
Pajaroncillo	0.72	0.18	0.76	0.711
Zagra	0.558	0.162	0.5786	0.07

Figura 37. Función objetivo resultante de la comparación entre series simuladas diarias y aforadas. A la izquierda se muestran los resultados de la simulación mediante los parámetros obtenidos de la calibración en escala mensual. A la derecha ídem, con calibración en escala diaria

La comparación entre las series simuladas generadas mediante los parámetros obtenidos de las calibraciones en distinta escala temporal revela que no se produce una mejora significativa en la calibración al emplear los parámetros obtenidos de la calibración en escala diaria respecto la mensual (Figura 37). La diferencia más notable se observa en la estación de Pajaroncillo durante el periodo de validación, pero se ha considerado insuficiente para demostrar una ventaja significativa respecto la aplicación de los parámetros de escala mensual.

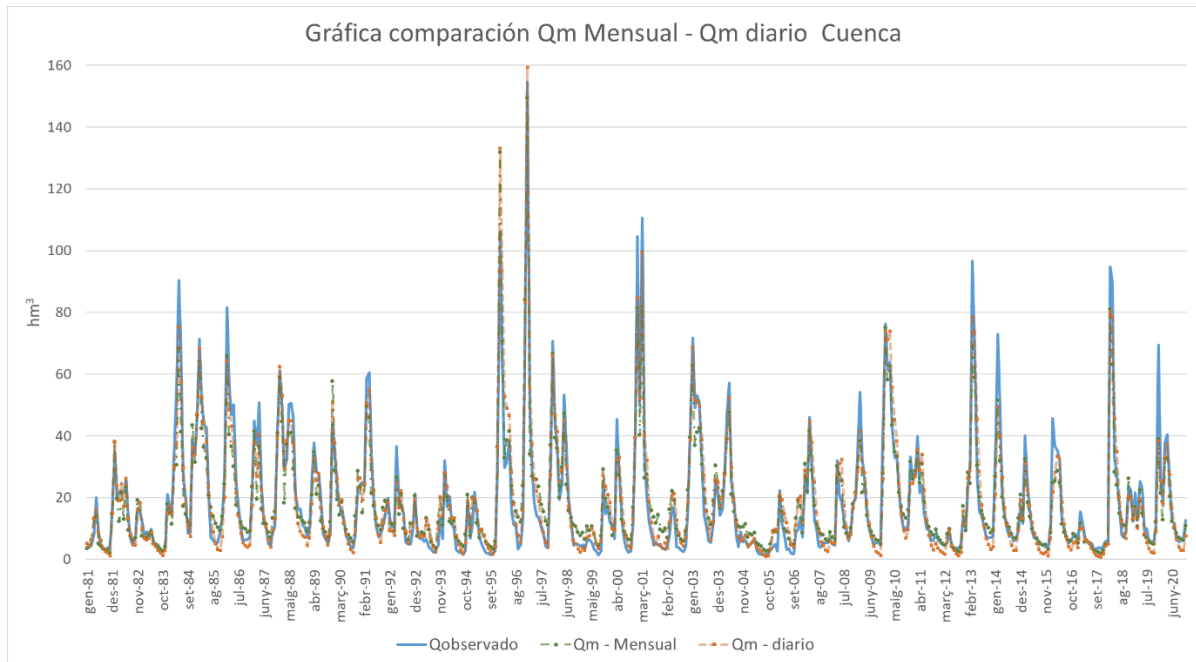


Figura 38. Gráfica comparativa entre el caudal observado (azul), el caudal simulado en escala mensual mediante los parámetros de la calibración mensual (amarillo) y el caudal simulado mensual calibrado en escala diaria (verde)

Para el estudio gráfico se ha decidido analizar los resultados en la estación de Cuenca, que ofrece los mejores resultados de calibración. Las diferencias entre ambas series se aprecian en los periodos posteriores a las crecidas (Figura 38). Durante el periodo de 1980 hasta el año 2006 la serie calibrada en escala mensual tiende a sobreestimar la cantidad de recurso sin llegar al valor mínimo observado, mientras que, en el periodo posterior, la serie calibrada en escala diaria tiende a infravalorar el caudal, con valores por debajo del caudal mínimo aforado.

La baja distinción entre las series justifica el uso de la calibración mensual en estaciones sin datos diarios disponibles con el objetivo de obtener series simuladas en régimen diario sin perder precisión en la simulación.

6.1.3. Influencia de la discretización espacial

La discretización espacial estudia cómo influye en la serie simulada considerar una configuración agregada o desagregada de las masas de agua con la precipitación y la ETP definidas para cada una de ellas. Esta técnica permite representar la heterogeneidad espacial de la cuenca de estudio distribuyendo la precipitación y la generación de recurso en varias subcuencas. De nuevo, se plantea un estudio donde se confrontan una mayor

precisión de la simulación frente a mayor eficiencia computacional y simplificación de procesos.

Para evaluar la influencia de la discretización espacial, se compararon gráficamente las series obtenidas mediante configuraciones espaciales agregadas y desagregadas en diferentes puntos de estudio y para el mismo periodo de tiempo. En este caso se ha decidido mostrar la serie obtenida en Alarcón debido a que su área está definida por una gran cantidad de masas de agua superficial.

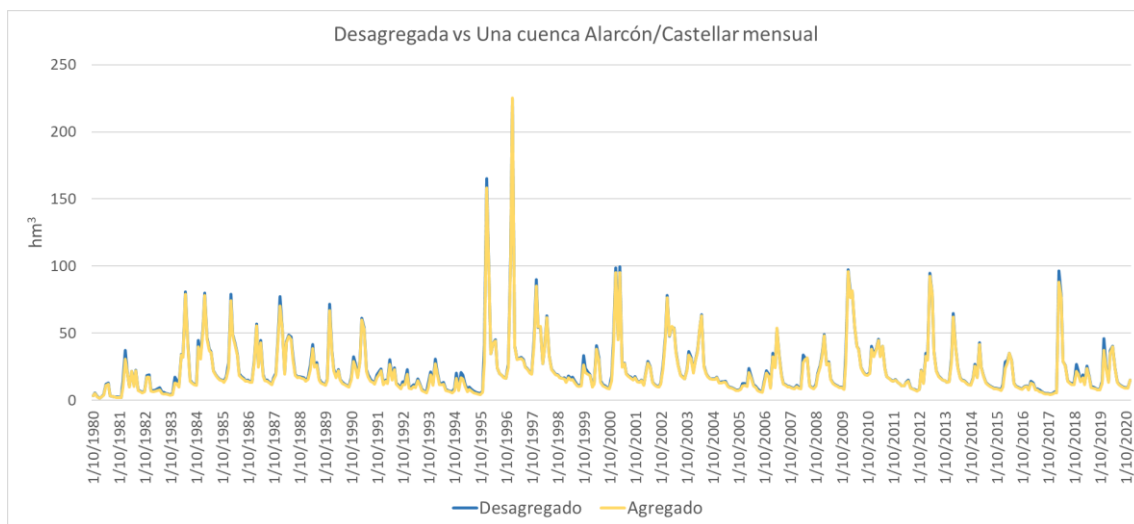


Figura 39. Efecto configuración espacial en la estación de aforo de Alarcón

Los resultados muestran que la incidencia entre desarrollar un modelo agregado en una cuenca o desagregado con todas las subcuencas es muy baja en todos los puntos de estudio, con lo que se obtienen series simuladas semejantes (Figura 39). La serie desagregada tiende a generar más escorrentía en los picos de crecida, pero esta diferencia no supera en ningún caso la cifra de 10 hm³.

Para la modelización precipitación-escorrentía mediante EVALHID en áreas que abarquen muchas subcuencas, resulta más práctico realizar las calibraciones mediante una única subcuenca donde se alberguen las características medias de toda el área. Una configuración agregada es más práctica y eficiente, pues logra resultados comparables a los obtenidos mediante configuración desagregada.

En definitiva, los resultados demuestran que la calibración con la herramienta EVALHID + CalEv funciona correctamente para el objetivo de estudio, que se puede homogeneizar rangos de parámetros para dar mayor robustez sin perder calidad en los resultados, que la desagregación espacial no aporta mejoras significativas y, por último, que la calibración

con datos diarios tampoco supone una mejora respecto a la calibración mediante la agregación de caudales a escala mensual.

6.2. Aplicación del método de desagregación con patrones temporales históricos

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de la desagregación de caudales mediante patrones temporales históricos. Se analizará cada una de las metodologías empleadas de manera gráfica en comparación con las series de caudales observadas de la estación de aforo de Cuenca.

Como se ha comentado en el apartado anterior, las primeras series fueron consideradas demasiado básicas para plasmar la descarga acumulada en los puntos de estudio piloto. La Figura 40 ilustra cómo la distribución uniforme sólo consigue parecerse mínimamente en los periodos secos y falla en periodos de crecidas. También se muestra la distribución del caudal diario interpolado mediante el método Akima (Akima, 1970), que se hace fuerte durante el periodo seco, pero, aunque logra una mejor simulación de los eventos de subida de caudal, no logra captar adecuadamente la heterogeneidad diaria de la hidrología. Ambas metodologías resultaron ser demasiado sencillas al no poder obtener simulaciones adecuadas.

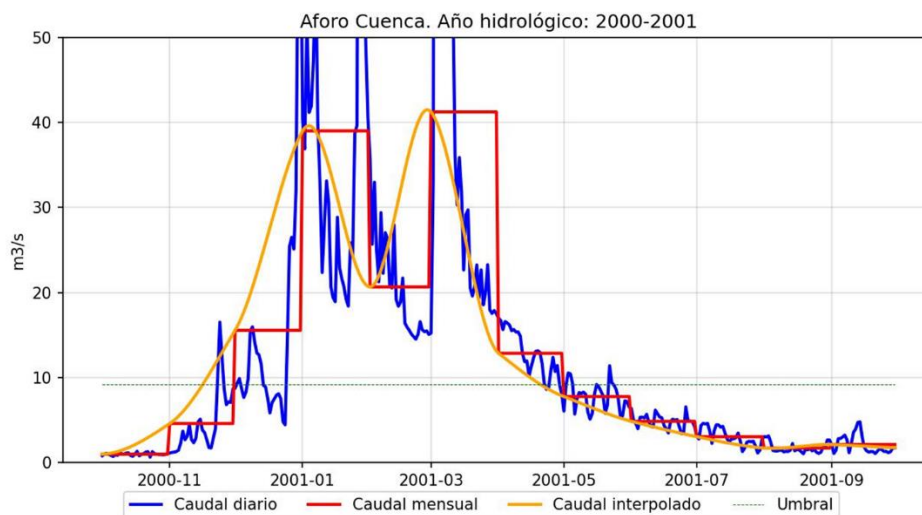


Figura 40. Aplicación de la distribución uniforme y de la distribución con interpolación

La generación de los nuevos tipos de distribuciones, H3 y H4, se ajustan más a las distribuciones naturales observadas en las estaciones de aforo. La distribución H4 se considera la más adecuada para el presente estudio, al formarse a partir de la serie interpolada y conseguir una mejor representación de los caudales observados. Las figuras

adjuntas hacen muestra de la mejora en la precisión de las series generadas comparadas con las primeras distribuciones.

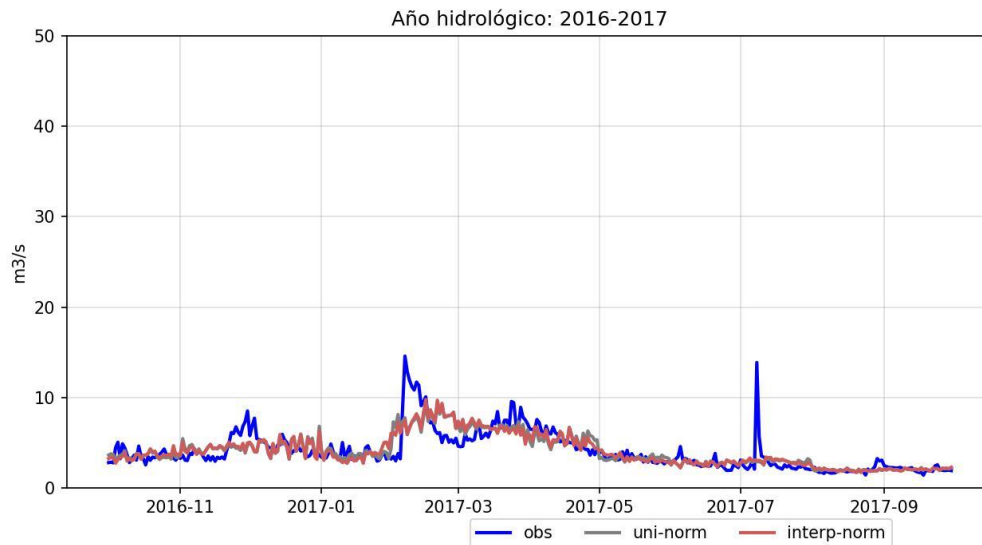


Figura 41. Aplicación de la distribución uniforme e interpolada con la adición de factores estocásticos

En los periodos sin grandes picos de descarga, la serie generada alcanza valores semejantes a la serie observada, destacando su similitud con el caudal base como se aprecia durante el año 2016-2017, especialmente durante los meses de otoño, finales de primavera e inicios de verano (Figura 41). Sin embargo, dentro de un año hidrológico bastante seco, son notorias las limitaciones que tiene para simular variaciones rápidas en el caudal descargado, como las observadas en febrero y julio de 2017. Este último pico tiene relevancia por la ausencia de variación en la serie modelada frente a un cambio importante en la tendencia. En esta gráfica se aprecia un alto grado de similitud entre las series uniforme-normalizada e interpolada-normalizada, excepto en febrero, donde existe un ligero desfase por parte de la segunda.

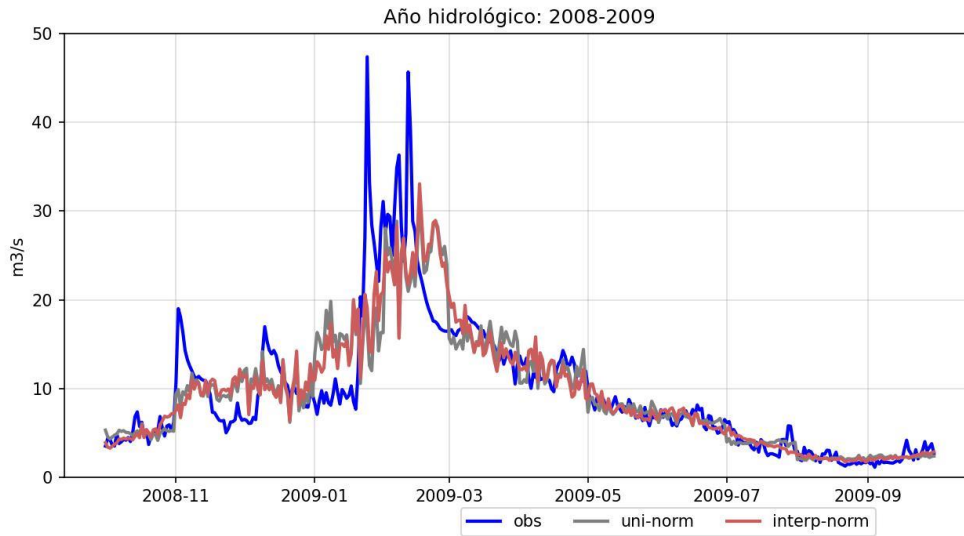


Figura 42. Aplicación de la distribución uniforme e interpolada con la adición de factores estocásticos

El año húmedo 2008-2009 permite extraer conclusiones parecidas del empleo de la serie de patrones históricos. Los primeros meses se muestran de manera más evidente sus limitaciones, lo que evidencia su limitación para simular la variabilidad de la crecida en la serie observada. A partir de los meses de primavera, se produce una bajada en la dispersión de los datos que posibilitan una mejor adecuación de los datos simulados (Figura 42). En esta figura es donde se puede apreciar que la distribución uniforme normalizada presenta ligeramente una mayor desviación respecto la serie observada durante los periodos de crecidas.

Los resultados reflejan las diferencias en la capacidad de cada método para reproducir de la distribución natural de los datos, especialmente los cambios bruscos en el nivel de caudal. La serie interpolada-normalizada se ha definido como la más adecuada para aplicar a las series de caudales naturales al proporcionar una mayor precisión en la simulación y se ha seleccionado como el método de referencia para ser comparada con el modelo precipitación-escorrentía.

6.3. Comparación de resultados de ambos métodos

Una vez han sido analizados los resultados de ambos métodos de manera individual, se procede a realizar una comparativa que permita seleccionar la metodología más adecuada para el presente trabajo. Se comparará el modelo precipitación-escorrentía HBV con las series desagregadas mediante patrones históricos.

El modelo precipitación-escorrentía responde a fenómenos físicos dentro de una zona física cuyo flujo hídrico se describe a partir de los parámetros introducidos, mientras que la metodología basada en los factores de variación depende únicamente de los patrones históricos. Aunque ello permite que su distribución temporal sea en muchos periodos semejante a la serie observada, carece de una base hidrológica.

A continuación, se presenta una comparación gráfica de la serie del modelo precipitación-escorrentía de EVALHID junto con todas las series obtenidas a partir de los diferentes métodos de desagregación de caudales. El año seleccionado para este primer análisis entre metodologías corresponde con un año lluvioso en la estación de Alarcón.

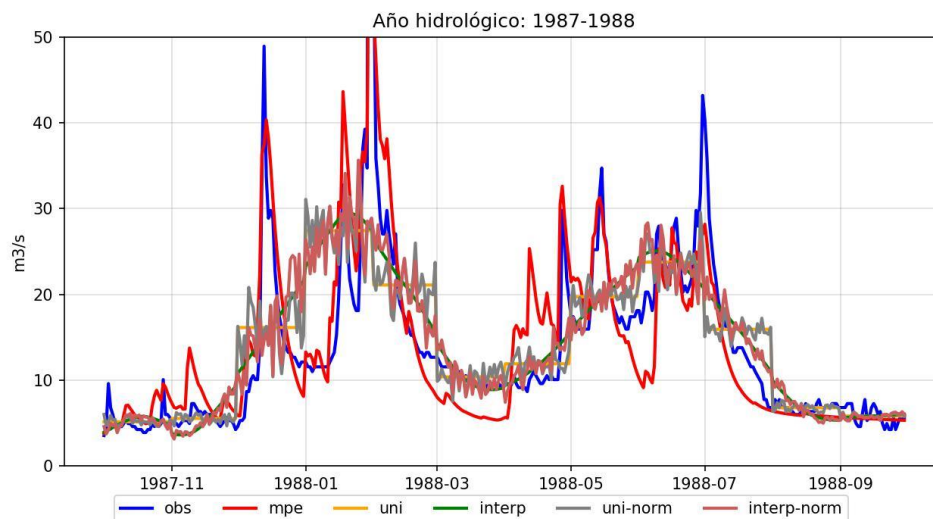


Figura 43. Comparación entre todas las metodologías de patrones históricos y el modelo precipitación-escorrentía en la estación de aforo de Alarcón

Rápidamente se puede identificar cómo la serie EVALHID se adapta mucho mejor a la variabilidad de la serie observada, alcanzando los picos de crecida y reproduciendo sus correspondientes descensos de caudal (Figura 43). Las series uniformes e interpoladas se descartan inmediatamente, mientras que las series normalizadas alcanzan cierto valor de variabilidad. La interpolada-uniforme es la más útil, pero no en periodos húmedos.

El análisis posterior se realizará únicamente con la serie EVALHID y con la serie interpolada-normalizada.

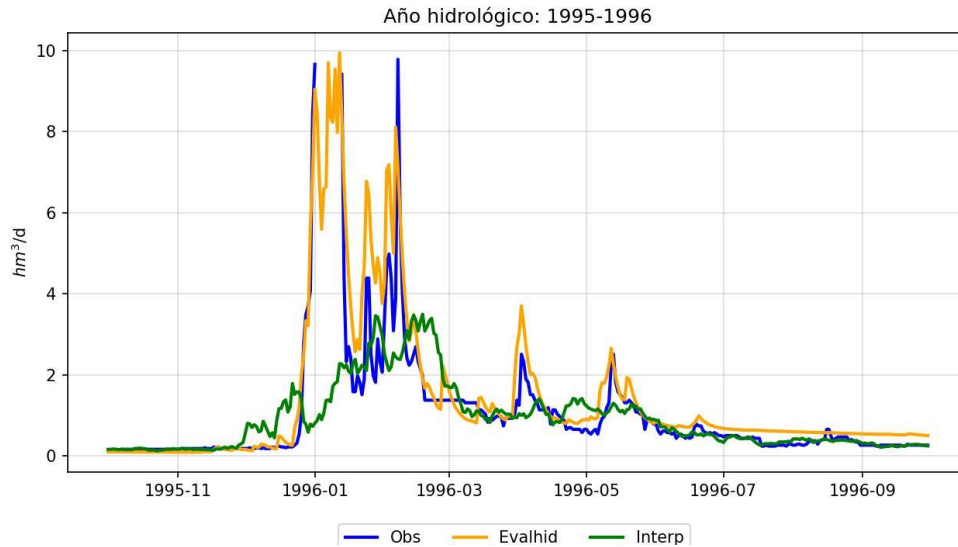


Figura 44. Comparación entre metodologías en la estación de aforo de Alarcón durante año húmedo

El modelo HBV permite predecir picos de descarga en el año húmedo, mientras que la serie estocástica no es capaz de reproducir ninguno de ellos (Figura 44). Durante los meses con ausencia de lluvias, en cambio, el modelo de desagregación de valores temporales se fortalece, mientras que la serie de EVALHID presenta un menor grado de similitud. El año hidrológico 1995 es buena muestra de lo que se ha indicado, donde el modelo EVALHID consigue alcanzar los valores máximos de crecidas durante los meses de invierno mientras que la serie interpolada, aunque aumenta sus valores ligeramente debido a como está generada, no logra valores comparables. En cambio, durante los meses de verano, la serie EVALHID se mantiene prácticamente constante, obteniendo valores cercanos a la serie observada, aunque sin alcanzar la variabilidad en los datos que sí que obtiene la serie de interpolación de caudales.

En el gráfico que muestra las series durante un año seco en la estación de Alarcón, la serie interpolada-normalizada se fortalece porque no existen fuertes variaciones de caudal, especialmente durante los meses con ausencia de lluvias (Figura 45). Aun así y pese que en los años secos la serie EVALHID presenta ciertas limitaciones, el ajuste que ofrece es mejor al poder captar los picos de descarga y producir una serie más realista.

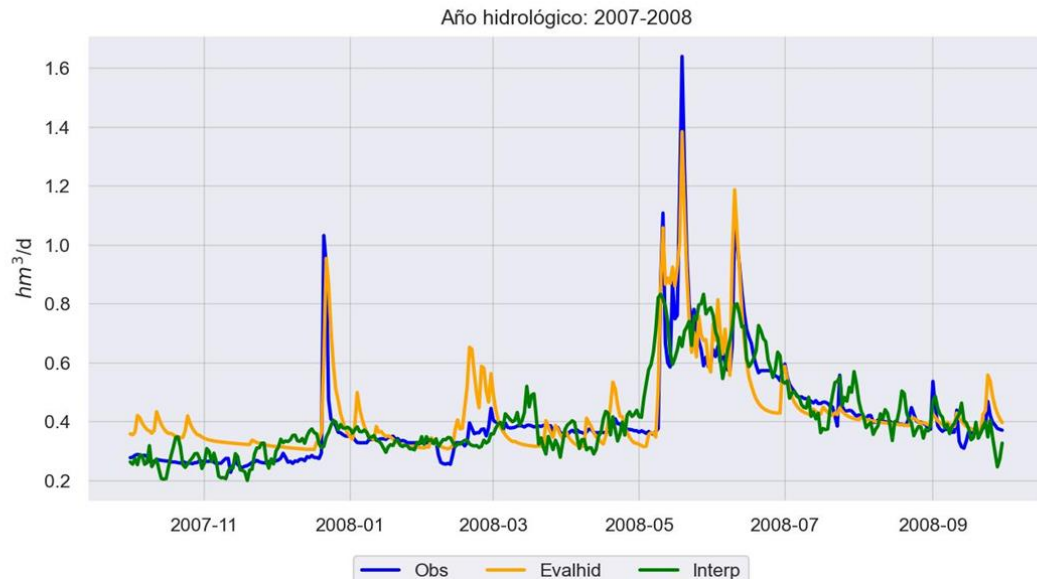


Figura 45. Comparación entre metodologías en la estación de aforo de Alarcón durante año seco

La comparación gráfica de ambos métodos muestra lo que cada uno ofrece al caso de estudio: el modelo precipitación-escorrentía se fundamenta en series de precipitación y ETP diarias sumadas a una serie de parámetros calibrados, por lo que los resultados consiguen simular mejor las variaciones de caudal debido a cambios en estos dos factores. Sin embargo, se hace patente que existen determinados días donde el modelo presenta limitaciones que provocan desajustes respecto las series observadas. Por otra parte, la serie de interpolación de patrones temporales no es capaz de reproducir crecidas de caudales por su propia metodología, alejándose señaladamente de la serie de caudales observados, pero se fortalece durante los meses secos, debido a la baja dispersión de los valores observados. El resto de gráficos donde se comparan las dos metodologías estudiadas en cada punto de estudio se encuentran en el anejo 2.

Para poder realizar una comparación más detallada, se ha decidido analizar las funciones objetivo de ambas metodologías en cada uno de los puntos de estudio piloto. La Tabla 5 es buena muestra de cómo la función objetivo Nash valora positivamente la adecuación de las series simuladas en periodos donde existen picos de descarga, lo que resulta en mejores valores para EVALHID en todos los puntos de estudio, excepto Zagra.

Se aprecia cómo las series que presentan valores más dispersos en caudales que no sean de crecida, afectan negativamente a la calibración de las series simuladas (Arenós y

Pajaroncillo). Los valores más altos de la función objetivo de las series EVALHID coinciden con los de las series interpoladas (Arquillo y Cuenca). A medida que la función objetivo de la serie precipitación-escorrentía disminuye, también desciende la de las series de caudales interpolados, con la excepción de nuevo de la estación de aforo de Zagra.

Índice de Nash	Evalhid	Interp
Alarcón	0.72	0.56
Arenós	0.49	0.34
Arquillo	0.82	0.69
Cuenca	0.82	0.6
Pajaroncillo	0.69	0.56
Zagra	0.57	0.69

Tabla 5. Función objetivo de las series simuladas resultantes de cada metodología respecto la observada

A la hora de valorar la aplicabilidad de ambas metodologías en el caso de estudio, se ha de tener en cuenta la fiabilidad de trasladar las distribuciones de factores de variación calculados hacia cuencas aguas abajo como el Molinar, Tous o Sueca, donde las series aforadas diarias no se encuentran en régimen natural y las series restituidas sólo están disponibles en escala mensual. Por tanto, uno de los mayores problemas de la utilización de patrones temporales históricos es su limitación espacial de uso.

Para el presente caso de estudio, la utilización del modelo precipitación-escorrentía se considera más coherente y adecuado debido a su base ligada a fenómenos meteorológicos y a las características de las cuencas de estudio. Además, se ha podido determinar que las series obtenidas se asemejan en mayor grado a las series observadas. Aunque las metodologías basadas en patrones históricos pueden ser útiles en algunos estudios, la utilización del modelo precipitación-escorrentía HBV ofrece una mayor precisión y coherencia para la simulación de caudales en este estudio y permite la aplicación a la cuenca del río Júcar.

7. Aplicación del modelo precipitación-escorrentía en la cuenca del río Júcar

Tras el análisis de los puntos de estudio piloto en régimen natural y la posterior comprobación de la validez de la metodología empleada, se aplica el modelo

precipitación-escorrentía desarrollado mediante EVALHID a toda la Cuenca del río Júcar con el objetivo de obtener series diarias de caudales en régimen natural. A continuación, se presentará cómo se ha aplicado y los resultados correspondientes.

7.1. Desarrollo del modelo

La mayoría de las series de caudales de las estaciones de aforo en la cuenca del Júcar no pueden utilizarse en los modelos que se han llevado a cabo debido a que los datos que recogen las estaciones ubicadas en el tramo medio y bajo de la cuenca presentan un alto grado de alteración como consecuencia de la actividad humana. Para esta área de estudio, es necesario el empleo de las series restituidas en los puntos donde estén disponibles.

Los datos utilizados para el desarrollo de los modelos provienen de series restituidas intermedias, es decir, de series que tienen en cuenta el agua superficial generada entre dos puntos de estudio, situados generalmente en la salida de los embalses. Los modelos creados en el módulo EVALHID representan las diferentes cuencas hidrográficas intermedias mediante el desarrollo de un modelo agregado de cuenca, con los datos promedio de precipitación y ETP del área de estudio (Figura 46). Esta metodología posibilita agrupar subcuencas con características similares y modelarlas con parámetros distintos a las demás.

La calibración del modelo se ha realizado en escala mensual debido a la disponibilidad de datos. El periodo de trabajo establecido para la calibración es de septiembre 1984 a octubre 2000 y el de validación es de octubre 2000 a septiembre 2019. La designación de 1984 como año inicial de calibración se debe a que en los años anteriores los valores restituidos empeoraban significativamente la calibración. El valor de los parámetros ha sido delimitado a partir del rango homogeneizado utilizado en el apartado anterior.

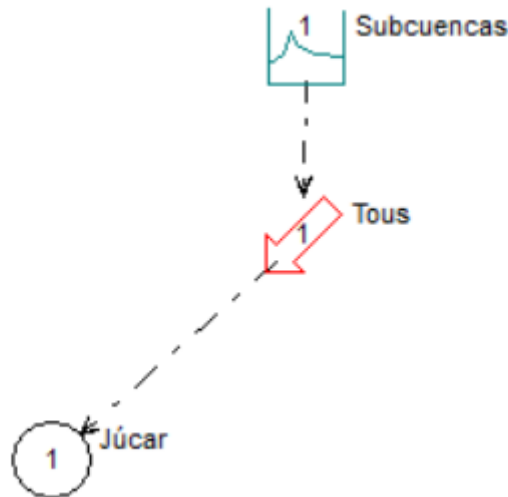


Figura 46. Modelo agregado representativo de la cuenca intermedia de Tous en EVALHID

7.2. Calibración y resultados aportaciones intermedias

Una vez se generaron las series simuladas a partir de las calibraciones, se ha podido observar diferencias en los resultados obtenidos. A continuación, se muestran los resultados de calibración y validación en cada uno de los puntos de estudio de la cuenca del Júcar junto con su función objetivo resultante.

Alarcón

El punto de estudio se sitúa justo en la salida del embalse de Alarcón en el río Júcar. El ajuste de la serie de aportaciones simulada presenta una función objetivo de 0.90, considerándose una muy buena calibración. Los resultados positivos alcanzados en este punto de estudio se explican por el hecho de que las subcuencas analizadas se encuentran en régimen natural a excepción de los embalses. De esta manera, las detracciones a eliminar para formar las series restituidas son mínimas y, por tanto, la calibración se efectúa respecto series en régimen natural sin prácticamente incertidumbre.



Figura 47. Resultados calibración del modelo EVALHID en Alarcón

En el gráfico muestra cómo la serie EVALHID simula las variaciones intra-anales, donde se aprecia claramente la diferencia entre los meses de invierno y donde se alcanzan los valores de recurso máximos cada año y los meses de verano, cuando el caudal fluvial disminuye hasta el caudal base (Figura 47). También se observan variaciones interanuales, con años más húmedos (1996 y 1997) y secos (la sequía del periodo 1992-1995). La dinámica de la cuenca se caracteriza por ubicarse en la zona con mayor cantidad de precipitaciones del área de estudio y por un flujo hídrico cuya evolución está muy influenciada por los periodos de lluvia. El modelo predice adecuadamente prácticamente todos los picos de crecida, aunque en algunos casos, el valor que alcanza la serie simulada se desvía ligeramente del caudal restituido. De la misma manera, los periodos con ausencia de precipitación, donde se conforma el caudal base, también presentan un buen ajuste, pero se evidencia que el modelo tiende a sobrevalorar la descarga de agua.

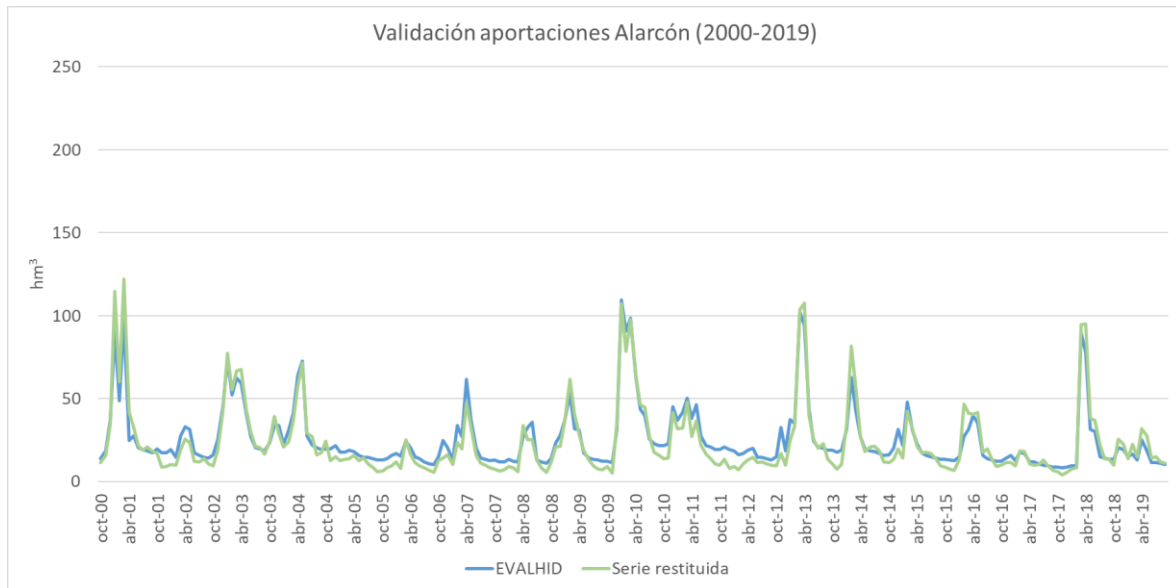


Figura 48. Resultados validación del modelo EVALHID en Alarcón

La validación sigue la misma tendencia que la calibración, con un ajuste muy bueno entre la serie restituida y la simulada, lo que muestra una simulación precisa durante los periodos de crecida (Figura 48).

Contreras

La calibración en la salida del embalse de Contreras es muy similar a la analizada anteriormente en Alarcón debido al análisis de una gran cantidad de subcuencas aguas arriba cuyo flujo se encuentra en régimen natural. En este caso, la función objetivo resultante de la calibración es muy satisfactoria con un valor de 0.8.

La serie mensual restituida del río Cabriel en Contreras muestra una mayor variabilidad en la distribución temporal con numerosos cambios bruscos de tendencia, con aumentos y descensos muy rápidos y pocos periodos de estabilidad. La dinámica de la serie se encuentra condicionada por las precipitaciones de invierno y por la ausencia de estas durante el verano en los primeros años de estudio. A partir de la sequía que empieza en el año 1991 y permanece hasta 1995, los periodos de precipitación posteriores se encuentran menos marcados por la estacionalidad (Figura 49), pudiendo ser consecuencia del cambio climático. Los años del periodo de validación muestran una reducción del caudal base, adquiriendo valores similares a los de la sequía mencionada durante los años 2004–2008 y 2014–2018 (Figura 50).

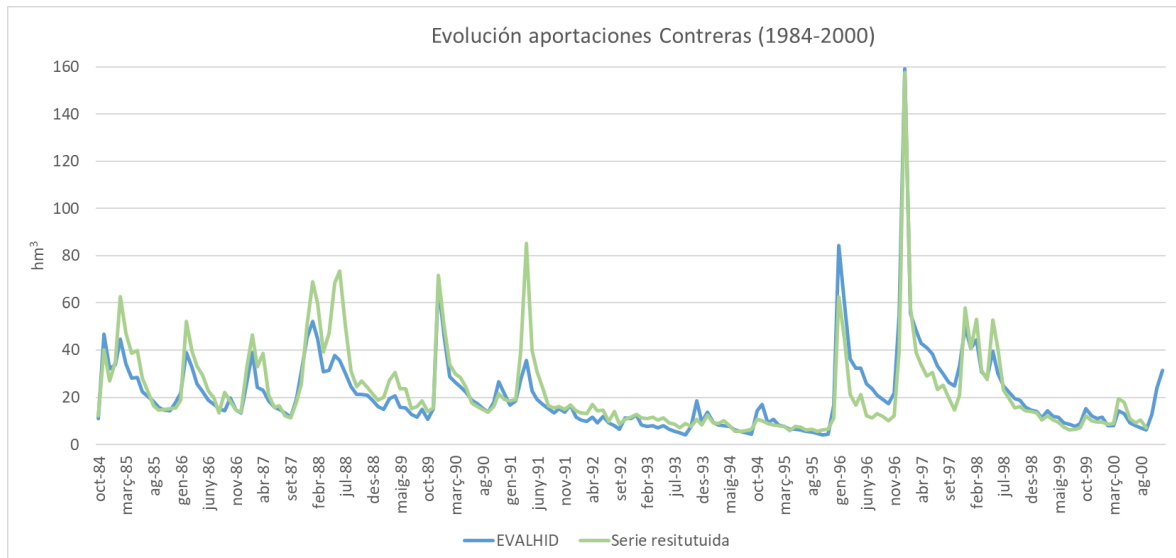


Figura 49. Resultados calibración del modelo EVALHID en Contreras

En cuanto al análisis gráfico de la calibración, el modelo permite un ajuste muy bueno durante toda la serie. Durante los años iniciales de estudio, la serie EVALHID se superpone en algunos periodos de descenso de caudal, pero no llega a simular correctamente las crecidas de julio de 1988 y de junio de 1991. Sin embargo, destaca la reproducción de la subida de caudal en algunos episodios, especialmente la del año hidrológico de 1996 (Figura 49). En cambio, también se observa un peor ajuste durante los periodos de descenso de caudal, simulando una bajada más lenta que la serie restituida. Por último, el modelo consigue identificar y simular el periodo de sequía situado entre años con crecidas importante, con la excepción de la mencionada en 1991.

La validación de Contreras sigue la misma tendencia que la de Alarcón, con un mejor ajuste general, logrando simular la tendencia de los caudales restituidos, tanto en los periodos de crecida como en los de bajada de caudal. El mejor periodo se consigue a partir del año 2013 (Figura 50).

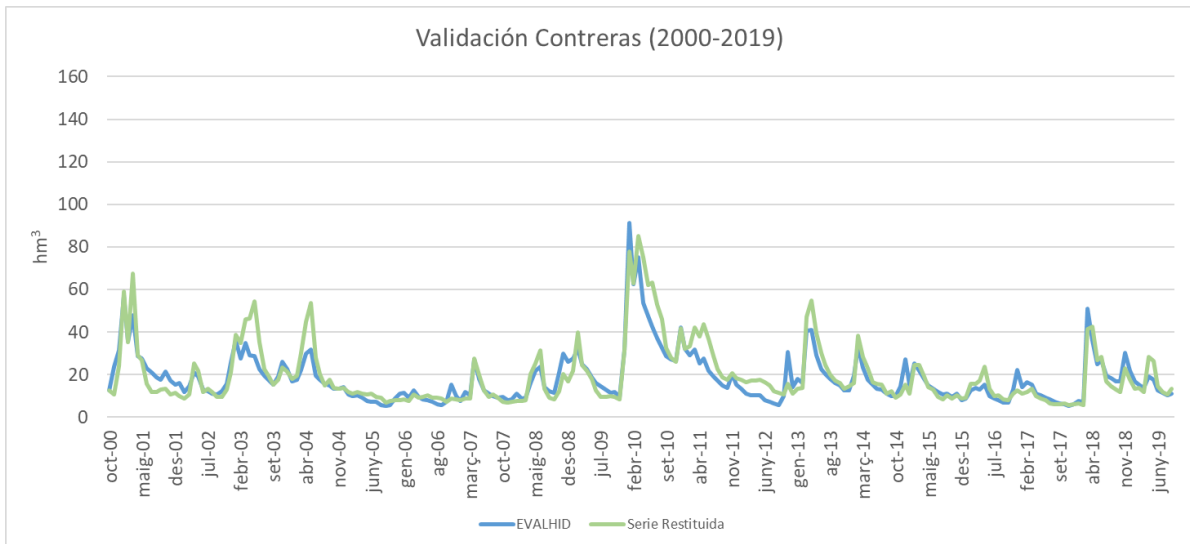


Figura 50. Resultados validación del modelo EVALHID en Contreras

El Molinar

En la calibración respecto las series restituidas intermedias de las subcuencas del tramo medio de los ríos, toda el área estudiada se encuentra en régimen alterado. Esto provoca que la calibración se realice respecto una serie restituida sujeta a la incertidumbre que conllevan numerosos factores humanos que pueden influenciar el caudal que fluye por los ríos. Este es el caso de las series de El Molinar, Tous y Cofrentes.

Los resultados del modelo EVALHID obtenidos en el punto de estudio situado aguas abajo del embalse de El Molinar muestran que el modelo no es capaz de reproducir correctamente la distribución temporal de los valores restituidos. Al analizar el gráfico, se puede deducir que la serie de caudales en El Molinar está sujeta a las aportaciones subterráneas debido a que los valores fluctúan alrededor de los 20 hm³, sin picos de caudal ni cambios bruscos. Prueba de esto es que la sequía de los años noventa no ha supuesto variaciones significativas en el caudal restituido generado por la cuenca intermedia. Los máximos anuales se suceden durante los meses de primavera y verano, que coinciden con los meses posteriores a los periodos de precipitaciones en las zonas de clima continental.

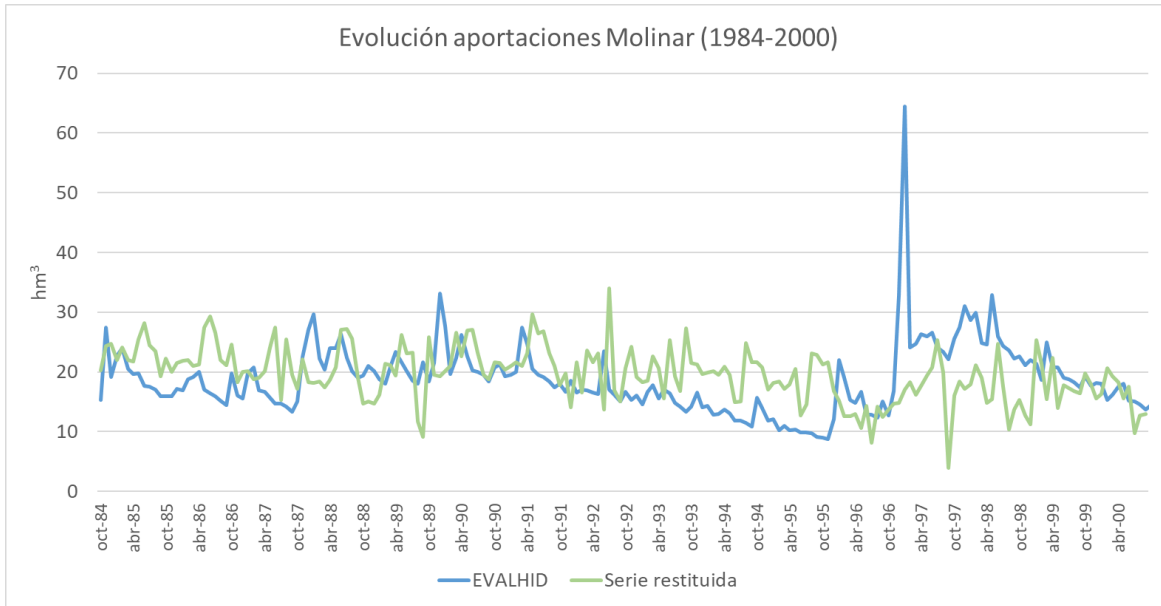


Figura 51. Resultados calibración EVALHID en El Molinar

Por lo que respecta a la calibración, no existe ningún periodo donde ambas series presenten la misma dinámica. No obstante, el modelo es capaz de reproducir tendencias; por ejemplo, ente el año 1998 y el 2000, el modelo prevé un descenso progresivo de los caudales que se refleja en la serie restituida (Figura 51). El valor resultante de la función objetivo es de -1.852, el peor de todas las calibraciones realizadas. Estos malos resultados pueden tener su explicación a partir de la incertidumbre existente al calibrar respecto una serie restituida que aglomera todas las masas de agua superficial que forman parte de la cuenca intermedia de El Molinar, junto con los numerosos cultivos por bombeo y la importancia de las aportaciones subterráneas, difíciles de simular.

La validación del modelo muestra los mismos resultados que la calibración, con un mal ajuste unido a periodos donde el modelo genera crecidas (2009-2013) que la serie restituida no contempla (Figura 52).

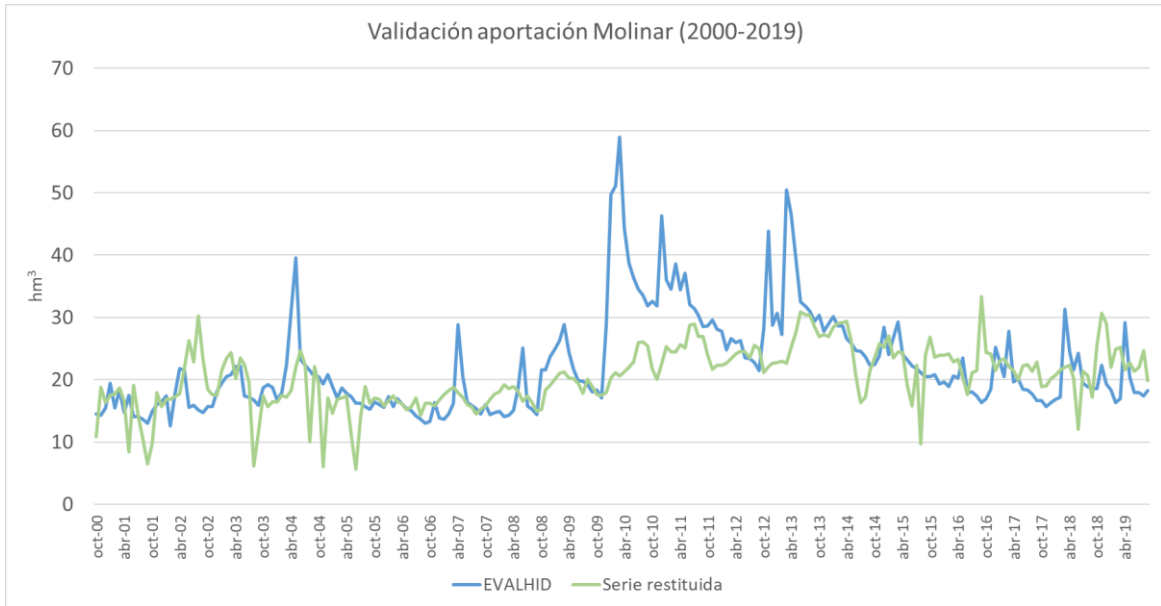


Figura 52. Resultados validación serie EVALHID en El Molinar

Cofrentes

La serie restituida en Cofrentes presenta un comportamiento similar al de El Molinar al pertenecer a la cuenca media del Júcar. Pese a que su superficie es mucho menor, la serie de caudales restituidos tiende a adquirir valores mensuales entre los 10 y los 20 hm^3 con algunas excepciones (Figura 53). Se trata pues de un claro indicio de que el régimen subterráneo controla las aportaciones intermedias medidas en este punto de estudio. La serie restituida contiene ciertas incongruencias durante el periodo de calibración, como lo son los meses con caudal “0” durante periodos que no se corresponden con sequías.

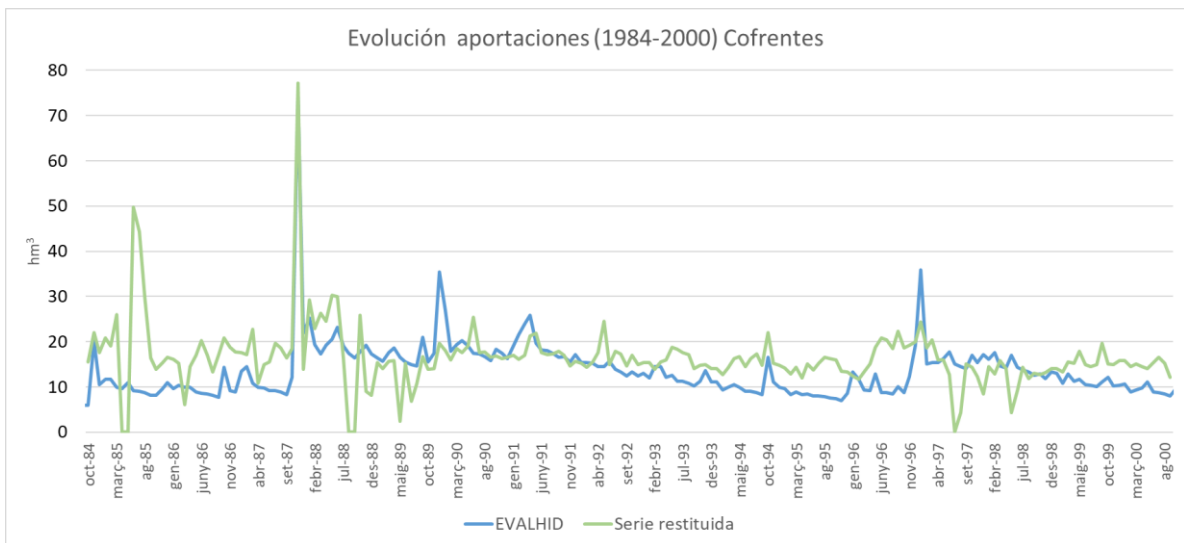


Figura 53. Resultados calibración EVALHID en Cofrentes

La calibración en Cofrentes no presenta un buen ajuste y ello se refleja en los resultados de la función objetivo, con un valor Nash de -0.082. La serie EVALHID no consigue reproducir la distribución temporal que muestra la serie restituida durante los primeros años de estudio ni los meses sin aportaciones. En cambio, prevé correctamente la crecida de invierno del año hidrológico 1987, logrando que ambas series se superpongan en el gráfico (Figura 53). Además, al igual que en El Molinar, consigue seguir la tendencia general de la serie de caudales restituidos, así como reproducir la bajada de caudal progresiva causada por la sequía de los años noventa, que en este caso se sostiene desde el año 1991 hasta 1996.

Durante el periodo de validación no se observa ningún mes sin descarga intermedia de caudal. La serie EVALHID no mejora su ajuste e infravalora en la mayoría del periodo el valor de la serie restituida (Figura 54). Es posible que la mala calibración se deba a la incertidumbre generada al realizar una restitución del caudal que se genera en el área de estudio, ubicada aguas abajo del embalse de Contreras.

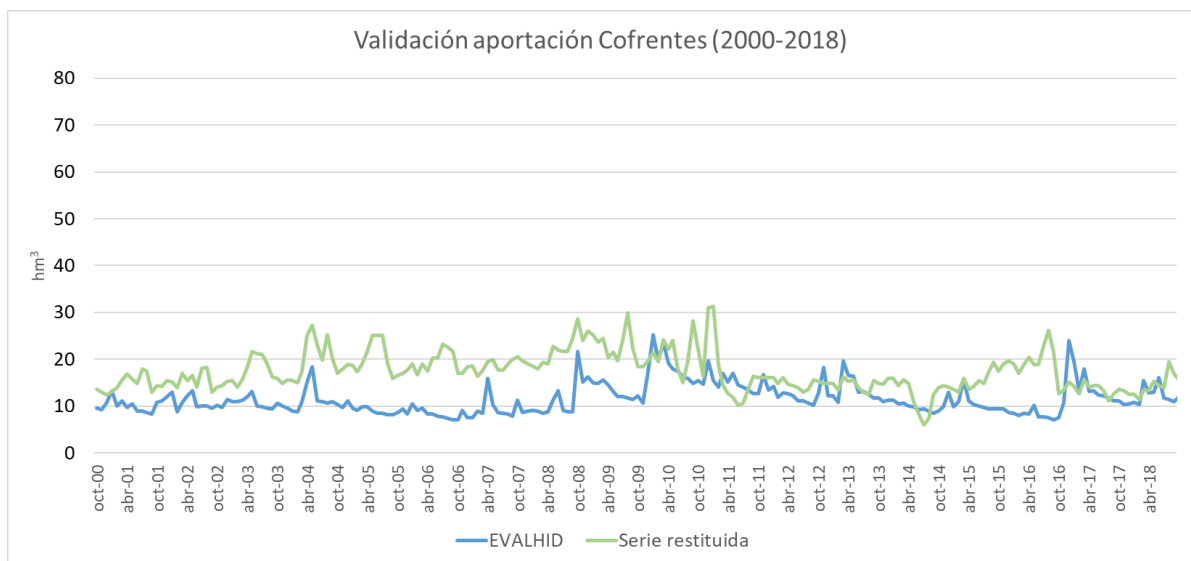


Figura 54. Resultados validación EVALHID en Cofrentes

Tous

El último punto de la cuenca media corresponde a Tous, donde confluyen los ríos Júcar y Cabriel. La serie de caudales restituidos en Tous presenta una variabilidad no observada en los dos casos anteriores, con cambios bruscos en el caudal descargado que alcanzan una amplitud de 30 hm³ (Figura 55). Los valores mínimos en Tous coinciden con los de

Cofrentes, con valores en torno los 10 hm³, sin que los efectos de la metasequía acontecida entre los años 1992 y 1994, provoque un cambio de tendencia en la serie restituida.

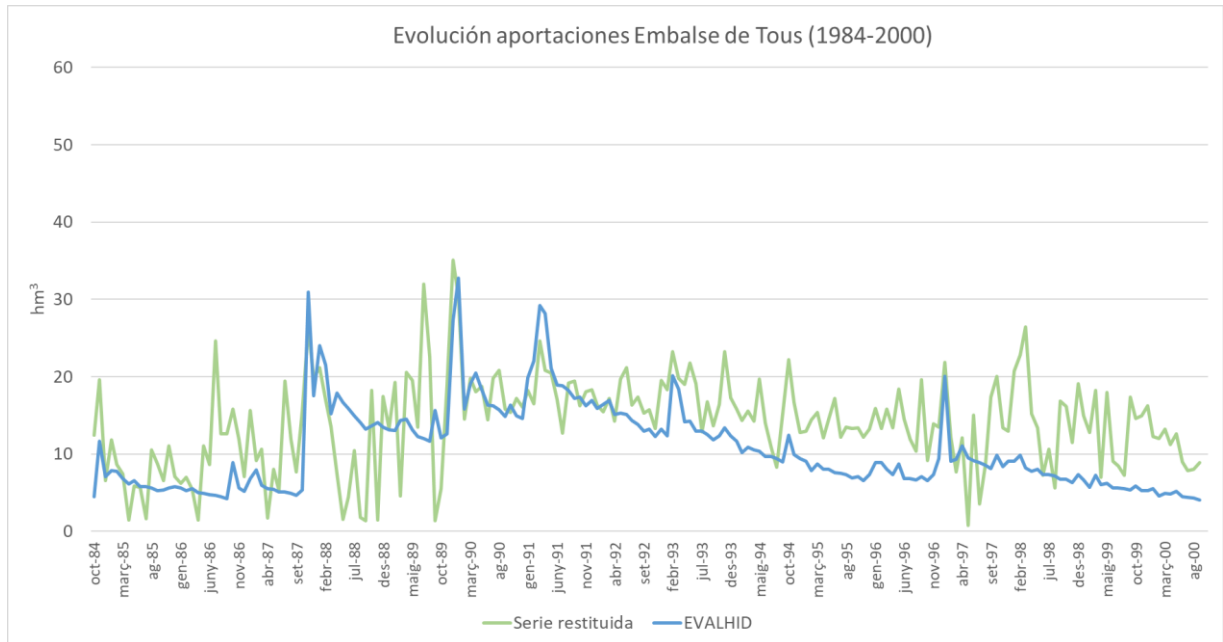


Figura 55. Resultado calibración serie EVALHID en Tous

No se logra conseguir una calibración cuya función objetivo alcance valores satisfactorios. En el punto de descarga de Tous se aprecia cómo la serie de EVALHID es capaz de simular la tendencia positiva del periodo 1987-1991 y la tendencia negativa hasta el año 2000, destacando el periodo donde la serie muestra los efectos causados por el descenso de las precipitaciones entre 1990 y 1994. Además, todos los picos de crecida que genera el modelo se superponen con los que forma la serie de caudales. Sin embargo, los valores simulados y restituidos no son semejantes y la mayoría de los picos mensuales de precipitación y descensos de la serie restituida no se reflejan en la serie simulada. La función objetivo resultante, con un valor de -0.208, pone de manifiesto el mal ajuste a lo largo del periodo de calibración. En el caso de la validación, el ajuste empeora debido a la infravaloración que el modelo realiza de la serie de caudales restituidos en Tous (Figura 56).

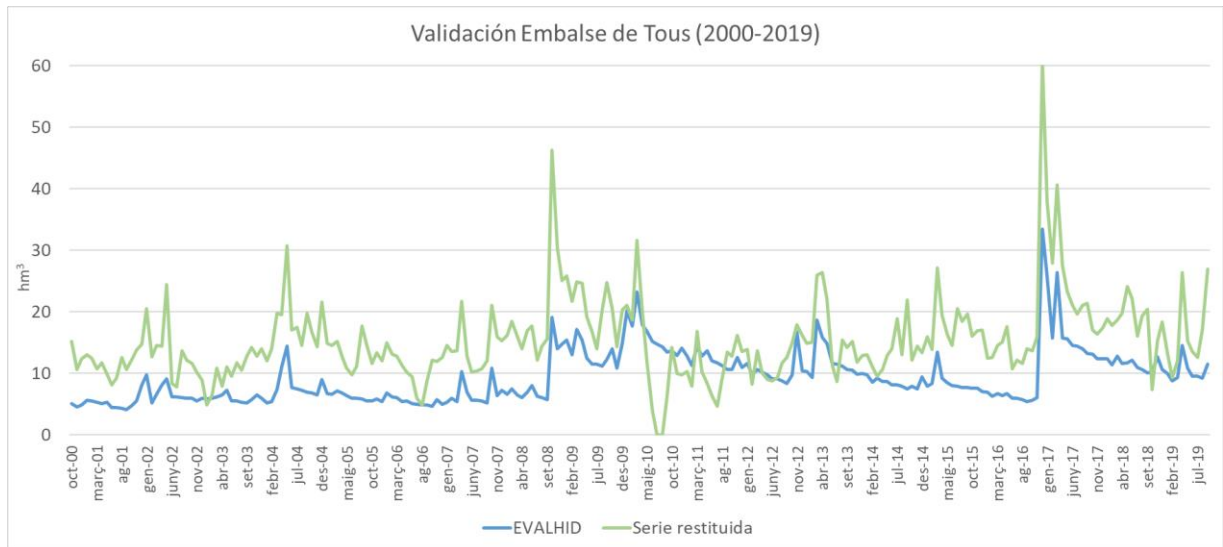


Figura 56. Resultado validación serie EVALHID en Tous

En el tramo medio del Júcar, la influencia de las aportaciones subterráneas es elevada, coincidiendo con el área donde menores precipitaciones anuales tienen lugar. Se caracteriza por tener flujo base durante todo el año marcado por las aportaciones subterráneas, aunque en las figuras se pueden observar determinados momentos donde la descarga es cercana a cero (Figura 53) y (Figura 55). Esto podría explicar la dificultad del modelo para generar series que presenten distribuciones parecidas a las series restituidas.

Ríos Albaida y Magro

Los puntos de estudio de Bellús (río Albaida) y Forata (río Magro) presentan un comportamiento hídrico diferente al de las cabeceras de ríos como el Júcar o Cabriel al encontrarse en la altura geográfica del tramo medio del Júcar. A diferencia de los otros puntos situados en la medianía de la cuenca, las subcuencas que forman estos tramos fluviales son pocas y no presentan barreras hidráulicas importantes aguas arriba. Ambas cuencas presentan una importante componente subterránea que permiten que fluya caudal durante todo el año.

Bellús

La serie restituida en Bellús muestra valores de caudal muy bajo con algunos picos de caudal durante las estaciones de otoño principalmente y primavera. Se observa el

descenso de caudal producido por la sequía de los años noventa, de la misma manera que una tendencia progresiva a la baja de caudal hasta el final del periodo estudiado.

En cuanto a los resultados de la calibración respecto la serie restituida original, se evidencia que el modelo genera una mayor descarga en Bellús que la indicada por la serie restituida. A partir del año 1990, ambas series representan una tendencia similar, pero con una significativa diferencia entre los valores mensuales que acogen, por lo que se considera que la serie EVALHID presenta la evolución correcta, pero con una descarga demasiado alta. Sólo coinciden en la crecida que se produjo en marzo del año 1993 (Figura 57). El valor resultante de la función objetivo de la calibración es de -0.016, semejante a los obtenidos en las áreas de estudio correspondientes a la cuenca media del río Júcar.

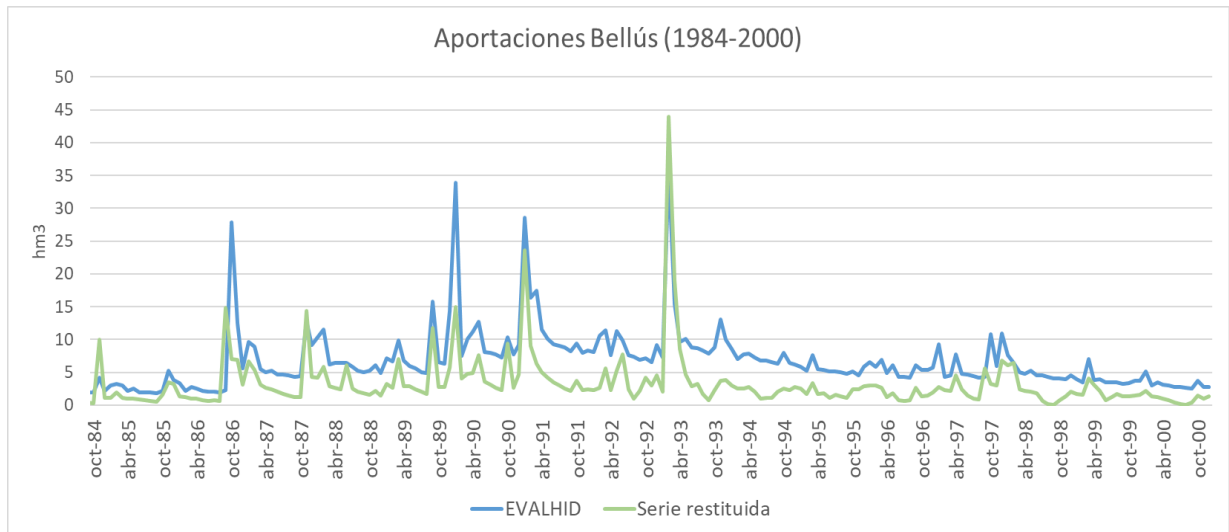


Figura 57. Resultados calibración serie EVALHID en Bellús

Forata

El análisis de la serie restituida de Forata muestra cómo el río Magro transporta muy poco caudal, con bajos picos de crecida para encontrarse en cabecera de cuenca y con caudales mensuales cercanos a los 0 hm³, especialmente durante los años de sequía. La serie EVALHID consigue un buen ajuste durante los primeros años de calibración, pero a partir del año 1987, la serie genera valores que en todo momento se encuentran por encima de la serie de caudales restituidos (Figura 58), imposibilitando el ajuste de las series como en el caso de Bellús. El modelo prevé las crecidas que se producen, pero en todos los casos genera un caudal mucho mayor que el indicado por la serie restituida. La función objetivo Nash es de -1.560, lo cual refleja el mal ajuste comentado.

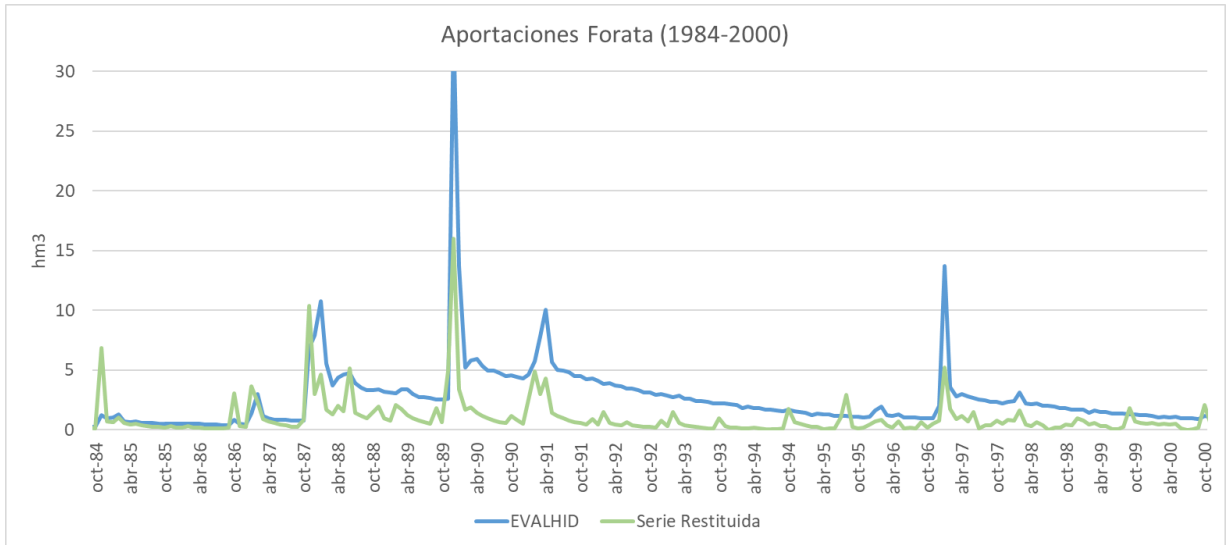


Figura 58. Resultados calibración serie EVALHID en Forata

Restitución en Bellús y Forata

Los malos resultados obtenidos en la modelación de las subcuencas de Bellús y Forata, que abarcan las cabeceras de los ríos Albaida y Magro respectivamente, promovieron la investigación de posibles factores que estuviesen afectando a la calibración. En concreto, al motivo por el cual se generaba mucho más caudal en las series EVALHID que en las series restituidas.

La mayoría de las series restituidas intermedias contemplan las detracciones con la finalidad de garantizar la demanda agrícola o urbana como se indica en la tabla 1. No obstante, las series de Bellús y Forata no consideran los bombeos que se producen desde las subcuencas de cabecera hasta los puntos seleccionados. Esta falta de datos puede afectar al correcto desarrollo del modelo, debido a que se calibra respecto series que no reflejan el caudal que fluiría en régimen natural por el cauce de los puntos de estudio. A continuación, se muestra la metodología empleada para hacer frente a la problemática mostrada.

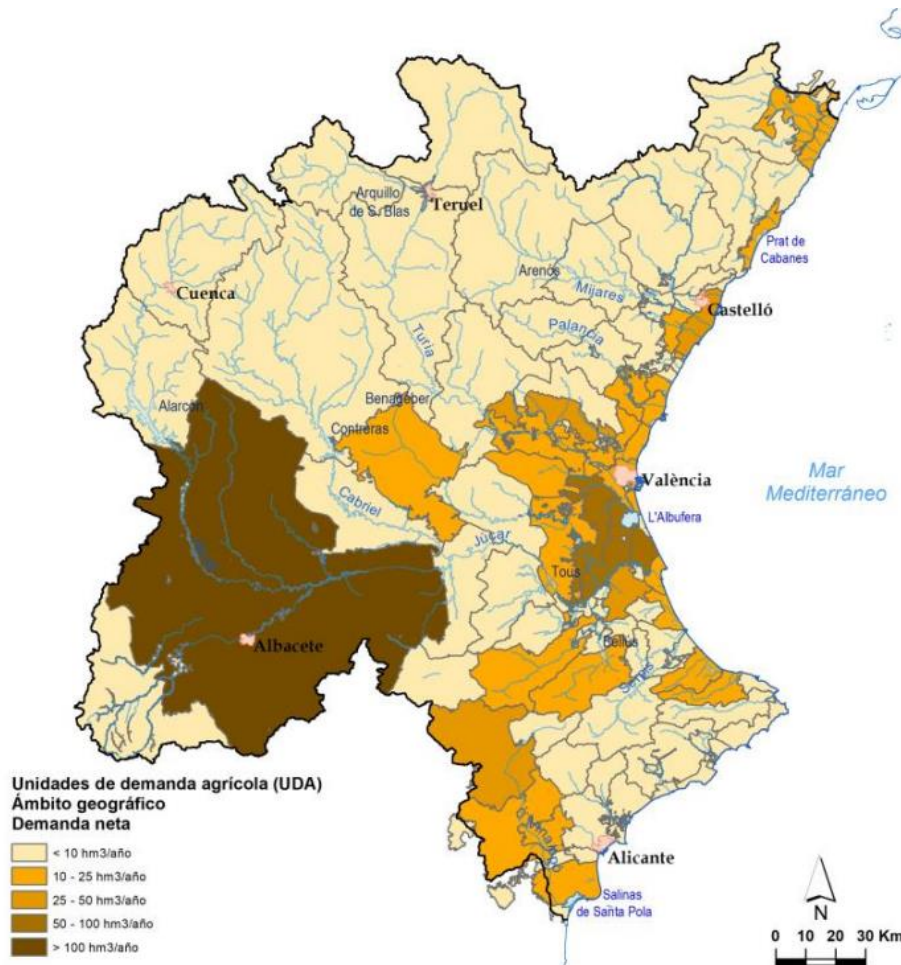


Figura 59. Demanda neta por Unidad de Demanda agrícola (UDA). Fuente: Plan hidrológico de la CHJ 2022-2027

La cercanía al litoral, un clima adecuado y la menor orografía explican la existencia de numerosos campos de cultivo que se extienden a lo largo de las áreas de estudio y que conllevan una importante demanda agrícola. Mediante el análisis del recurso utilizado para satisfacer las demandas en las masas de agua que forman parte de las cuencas afectadas (Figura 59), se hizo patente que principalmente se utiliza agua subterránea mediante bombeo en pozos. Ello implica que el efecto de las retracciones no se aprecie de manera inmediata en variaciones en el caudal superficial medido, sino en el nivel piezométrico de los acuíferos y, por tanto, en la relación río-acuífero.

Para poder mostrar adecuadamente el proceso mencionado, se obtuvieron las series anuales disponibles de demanda agrícola de la CHJ para las áreas de cabecera de ambos sistemas fluviales en el periodo comprendido entre los años hidrológicos 1984 y 2018. Además, se obtuvo la distribución porcentual mensual de la demanda que ofrece la CHJ (Figura 60), con lo que se consiguió generar series mensuales considerando que dicha distribución no ha variado significativamente en el tiempo. Por último, para poder aplicar

dicha serie en el modelo precipitación-escorrentía en escala diaria, se repartieron los datos mensuales de forma uniforme entre los días de cada mes. De esta forma se consigue una serie diaria de bombeos en ambos puntos de estudio.

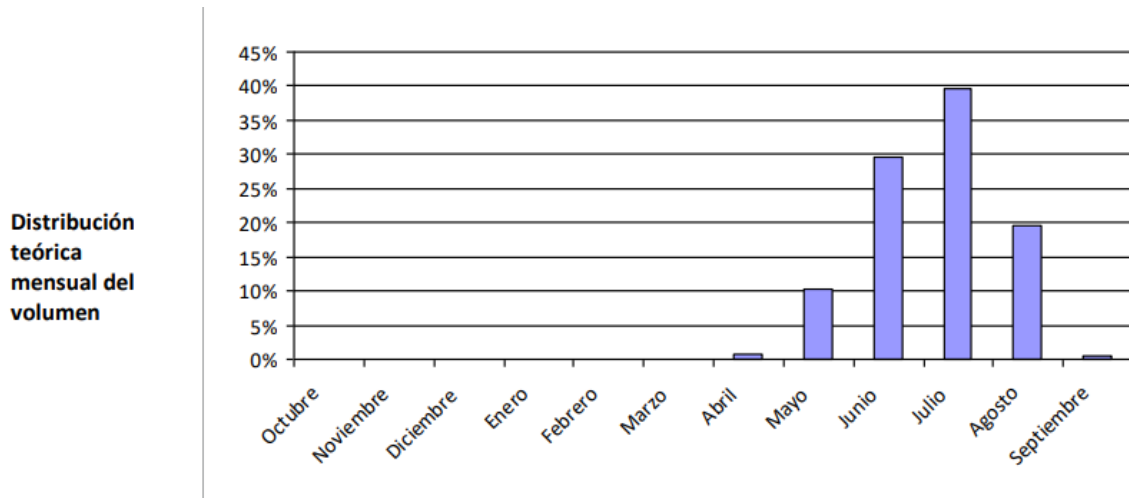


Figura 60. Distribución teórica porcentual de la demanda agrícola de la Plana Utiel-Requena. Fuente: CHJ

La metodología empleada para realizar la restitución a régimen natural se ha basado en la adición de la serie diaria de bombeos al modelo HBV. Su funcionamiento se centra en plantear el modelo precipitación-escorrentía de un régimen alterado a partir de restar la serie diaria de bombeos al recurso almacenado en la celda subsuperficial (Figura 61). Este proceso permite calibrar el modelo en los dos puntos de estudio respecto a las series restituidas con las mismas condiciones de partida y obtener unos parámetros que reflejen las características de las cabeceras de ambas cuencas. Se considera que los parámetros que resulten de la calibración con bombeos respecto la serie restituida son válidos para la aplicación del régimen natural.

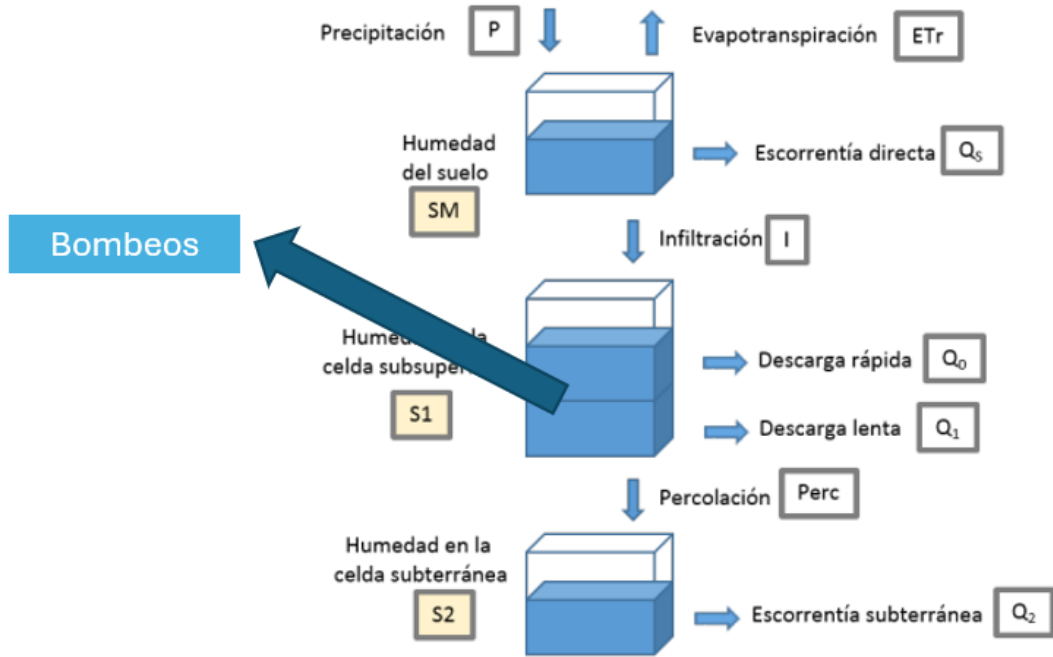


Figura 61. Procedimiento de introducción de los bombeos en la celda subsuperficial del modelo HBV

Bellús con bombeo

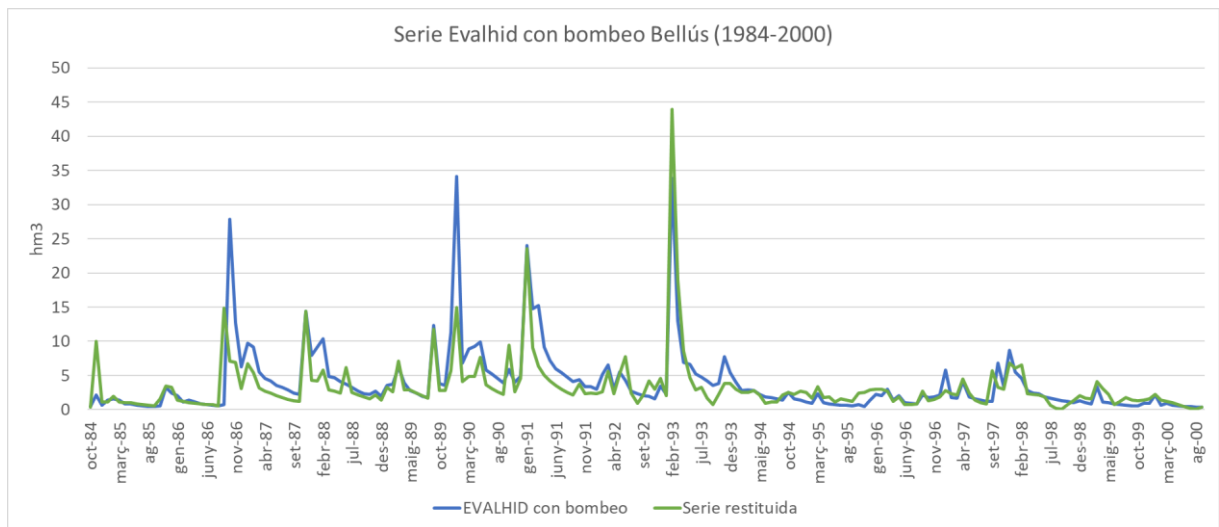


Figura 62. Resultado de la calibración de la serie EVALHID con bombeo en Bellús

La Figura 62 permite observar el cambio en la serie simulada que supone calibrar respecto a la serie restituida con la adición de los bombeos en la salida del embalse de Bellús. La reducción de agua en el modelo permite un mejor ajuste de la serie simulada respecto a la serie restituida. De esta manera se consiguen los parámetros que rigen el flujo hídrico,

y se consideran aplicables para el estudio en régimen natural sin bombeos. La serie simulada tiende aún a generar picos de caudal superiores a la serie restituida, pero consigue reproducir correctamente la distribución del caudal base y con valores mucho más similares. La función objetivo Nash obtiene un valor de 0.486, por lo que se puede considerar un éxito la aplicación de la metodología en Bellús.

El modelo muestra robustez durante el periodo de validación, pues se obtiene un buen ajuste durante los periodos sin precipitación y con una previsión adecuada de las crecidas, aunque en algunas no se alcanza el valor que marca la serie restituida (Figura 63). En definitiva, la mejora es considerable pero no se alcanza un ajuste tan bueno como en los puntos más altos de la cuenca del Júcar.

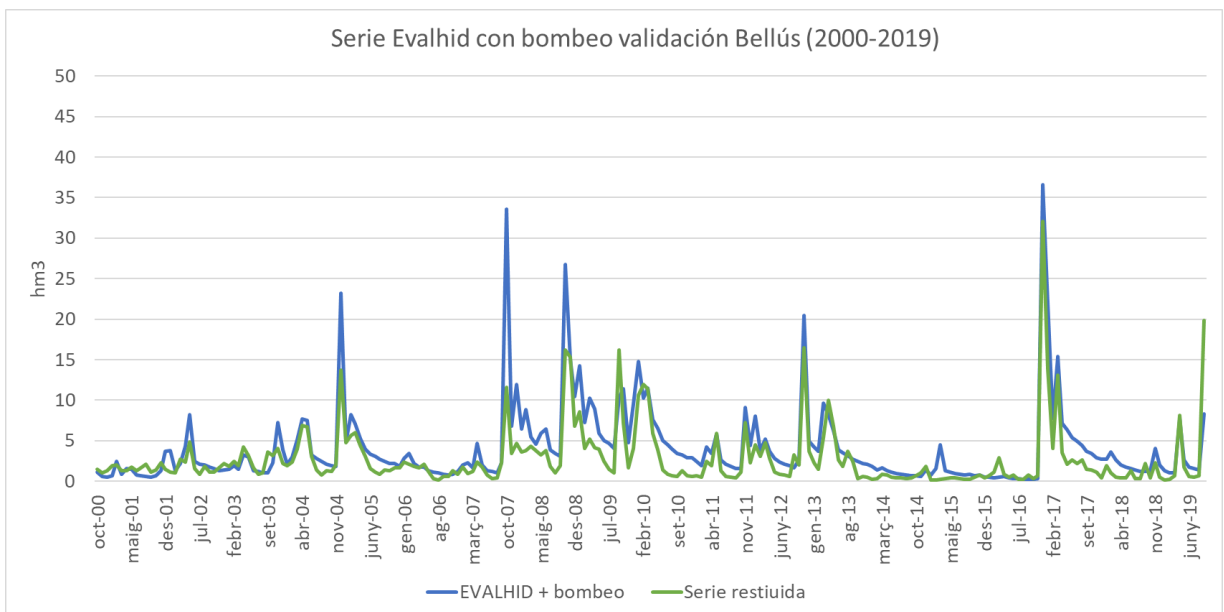


Figura 63. Resultados de validación de la serie EVALHID con bombeos en Bellús

Forata con bombeos

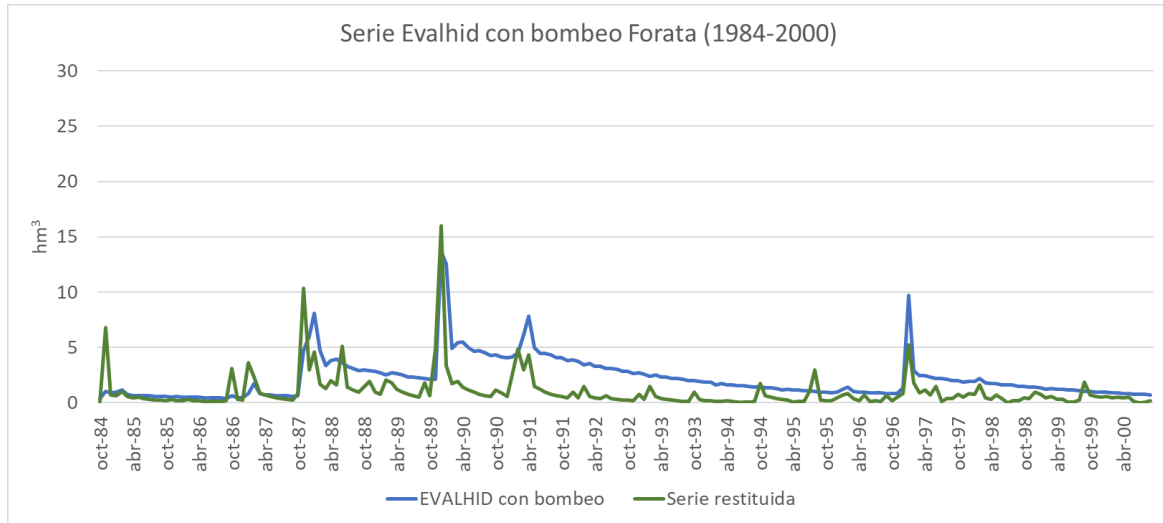


Figura 64. Resultados de la calibración de la serie EVALHID con bombeos en Forata

La inclusión de los bombeos en el modelo precipitación-escorrentía también permite un cambio importante en la serie EVALHID de Forata. Los valores descienden hasta obtener un mejor ajuste respecto la serie restituida y una mejor reproducción de los picos de crecida. Aunque la mejora es evidente, la serie EVALHID no logra reproducir la variabilidad que posee la serie de caudales restituidos y sigue sobrevalorando los valores observados, especialmente durante el periodo comprendido entre 1991 y 1996, donde se produce un lento descenso de los valores sin cambios en la tendencia (Figura 64). El valor de la función objetivo, -0.401, muestra la mejoría al aplicar los bombeos y disminuir el agua que genera el modelo, pero se observa que la calibración no ha sido tan exitosa como en Bellús y no consigue una buena reproducción de los caudales restituidos. Durante el periodo de validación, la serie restituida presenta valores muy bajos de caudales, cuyos picos de crecida no superan, excepto en una fecha, los dos hectómetros cúbicos (Figura 65). La serie EVALHID tiende a situarse en los puntos más bajos de la serie restituida sin conseguir un buen ajuste.

Los malos resultados en la calibración en Forata pueden deberse a la mayor incertidumbre que presentan las series restituidas debido a la extensión de los campos de cultivo en la cuenca del río Magro junto con el mayor número de masas de agua superficial a analizar.

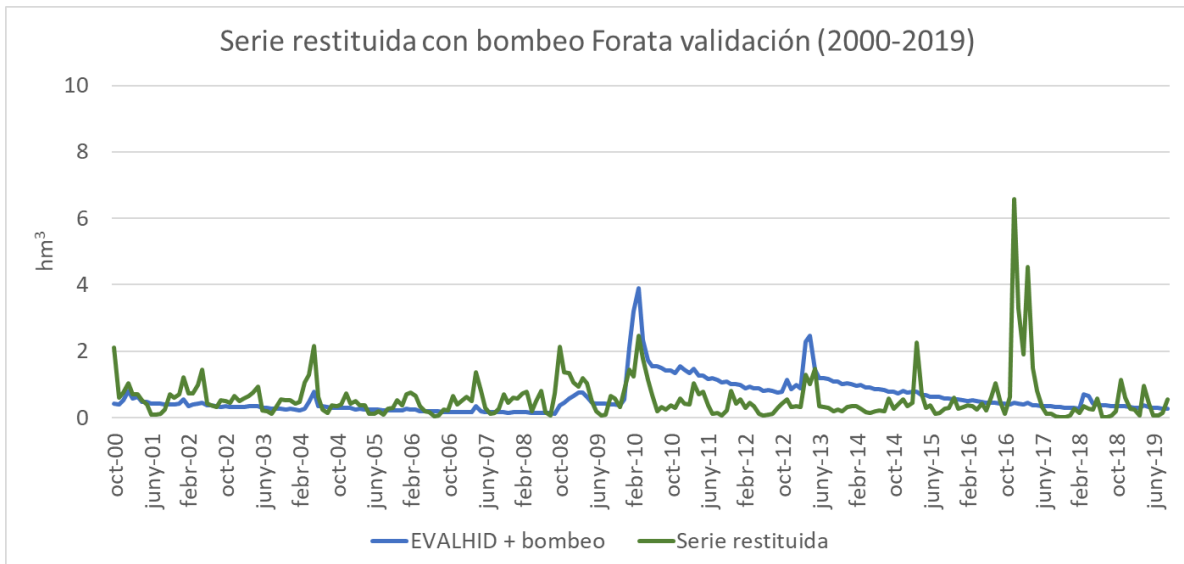


Figura 65. Resultados validación serie EVALHID con bombeos en Forata

Se puede considerar que el factor principal que determinaba la diferencia de magnitud de las series se debía a la no consideración de los bombeos en la restitución. Las series restituidas están sujetas a una alta incertidumbre per se, por ello, es necesario tener en cuenta todos los factores antrópicos que puedan afectar a los caudales estudiados.

Sueca

En la cuenca baja del río Júcar se unifica el propio Júcar junto con sus afluentes, Albaida y Magro, y fluye hasta la desembocadura en Cullera, donde justo antes se encuentra la estación de aforo de Sueca. A pesar de las numerosas detracciones existentes entre los puntos de estudio de Tous, Bellús y Forata, la serie modelada en Sueca consigue unos resultados muy buenos en comparación con los anteriores.

La Figura 66 muestra cómo la serie de EVALHID logra capturar la tendencia de la serie restituida en Sueca, con una buena simulación de los diferentes picos de crecida, aunque no representa correctamente el caudal base ni las bajadas de caudal, especialmente durante los meses de verano. Durante estos meses, la serie restituida muestra descensos bruscos en el caudal mensual, mientras que la serie modelada siempre indica la presencia de un caudal base constante. Este hecho sugiere que la serie restituida refleja cambios más abruptos entre crecidas y bajadas de caudal, llegando a indicar en diversos periodos que no se genera recurso.

La serie muestra un descenso generalizado en la tendencia de las aportaciones a partir de la sequía del año 1993 hasta mediados de la década posterior. Durante el periodo de validación, destaca la disminución del caudal base que tiene inicio en el año 2010, con un repunte en 2017 que coincide con la mayor crecida de todo el periodo estudiado.

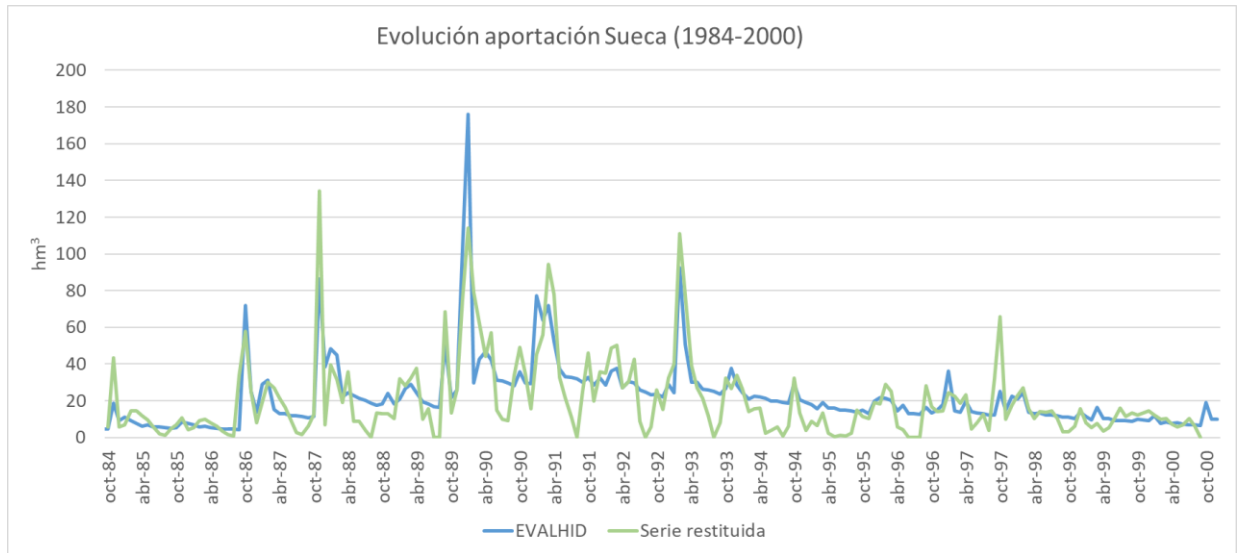


Figura 66. Resultados calibración serie EVALHID en Sueca

Otro hecho destacable en las gráficas es la influencia de los episodios de precipitaciones intensas en el mediterráneo valenciano, especialmente la llamada gota fría. Durante los años en que estos episodios no son frecuentes o menos intensos, los picos anuales se encuentran en torno los 40 hm³, no muy alejados del caudal base. En contraste, en los años donde los eventos de precipitaciones son más importantes, la diferencia entre los caudales de crecida y el caudal base se incrementa ampliamente. La aportación de esta cuenca intermedia presenta una alta variabilidad, puesto que el caudal base que proviene de las aportaciones subterráneas tiende a ser más escaso que en las otras cuencas estudiadas, pero en épocas de lluvia, se convierte en la cuenca que más recurso genera.

La serie de validación en Sueca muestra una evolución de las aportaciones parecida, con periodos donde la serie EVALHID se comporta como una línea constante y otros donde adquiere la variabilidad de la serie restituida (Figura 67).

El valor de la función objetivo de la calibración es de 0.625, muy superior a los valores de calibración obtenidos a lo largo de la cuenca del río Júcar, y hace patente la buena reproducción que el modelo hidrológico realiza en el final de cuenca. El buen rendimiento

de la calibración también se debe destacar teniendo en cuenta la alta variabilidad a la que está sometida la serie restituida en Sueca por el régimen de precipitaciones que presenta el litoral de la provincia de Valencia y su influencia en los valores de caudales registrados.

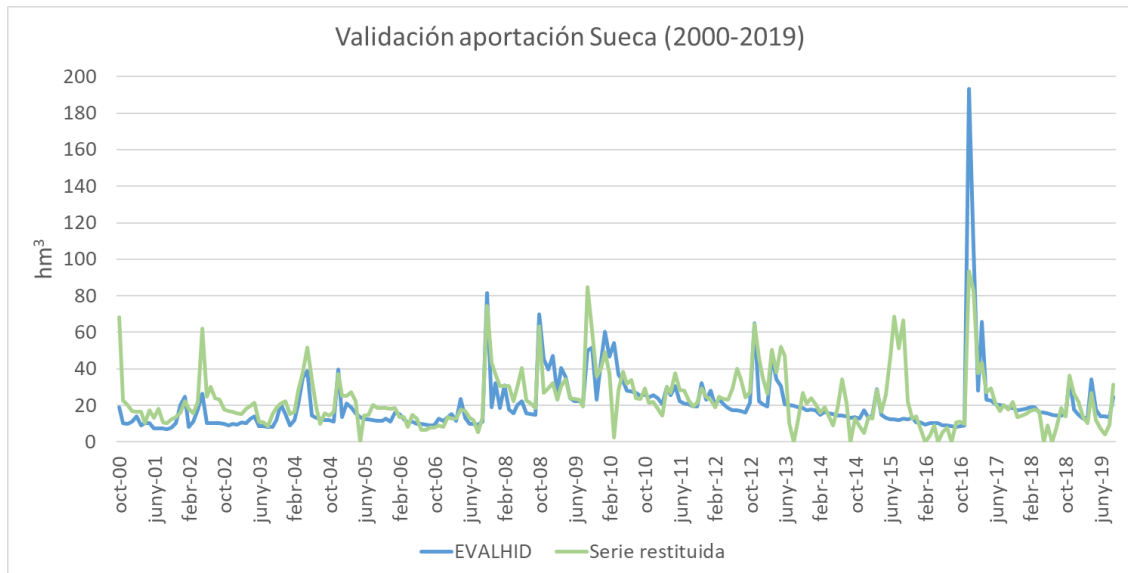


Figura 67. Resultados validación serie EVALHID en Sueca

Tras haber analizado los gráficos donde se muestran los resultados y su comparación con la serie restituida mediante la cual se ha calibrado, se observa que el modelo HBV consigue una mejor calibración respecto aquellas series restituidas cuyo régimen se encuentra más influenciado por precipitaciones y permite una mayor amplitud en los valores alcanzados.

A continuación, se muestran los valores de los parámetros que rigen el comportamiento de cada serie simulada (Tabla 6). Estos parámetros son específicos para cada cuenca intermedia de estudio y reflejan las características de cada área de estudio.

Se puede apreciar cómo las cuencas de cabecera presentan valores distintos a los de la cuenca media y baja, con una menor percolación y, en el caso de Alarcón, Bellús y Forata con las menores tasas de infiltración de agua (Beta). Otro dato destacable es que las cuencas de cabecera del Júcar y sus afluentes presentan los valores más elevados dentro de los parámetros de descarga lenta del tanque subsuperficial y descarga del tanque

subterráneo. De la misma manera se deben destacar las diferencias entre las cabeceras de los ríos de la cuenca del Júcar marcadas por los parámetros k_1 y k_2 que alcanzan Bellús y Forata en comparación con Alarcón y Contreras. Se muestra la mayor dependencia de los primeros de las aportaciones subterráneas para la formación de las masas fluviales.

La cuenca media se caracteriza por una mayor dependencia del flujo subterráneo representado en el elevado valor de la constante de percolación obtenido de la calibración. Cofrentes y Tous obtienen valores prácticamente similares a excepción del parámetro de capacidad de campo. Este hecho genera confianza en el método empleado al ser dos puntos de estudio cercanos.

La cuenca baja del Júcar, definida en el punto de estudio de Sueca, obtiene parámetros dentro de la media de la cuenca completa. Se puede destacar el valor 0.20 en la K_{perc} , que podría ser indicador de la menor dependencia de los recursos subterráneos en la generación de caudal intermedio.

La capacidad de campo tiende a ser homogénea en toda la cuenca con la excepción del valor que se obtiene en Cofrentes. Por otro lado, el parámetro de punto de marchitamiento varía más según la cuenca de estudio, alcanzándose el mayor valor en Alarcón y el menor en Tous, lo cual es lógico teniendo en cuenta el régimen de precipitaciones en ambas zonas.

	Beta	FC	Pwp	Lmax	K0	K1	K2	Kperc
Alarcón	3.338	299.99	257.99	72.24	0.372	0.066	0.001	0.09
El Molinar	1.8	299.99	139.92	56.94	0.29	0.035	0.001	0.25
Contreras	1.8	206.756	186.018	26.531	0.315	0.04	0.004	0.125
Cofrentes	1.8	119.325	107.38	44.753	0.388	0.035	0.001	0.25
Tous	1.8	299.99	95.319	50.654	0.383	0.035	0.001	0.25
Bellús	2.1	290.31	155.144	83.2	0.19	0.082	0.004	0.25
Forata	4.479	298.471	178.565	77.782	0.465	0.080	0.002	0.18
Sueca	1.95	299.99	114	39.455	0.402	0.070	0.001	0.20

Tabla 6. Valores de los parámetros de cada subcuenca según el punto de descarga

7.3. Modelo completo cuenca del Júcar

En este apartado se procede a explicar cómo se ha generado el modelo completo de la cuenca del Júcar y cómo se han aplicado los parámetros obtenidos mediante la calibración de las series restituidas a cada una de las subcuencas que conforman el área de estudio.

Una vez se ha comprobado que los parámetros alcanzados a partir de la calibración son los óptimos, se ha decidido crear en EVALHID el modelo completo desagregado de la cuenca del Júcar. Esto permite disponer de series de caudales diarios en toda la cuenca para cada una de las masas de agua superficial definidas por la CHJ, lo cual posibilita la mejora en la definición de los regímenes de caudales ecológicos en toda la cuenca del río Júcar, entre otras muchas aplicaciones.

Se incluye cada subcuenca en EVALHID mediante su código para facilitar la identificación y posteriormente se unen al punto de descarga. Por ejemplo, la subcuenca 18-14-01-02 se une a la aportación de El Molinar. A cada masa de agua superficial se le introduce su superficie, precipitación y ETP con los parámetros que le corresponden según su punto de descarga que se encuentran en la tabla 6. Los datos característicos que se introducen en cada subcuenca rigen las diferencias en la cantidad de recurso que genera cada una de ellas. Finalmente se consigue formar el modelo completo de la cuenca del Júcar desagregado que permite obtener las series diarias de cada una de ellas en régimen natural tras la simulación del modelo en la interfaz EVALHID en escala diaria (Figura 68).

Para mejorar la implantación del modelo, se realizó una modelación mediante SIMGES (Andreu et al., 1996) para incluir las conducciones entre las diferentes aportaciones intermedias. Estas se van uniendo mediante conducciones de la misma manera en que confluyen de manera natural los diferentes sistemas fluviales dentro de la cuenca del Júcar. La modelación conjunta se realiza con el fin de representar el flujo hídrico entre las cuencas, lo que permite obtener la suma de caudales en diferentes puntos y tener la suma de todos en la desembocadura definida mediante el nudo final.

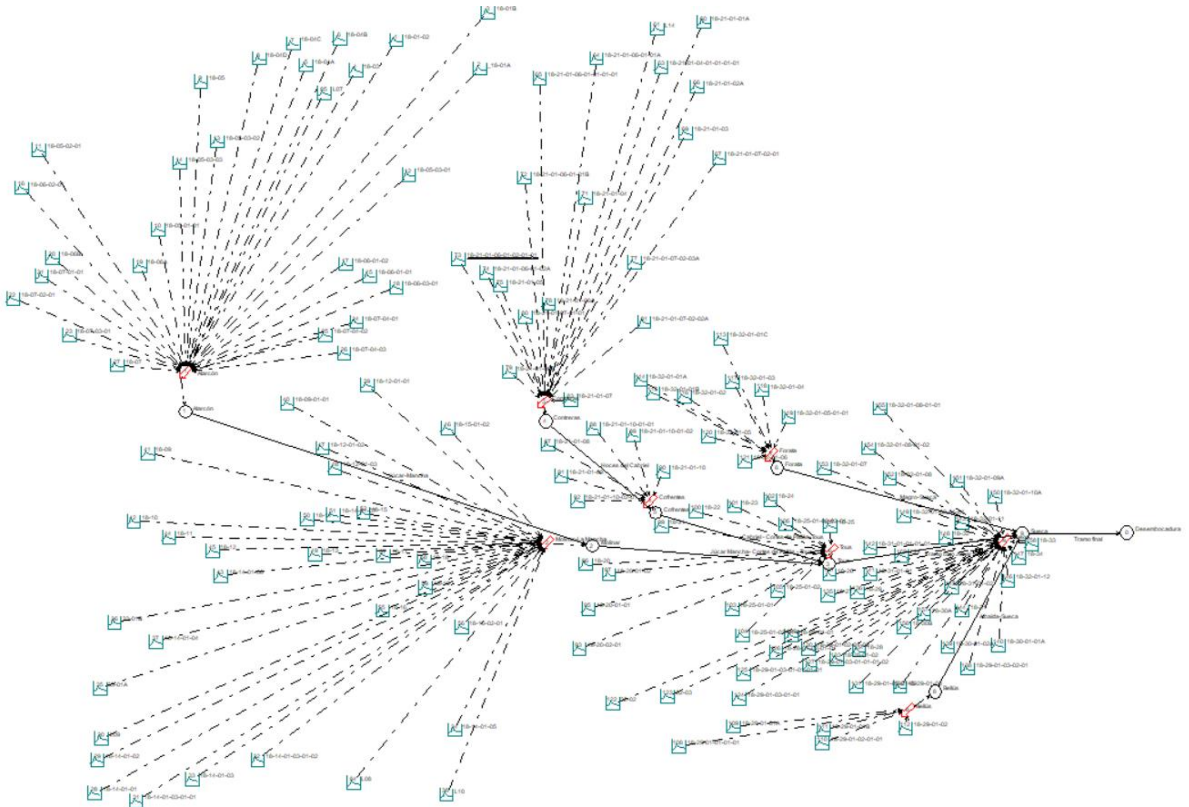


Figura 68. Modelo desagregado de la Cuenca del Júcar completo desarrollado en EVALHID

La simulación del modelo permite obtener series diarias de aportación de cada una de las masas de agua superficial, lo cual posibilita un análisis más detallado de su respuesta hidrológica ante eventos de precipitación relevantes o de sequía. El estudio de las subcuencas proporciona la información necesaria para poder gestionar adecuadamente la superficie estudiada.

La Figura 69 es buen ejemplo del régimen hidrológico de una masa en las cuencas de cabecera del sistema. Se observa una serie basada en una alta variabilidad en forma de cambios bruscos en los caudales diarios simulados, con picos altos de descarga muy localizados seguidos de periodos de caudal bajo más prolongados. Esto refleja la mayor influencia de los periodos de precipitaciones en la distribución y cantidad del caudal formado en estas áreas.

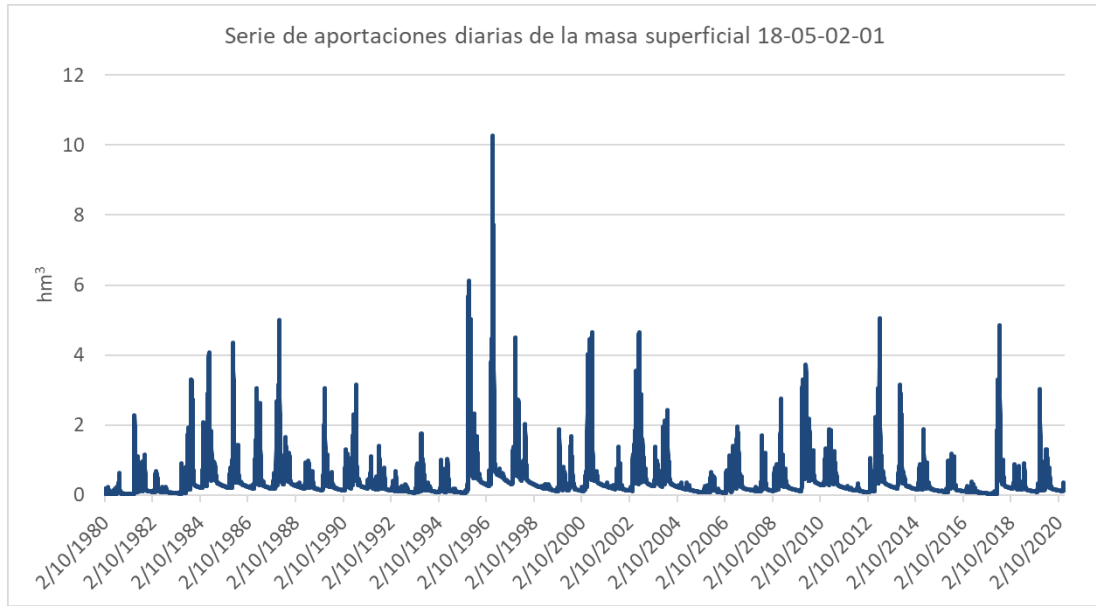


Figura 69. Serie diaria de aportaciones de la masa hidrológica superficial 18-05-02-01 de la cuenca intermedia de Alarcón

Las masas pertenecientes al tramo medio del Júcar presentan unos resultados muy diferentes en comparación. El caudal generado por cada una de ellas tiende a ser menor y generalmente se mantiene dentro de un rango de valores más estrecho, como se muestra en el ejemplo (Figura 70). Los periodos de crecida no generan grandes cantidades de caudal debido a que las lluvias tienen menor influencia en esta zona de estudio. En su lugar, las aportaciones subterráneas, más constantes por definición, son las que definen el flujo hídrico en las masas de la cuenca media.

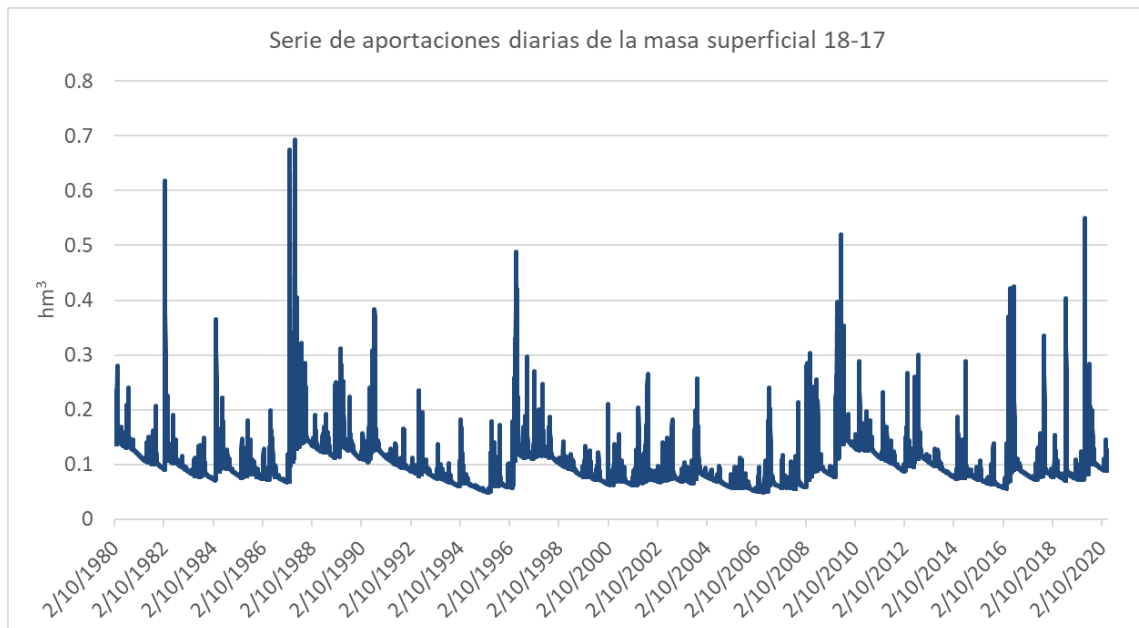


Figura 70. Serie diaria de aportaciones de la masa de agua superficial 18-17 de la cuenca intermedia de El Molinar

La obtención de series diarias de caudales para cada una de las subcuencas permitirá un ajuste más preciso en aquellas subcuencas críticas cuya gestión sea esencial. Cada una de las masas de agua superficiales que se extienden a lo largo del Júcar tiene un funcionamiento característico condicionado por el área de estudio donde se encuentran, como se ha podido observar en las figuras anteriores.

La formulación del modelo desagregado permite también analizar el caudal que desemboca mediante la suma de cada uno de los puntos de aportación situados en el final de cada área de estudio delimitada. Esto facilita realizar comparaciones respecto las series restituidas acumuladas o bien conocer cuál es el caudal acumulado en régimen natural que el modelo prevé en un punto determinado de la cuenca con el fin de gestionar su recurso adecuadamente.

La evolución de la serie acumulada en el final de la cuenca del Júcar fruto del modelo desagregado en régimen natural se compara frente a la serie restituida (Figura 71). El análisis de los resultados es positivo: se consigue una serie cuya distribución temporal de los datos es, en general, bastante similar a la serie restituida en régimen natural que ofrece la CHJ. Los picos de crecida más importantes no son reproducidos por el modelo con la misma intensidad, pues tiende a su sobrevaloración, de la misma manera que en los periodos de descenso de caudal tiende también a sobreestimar la cantidad de recurso, como pasa en algunas cuencas intermedias estudiadas. Aun así, consigue predecir la sequía situada en los inicios de la década de los años noventa y no presenta ningún periodo donde exista una desvinculación entre ambas series.

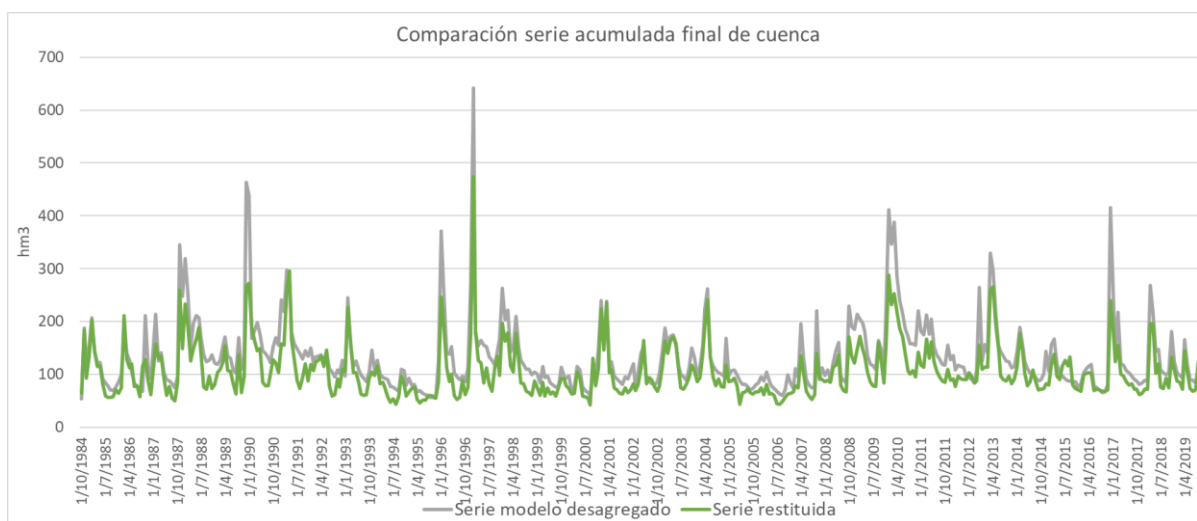


Figura 71. Comparación series acumuladas al final de la cuenca del Júcar

En conclusión, el modelo consigue captar las diferentes respuestas hidrológicas que otorgan las masas de agua superficial según su ubicación en la cuenca. Además, se demuestra su capacidad para formar series diarias que permiten predecir eventos hidrológicos significativos y gestionar de manera detallada la zona estudiada.

7.4. Cálculo patrones diarios

En este último apartado se detalla el método para estimar los factores de variación diaria para cada masa de agua superficial en la cuenca del Júcar a partir de los resultados obtenidos. Estos factores son cruciales ya que permiten comprender el patrón de distribución de caudal diario dentro del mes de estudio. El procedimiento se basa en la obtención en cada subcuenca de patrones para cada mes a partir de la agregación de caudales diarios para producir un valor mensual y, posteriormente, aplicar el cociente entre el dato diario del modelo EVALHID y el mensual calculado. La ecuación que se emplea se muestra a continuación:

$$\sum_{i=1}^n q_i^M = Q^M$$
$$FV_i^M = \frac{q_i^M}{Q^M}$$

Donde:

- q_i^M es el caudal diario del día i del mes M
- Q^M es el caudal agregado mensual del mes M
- n es el número total de días en el mes M
- FV_i^M es el factor de variación del día i del mes M

Para cada masa de agua superficial de toda la cuenca del Júcar se tiene una serie de factores de variación que representa el patrón temporal de caudales desde el año 1980 hasta el 2020 (Tabla 7). Cada valor que aparece es la parte respecto del caudal total mensual que se genera en ese día determinado.

Los patrones temporales pueden ser aplicados a series de aportaciones en escala mensual y así generar series en escala diaria.

Fecha			Masas de agua superficial				
Día	Mes	Año	18-01-02_	18-01A_	18-01B_	18-03_	18-04A_
1	10	1980	0.07005231	0.07266965	0.07594742	0.07168322	0.07013495
2	10	1980	0.06093347	0.0632101	0.0660612	0.06235207	0.06100534
3	10	1980	0.05323534	0.05522435	0.05771525	0.05447472	0.05329814
4	10	1980	0.04673632	0.04848399	0.05066931	0.04782439	0.04679145
5	10	1980	0.04126483	0.0428015	0.04472133	0.04223762	0.04132668
6	10	1980	0.03664071	0.03802169	0.03969994	0.03749265	0.03668397
7	10	1980	0.03294748	0.03424587	0.03585937	0.03394146	0.03313246
8	10	1980	0.02960652	0.03076963	0.03221569	0.0304876	0.02976491

Tabla 7. Factores de variación por masa de agua superficial y día

8. Conclusiones

Una vez se ha analizado el estudio de la metodología de reducción de escala de series de caudales más adecuada para la DHJ y su aplicación en la cuenca del río Júcar, se pueden extraer una serie de conclusiones del presente trabajo:

- Se ha demostrado que el uso de series de caudales modeladas mediante EVALHID para la reducción de escala es significativamente mejor que el uso de series generadas a partir de patrones históricos por dos razones principales: una, que se consigue una mejor función objetivo en cinco de los seis puntos de estudio piloto. Y dos, que la serie interpolada-normalizada no puede extrapolarse a las zonas aguas abajo de los embalses de la DHJ al no contar con la fiabilidad de poder trasladar su metodología donde sólo se encuentran disponibles series restituidas en escala mensual.
- Los resultados obtenidos de la calibración en escala diaria del modelo precipitación-escurrentía HBV han sido positivos en prácticamente todas las estaciones. Se ha observado que la utilización de la función objetivo Nash-Stucliffé logra un mejor ajuste respecto las series de caudales con mayor dependencia de la escurrentía superficial y con picos de crecida importantes. Ejemplo de ello son los buenos resultados obtenidos en Cuenca y Pajaroncillo con funciones objetivo de 0.85 y 0.76 respectivamente.
- La posibilidad de acumular los datos diarios de precipitación y ETP en escala mensual para calibrar respecto las series restituidas en EVALHID facilita la extrapolación de la metodología a la cuenca del Júcar completa.
- Los puntos de estudio de la cuenca del río Júcar donde mejor funciona el modelo HBV corresponden a las áreas de la cuenca alta en Alarcón y Contreras (0.9 y 0.8 respectivamente), y baja en Sueca (0.5). Se demuestra que el modelo obtiene mejores resultados en aquellas zonas donde la incertidumbre de las series restituidas es menor,

como es el caso de las dos estaciones de cabecera, y el régimen de precipitaciones es importante y genera variaciones significativas en las series de caudales.

- No se obtienen resultados positivos en los puntos de estudio de la cuenca del río Júcar de Cofrentes, El Molinar y Tous. Se considera que la mayor incertidumbre a la que están sujetas las series restituídas de estas áreas de estudio, sumado a la mayor influencia de las aportaciones subterráneas, conlleva una peor calibración.
- Los modelos hidrológicos, una vez calibrados, permiten detectar incoherencias en las metodologías de restitución. Los puntos de estudio de Bellús y de Forata disponían de series restituídas que no contemplaban los bombeos en su cabecera, dando lugar a una infravaloración del recurso natural. La inclusión de los bombeos en la serie EVALHID para su calibración ha logrado mejorar el ajuste de la calibración.
- La aplicación del modelo precipitación-escorrentía en la cuenca del río Júcar consigue obtener series diarias de caudales en régimen natural a partir de las características hídricas que presenta el modelo HBV del área de los siete puntos de estudio. Con ello se ha logrado obtener series en escala diaria en cada masa de agua superficial.
- Los resultados obtenidos pueden ser utilizados para mejorar la definición de los regímenes de caudales ecológicos con su aplicación en escala diaria para cada una de las masas de agua superficial.

9. Líneas de investigación futuras

En este último apartado del trabajo, se proponen algunas líneas de investigación cuyo desempeño sería interesante para ampliar y mejorar los conocimientos acerca de los objetivos abordados:

En primer lugar, sería beneficioso el desarrollo de una nueva metodología para la obtención de series restituídas y que esta fuese aplicada de manera uniforme en todos los puntos de la cuenca. Esto garantizaría que no se pasaran por alto aspectos importantes, como los bombeos en la cuenca Bellús y Forata, que no se han tenido en consideración.

Siguiendo la misma línea, sería muy ventajoso para el presente proyecto la disponibilidad de series de caudales restituídos en escala diaria. Esto permitiría una calibración directa del modelo precipitación-escorrentía en escala diaria, lo que mejoraría la precisión de las series hidrológicas obtenidas.



Para ampliar la perspectiva y mejorar la calibración del modelo, sería interesante utilizar diferentes tipos de funciones objetivo. Esto permitiría evaluar diversos aspectos y ajustes posibles de la serie simulada en la calibración y podría ayudar a una mejor representación del comportamiento hidrológico en la cuenca del Júcar.

Por último, dado los buenos resultados del estudio, se podría plantear la inclusión de la herramienta EVALHID en la planificación y gestión de otros sistemas de recursos hídricos que requieran un análisis detallado. Se ampliaría el alcance y la aplicabilidad de la herramienta, lo que permitiría la realización de más proyectos relacionados con los recursos hídricos.

Bibliografía

Akima, Hiroshi. "A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures." *Journal of the ACM (JACM)* , 17.4, 1970, pp. 589–602.

Amblar-Francés, M. P., Ramos-Calzado, P., Sanchis-Lladó, J., Hernanz-Lázaro, A., Peral-García, M. C., Navascués, B., ... & Rodríguez-Camino, E. (2020). High resolution climate change projections for the Pyrenees region. *Advances in Science and Research*, 17, 191-208.

Andreu, J., Capilla, J., & Sanchís, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177(3–4), 269–291. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02963-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02963-X)

Cabrera, J. (2012). *Calibración de modelos hidrológicos*. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú.

Casas, A. (2013). *Evaluación del recurso hídrico en la cuenca del río Turia (España) mediante la aplicación de modelos semiagregados de Precipitación-Escorrentía*. Proyecto Final de Carrera. Escuela técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de València.

Castellanos-Osorio, G., López-Ballesteros, A., Pérez-Sánchez, J., & Senent-Aparicio, J. (2023). Disaggregated monthly SWAT+ model versus daily SWAT+ model for estimating environmental flows in Peninsular Spain. *Journal of Hydrology*, 623, 129837.

Confederación Hidrográfica del Júcar. (2022). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, Memoria-Anejo 2 Inventario de recursos hídricos. *Ciclo de planificación hidrológica 2022-2027*

Confederación Hidrográfica del Júcar. (2022). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, Memoria-Anejo 3 Usos y demandas. *Ciclo de planificación hidrológica 2022-2027*.

Confederación Hidrográfica del Júcar. (2022). Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, Memoria-Anejo 5 Régimen de caudales ecológicos. *Ciclo de planificación hidrológica 2022-2027*.

Gil Olcina, A. (2006). Regímenes natural y artificial del río Júcar. *Investigaciones geográficas*, n° 40, 2006; pp. 5-34.

Gómez M. (2008). “Plataforma modular integrada para la gestión del agua subterránea como recurso”. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Ciudad de la Habana.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

Paredes-Arquiola, J., Solera, A., Andreu, J., & Lerma, N. (2014). *Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos*. Retrieved from http://www.upv.es/aquatool/files/manuales/Manual_Tecnico_EvalHid.pdf

Paredes, J., Solera, A. Andreu, J., Lerma, N. (2017). *Manual técnico de la herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos* Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos. Universitat Politècnica de València.

Paredes, J. (2018) *Manual de usuario para el calibrador EVALHID*. Universitat Politècnica de València

Pellicer-Martínez, F., Martínez-Paz, J.M. (2016). The Water Footprint as an Indicator of Environmental Sustainability in Water Use at the River Basin Level. *Science of the Total Environment*, 571, 561-74. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.022>

Peral García, M. C., Navascués, B., & Ramos Calzado, P. (2017). *Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos*. AEMET.

Pérez-Martín M.A. (2005). *Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico con calidad de aguas integrado en sistemas de información geográfica para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco del Europea del Agua*. PhD. Tesis, Universidad Politécnica de Valencia, España

Pérez, R. (2010). *Nociones básicas de estadística*. Rigoberto Pérez

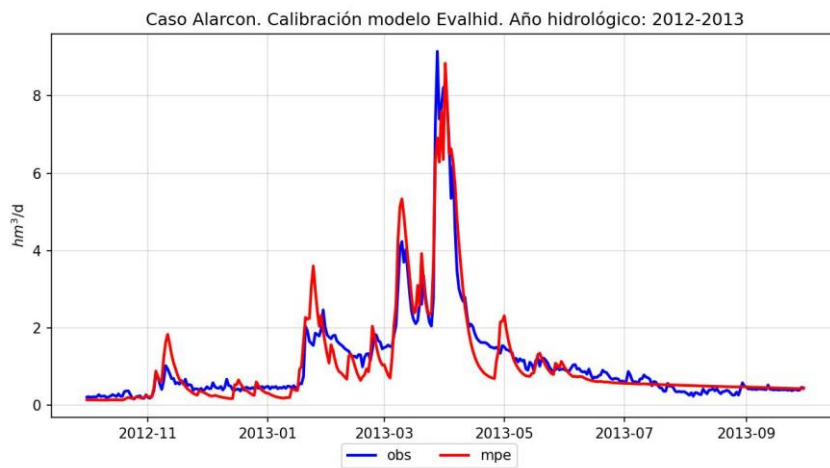
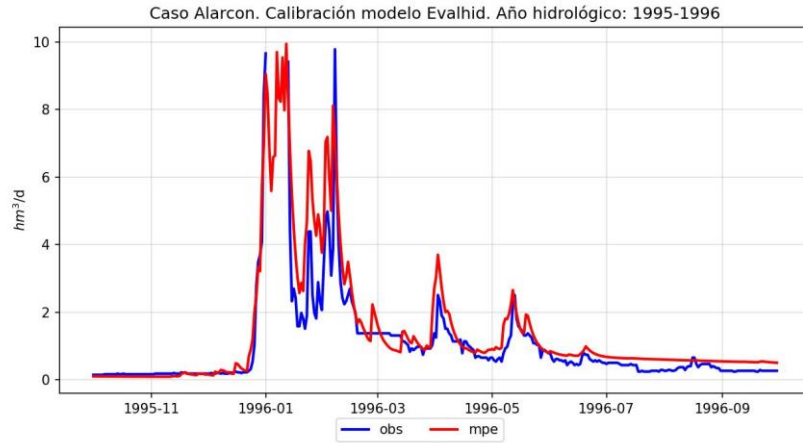


Shrestha, D. L., & Solomatine, D. P. (2008). Data-driven approaches for estimating uncertainty in rainfall-runoff modelling. *International Journal of River Basin Management*, 6(2), 109-122.

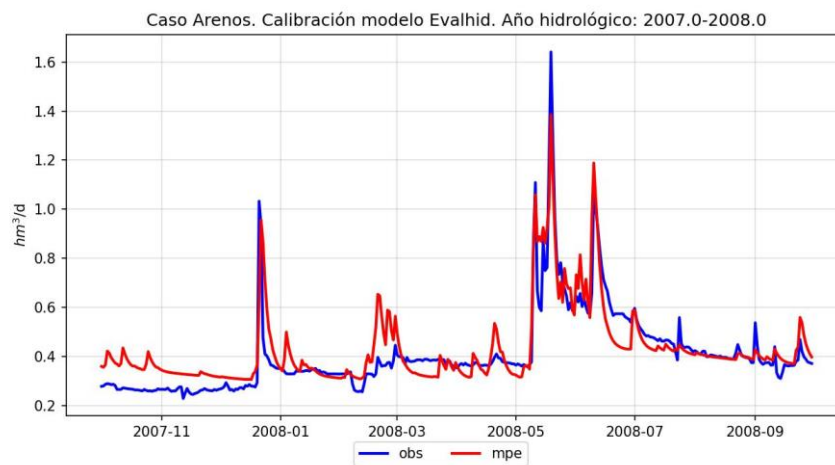
Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.

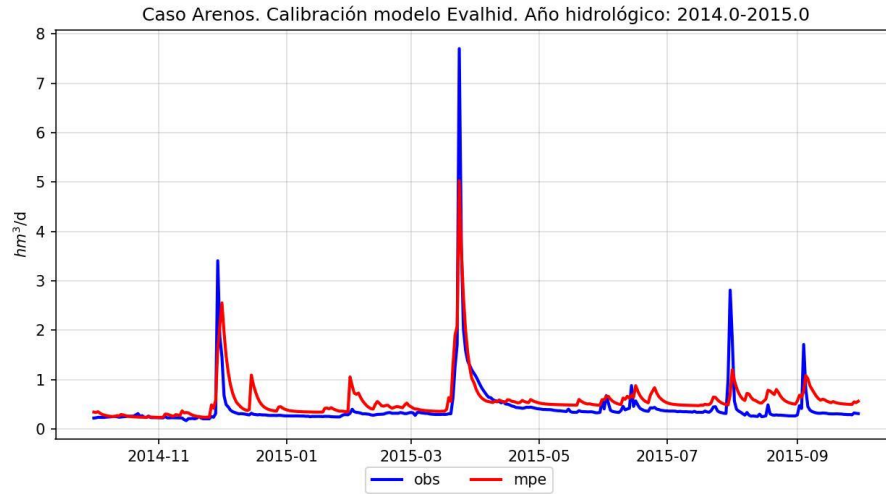
ANEJO 1. Resultados calibración EVALHID en los puntos de estudio piloto

1.1. Resultados calibración EVALHID en Alarcón

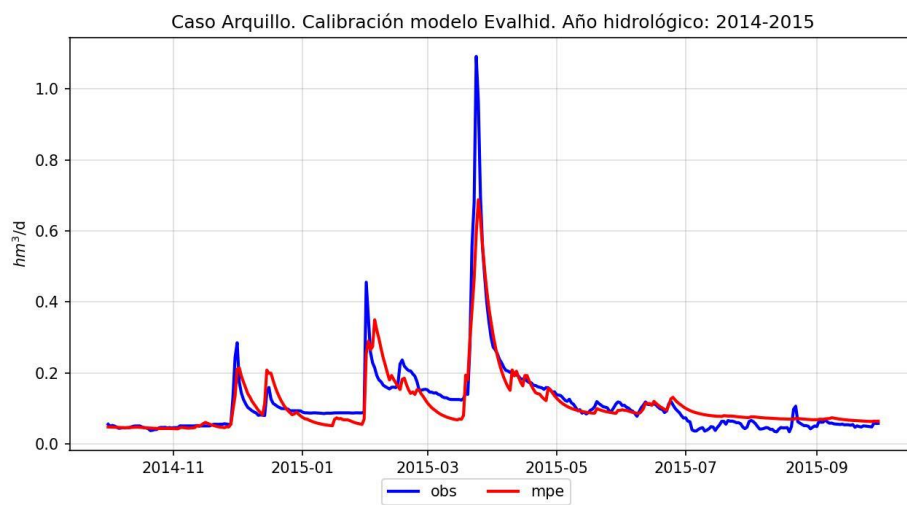
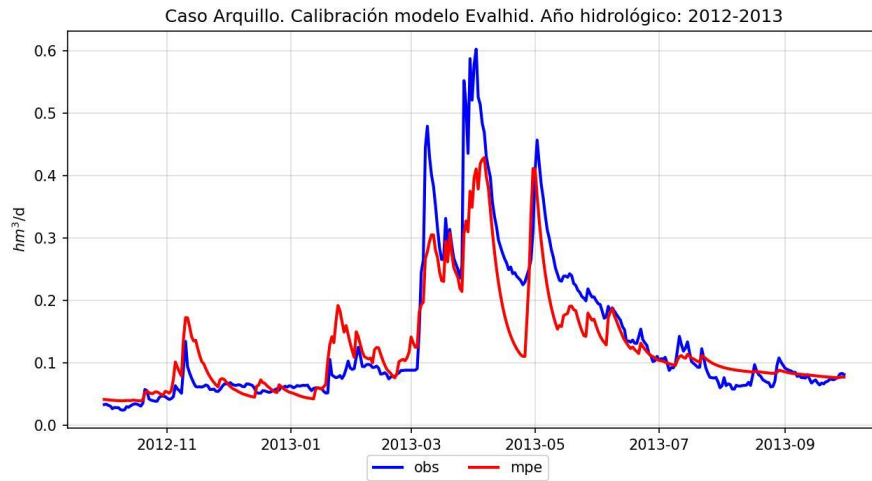


1.2. Resultados calibración EVALHID en Arenós

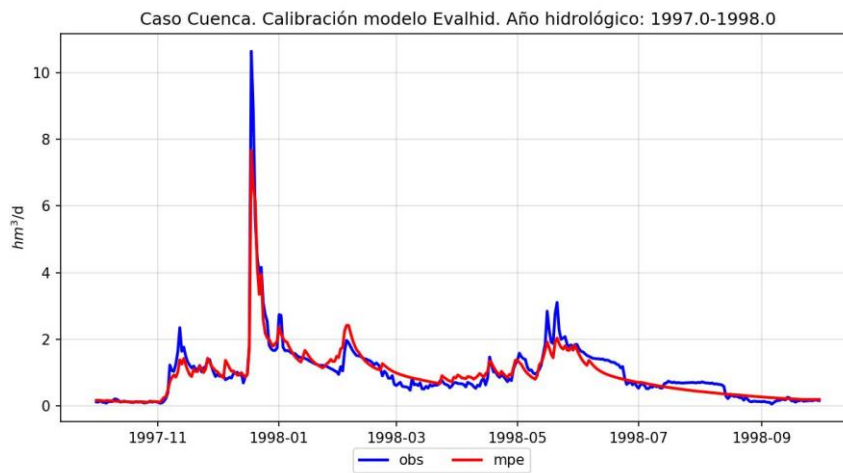
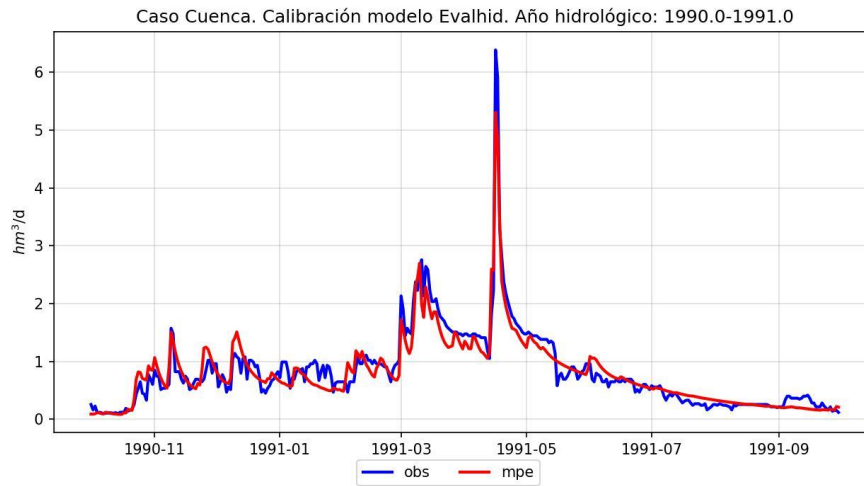




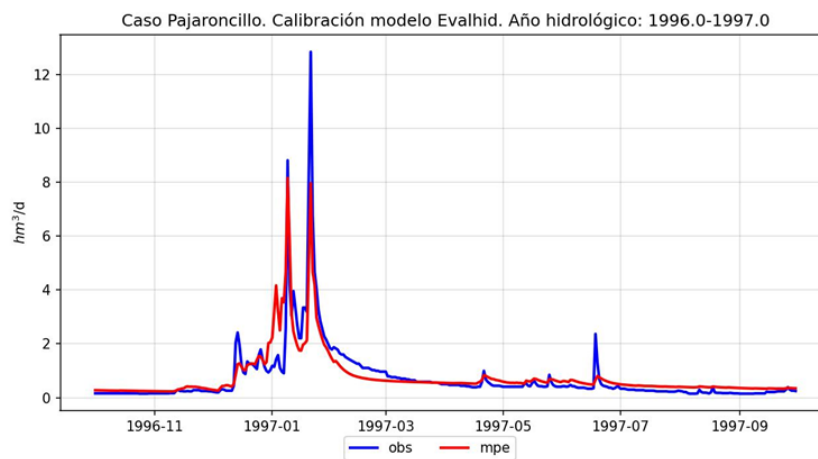
1.3. Resultados calibración EVALHID en Arquillo

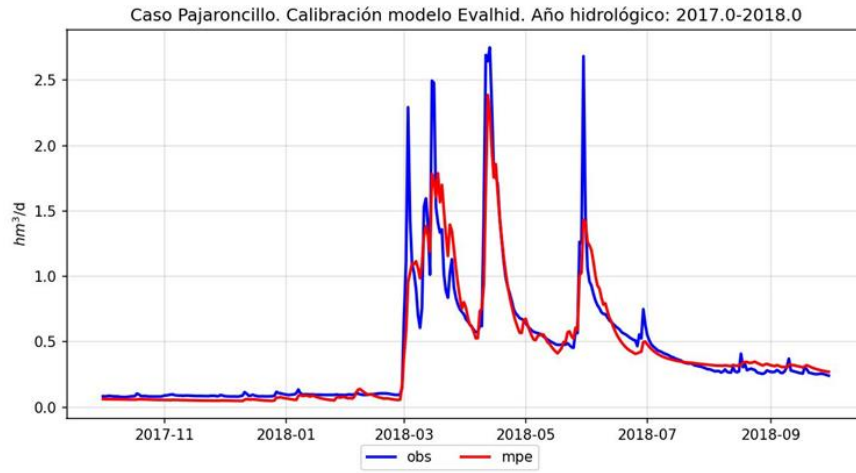


1.4. Resultados calibración en Cuenca

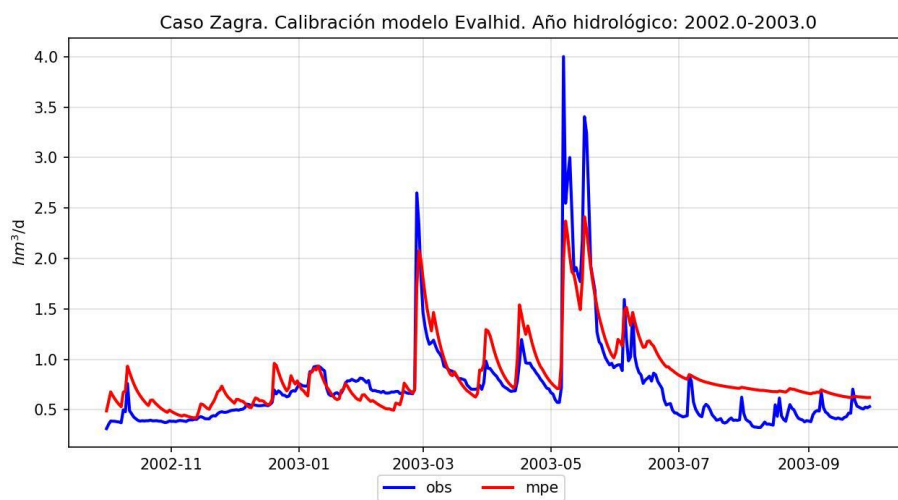
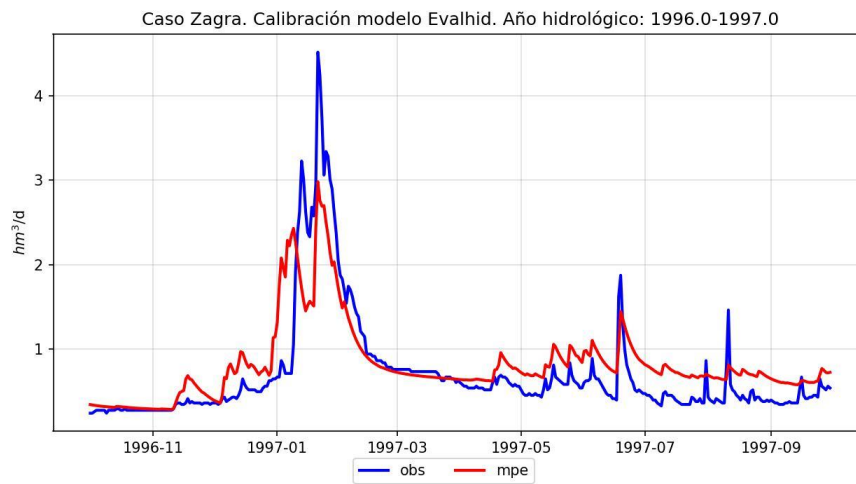


1.5. Resultados calibración en Pajaroncillo



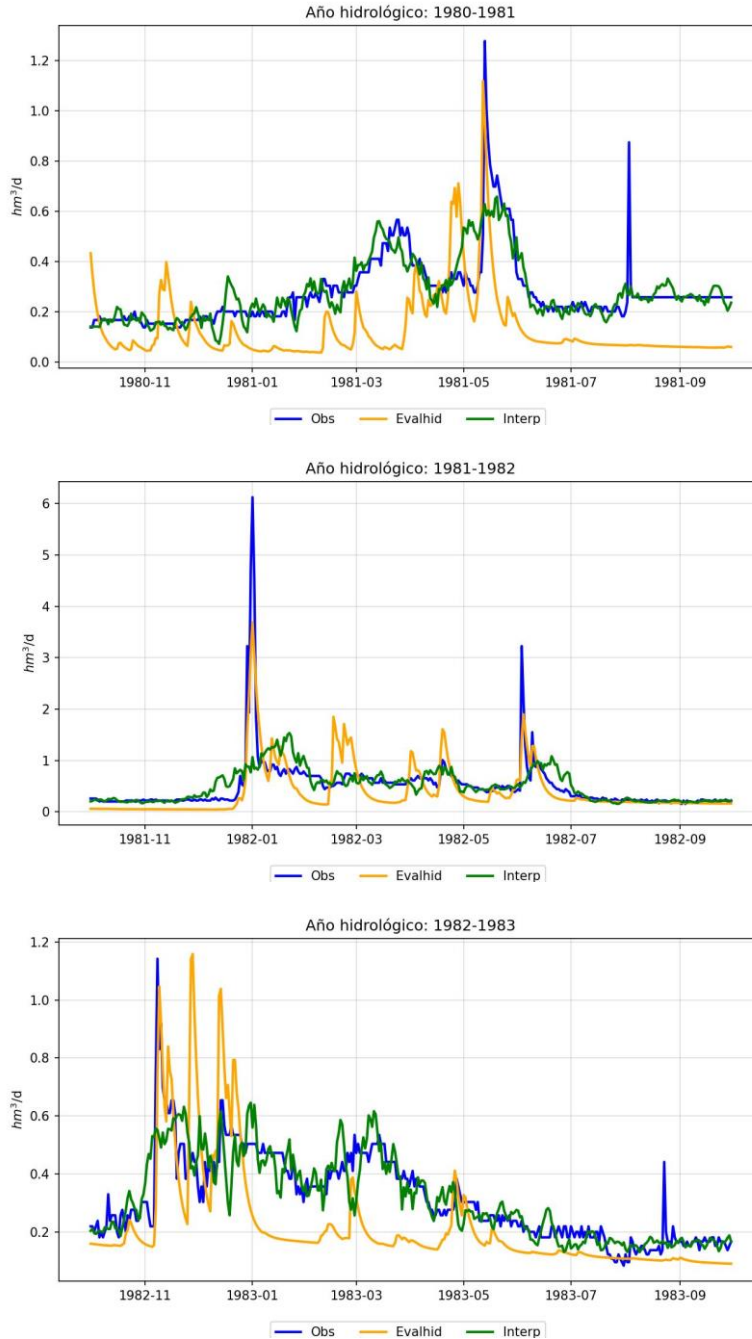


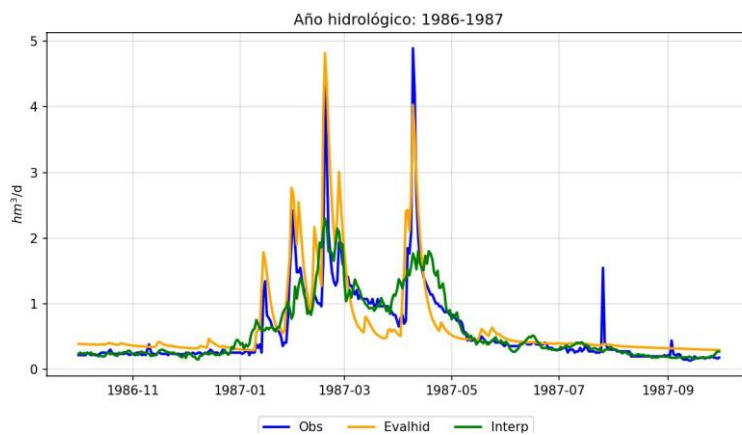
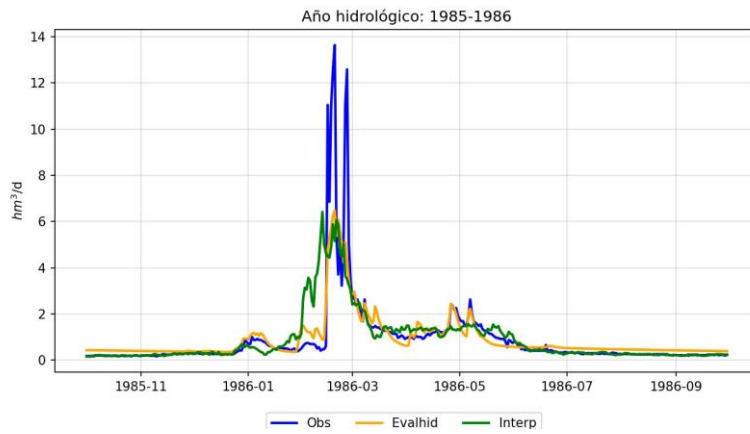
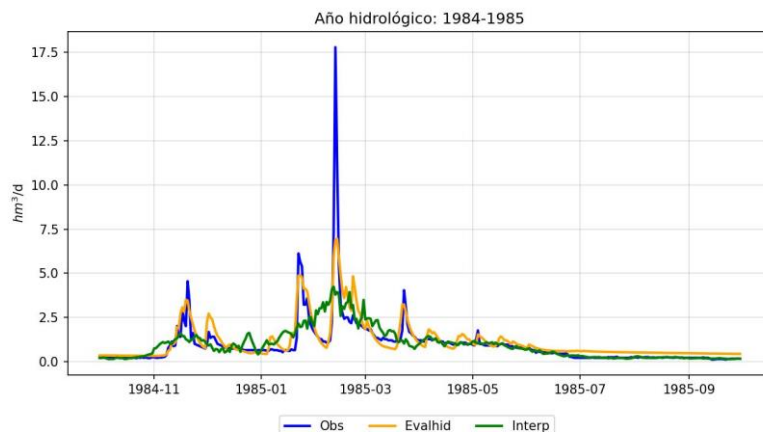
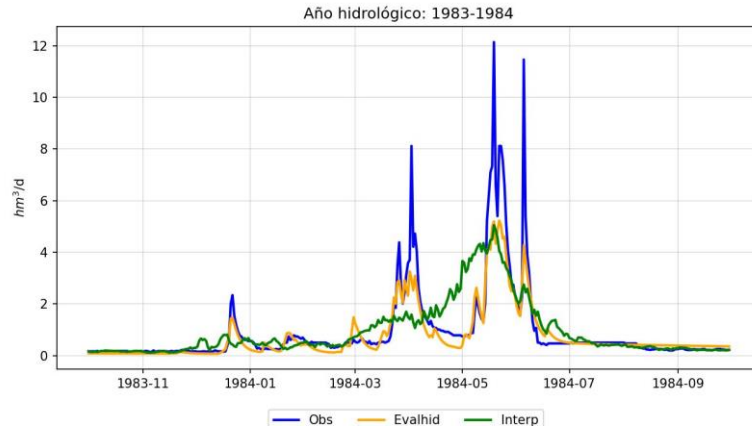
1.6. Resultados calibración en Zagra

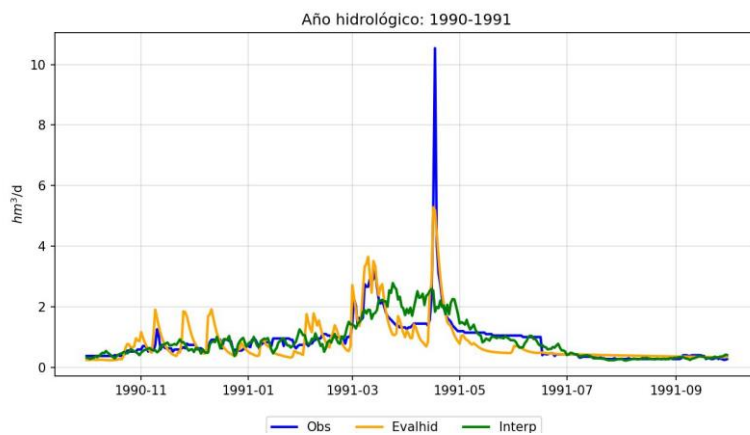
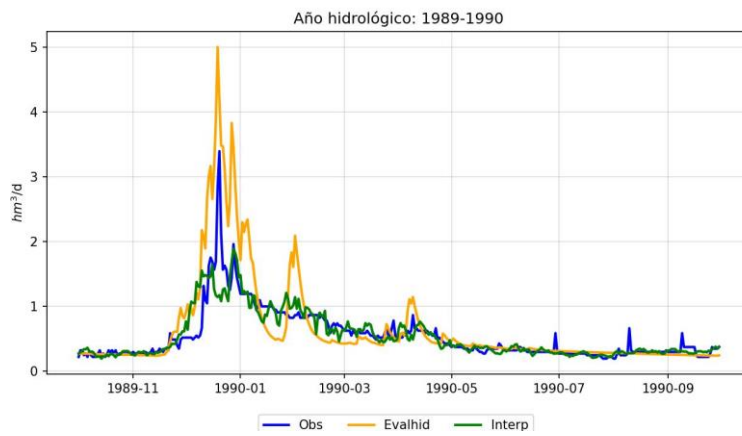
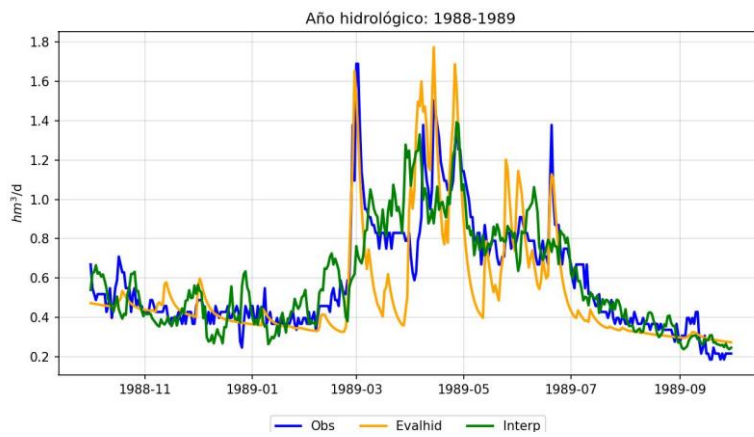
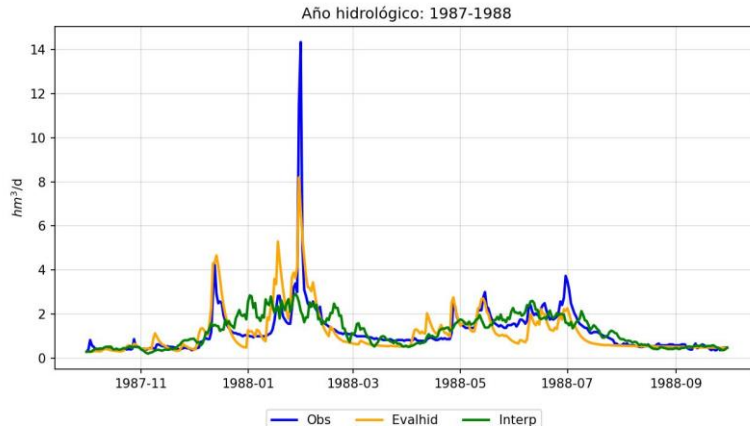


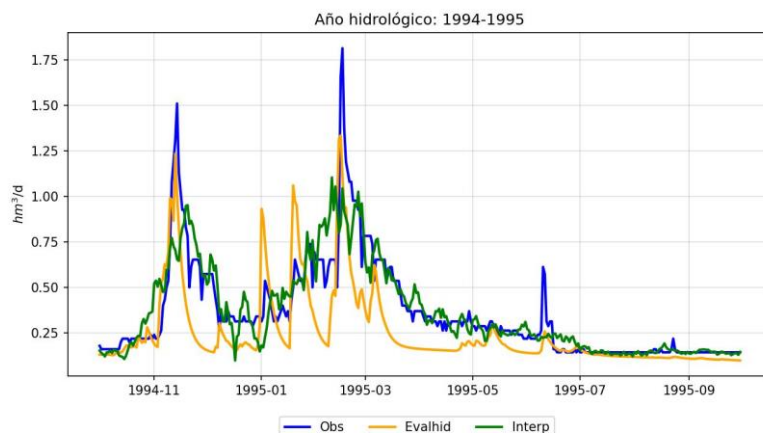
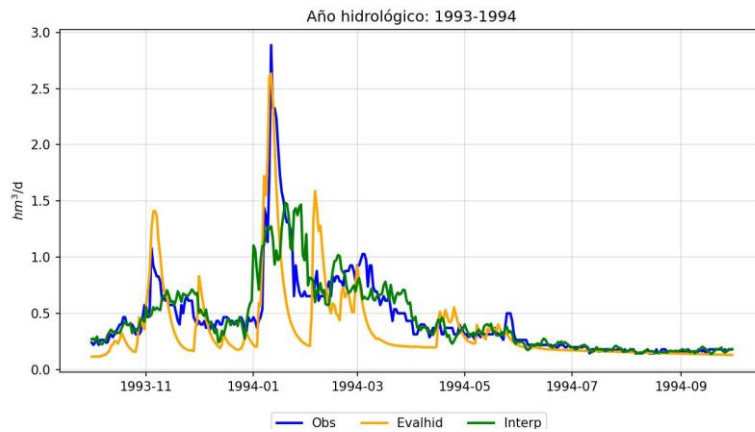
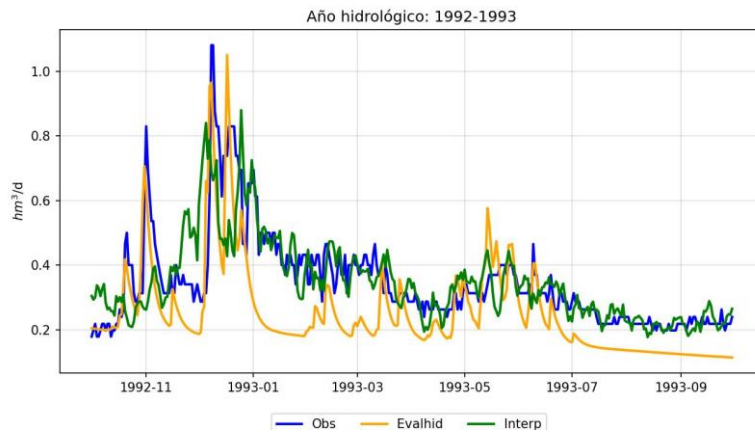
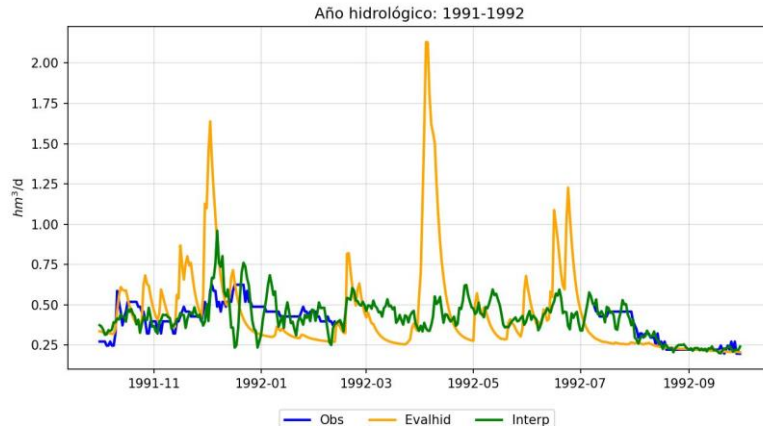
ANEJO 2. Comparación entre metodologías aplicadas en los puntos de estudio piloto.

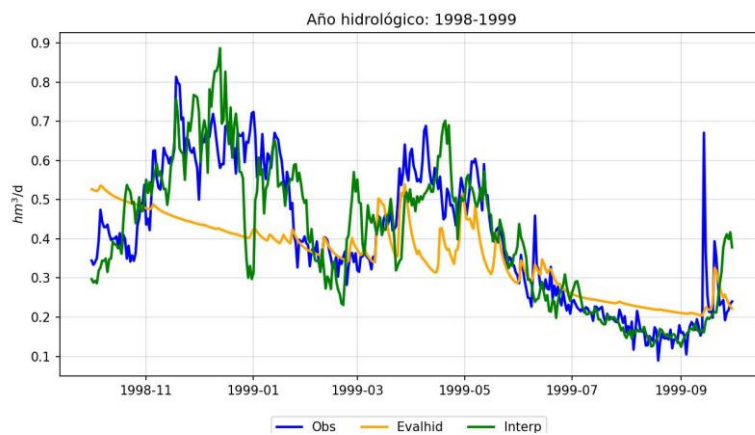
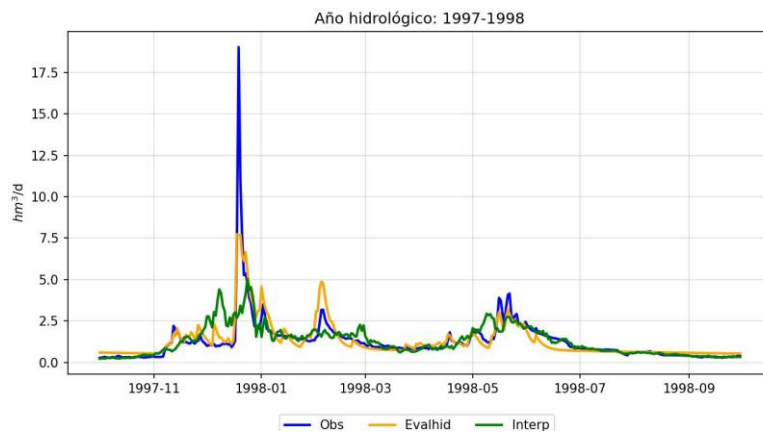
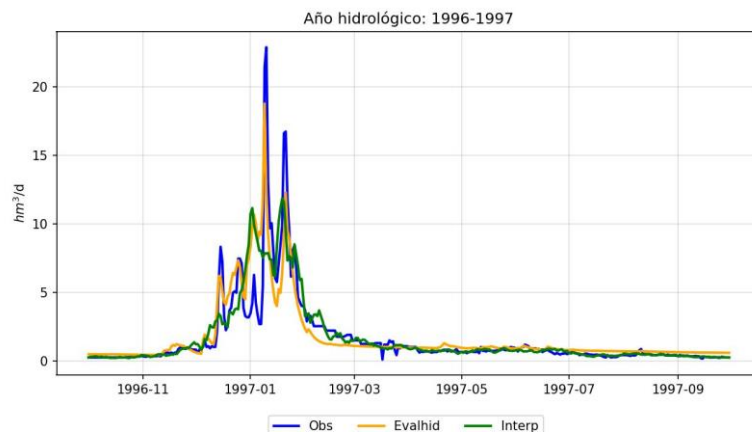
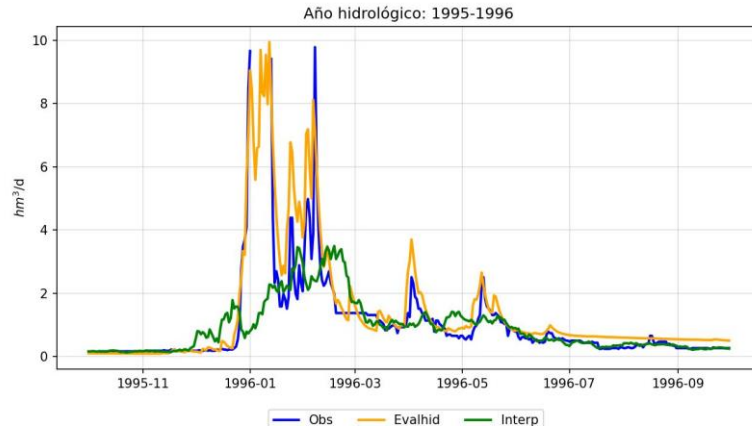
2.1. Comparación entre metodologías aplicadas en Alarcón

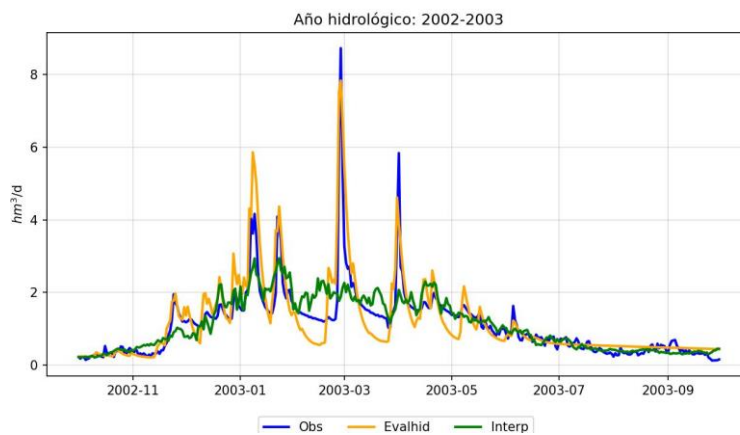
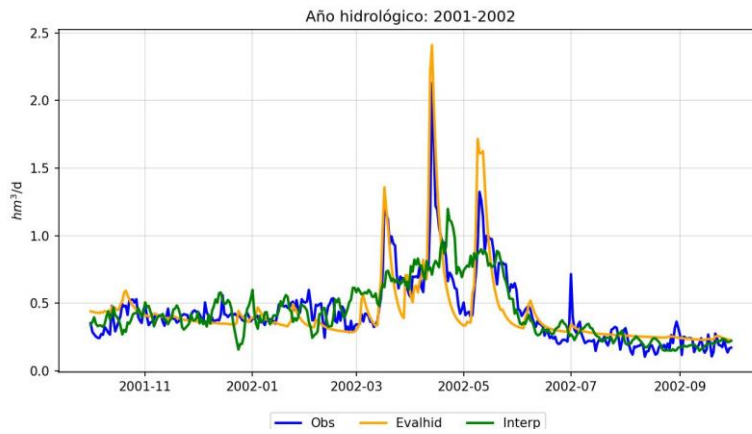
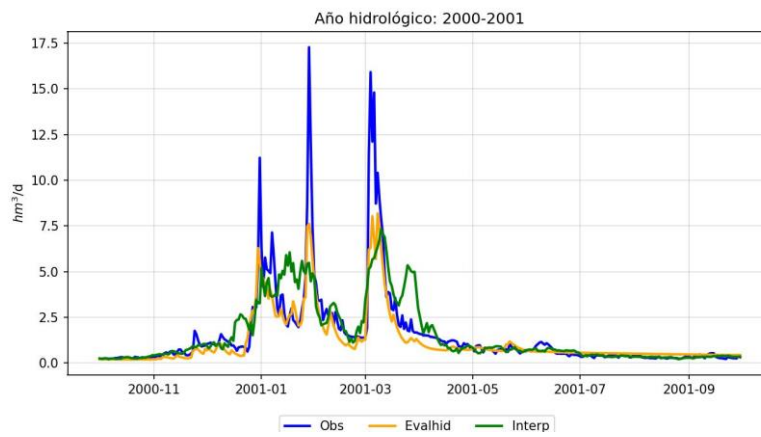
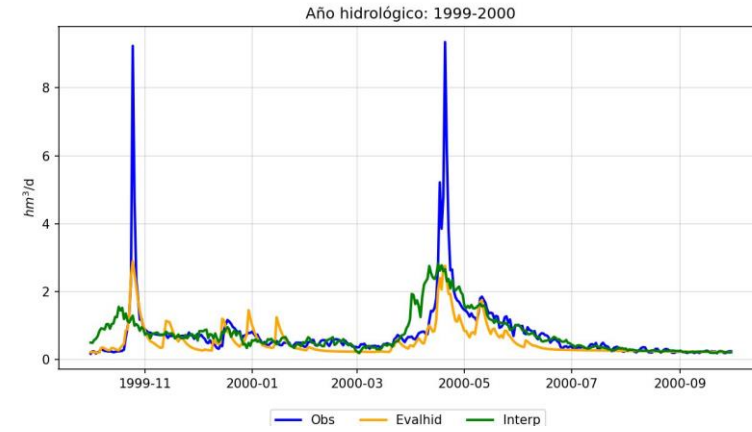


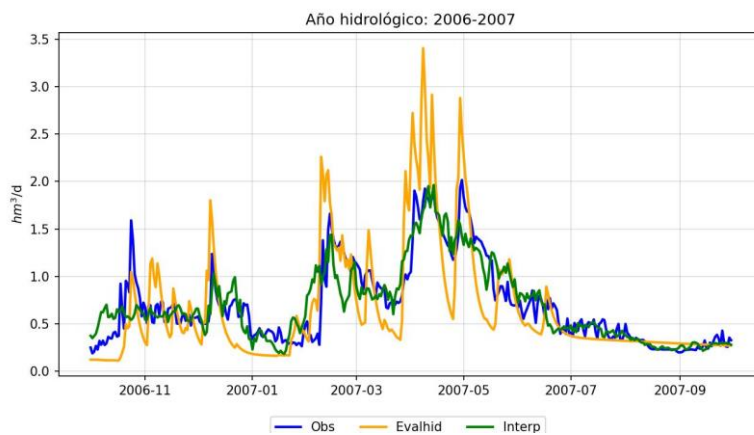
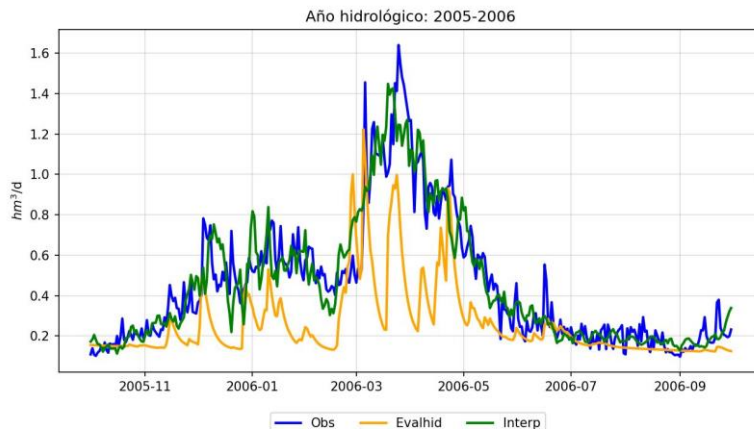
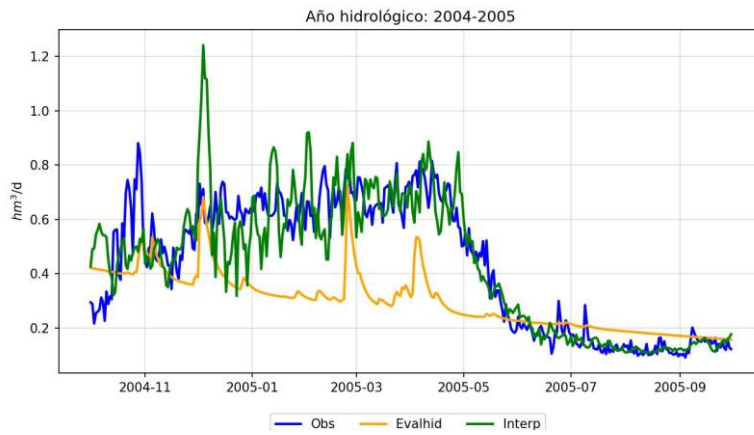
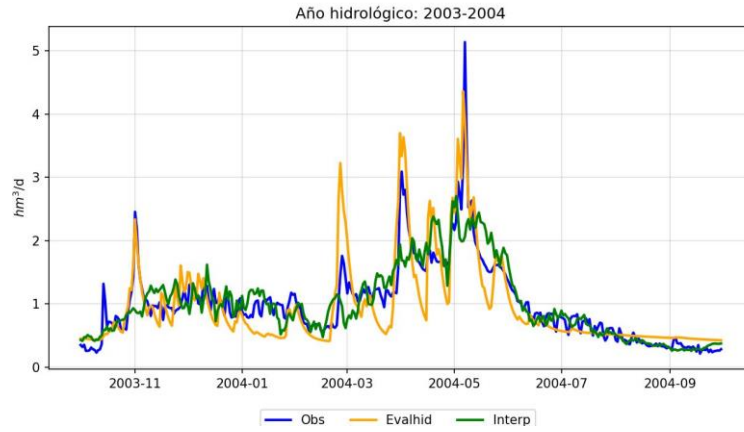


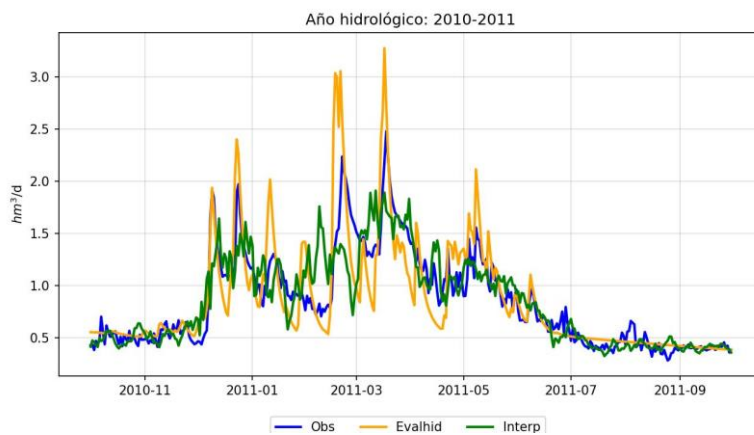
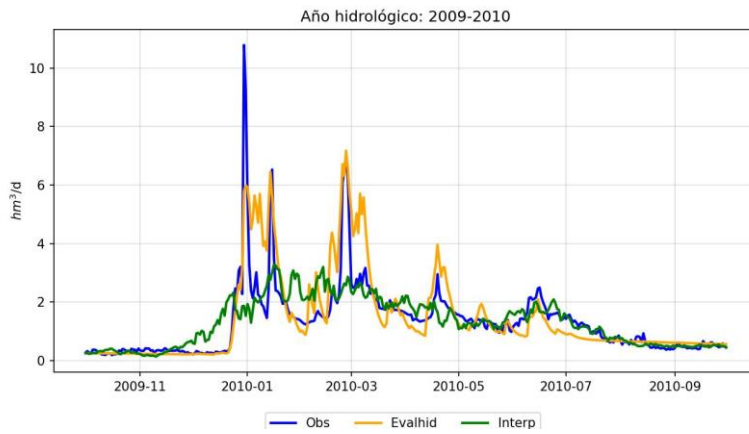
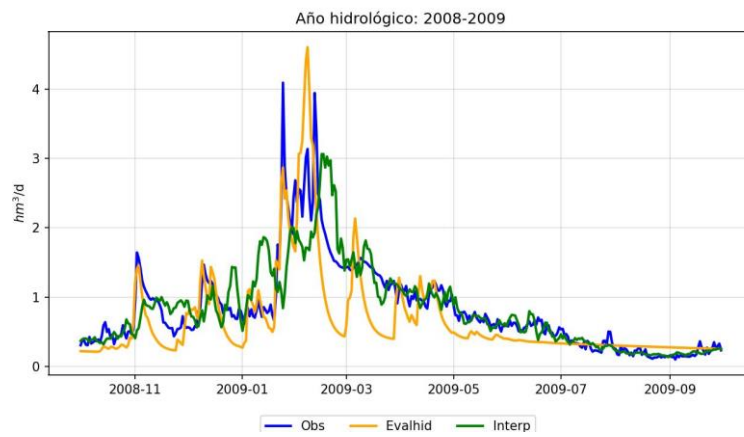
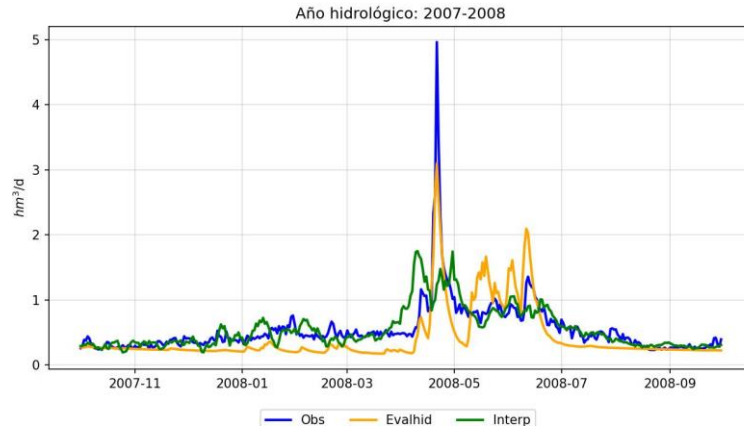


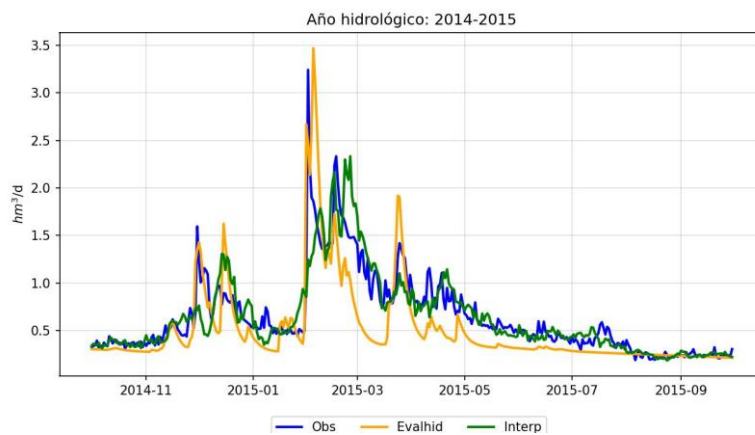
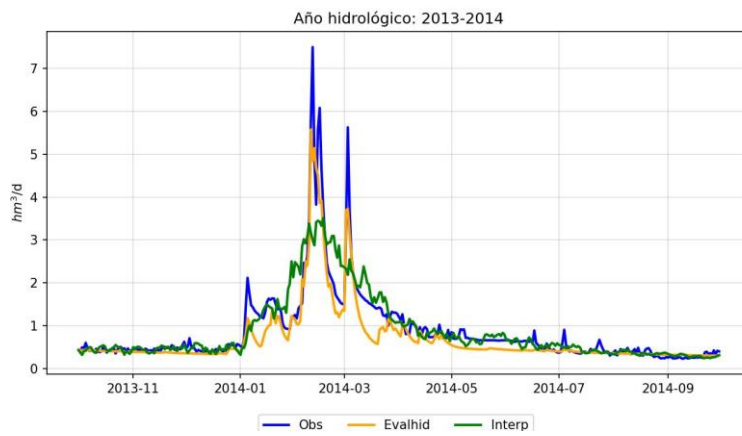
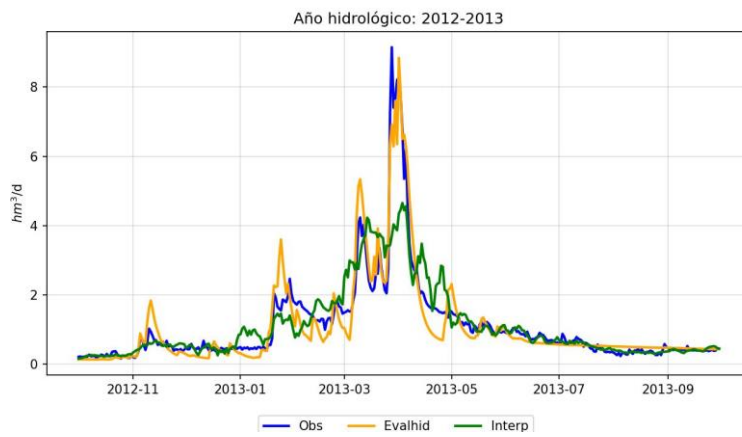
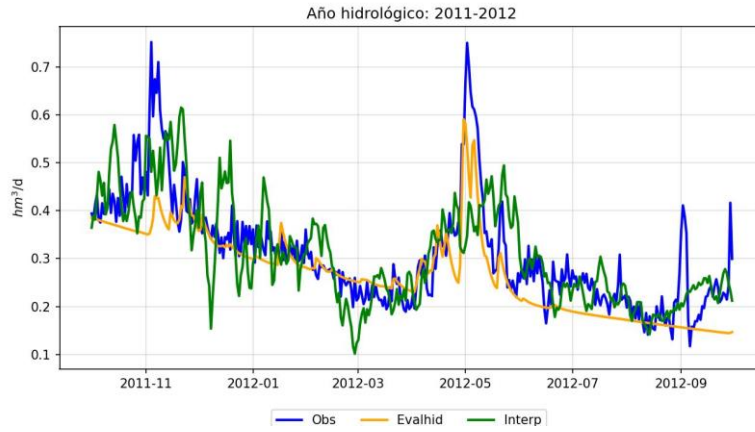


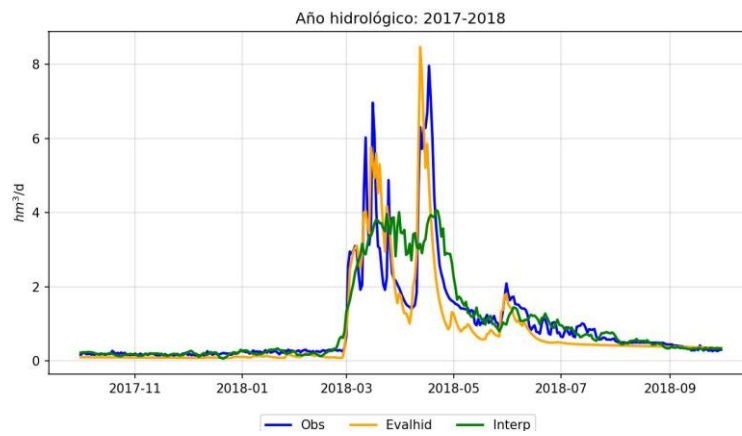
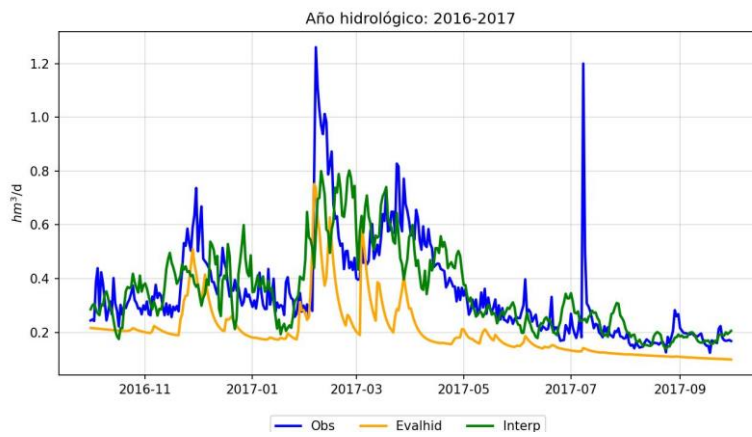
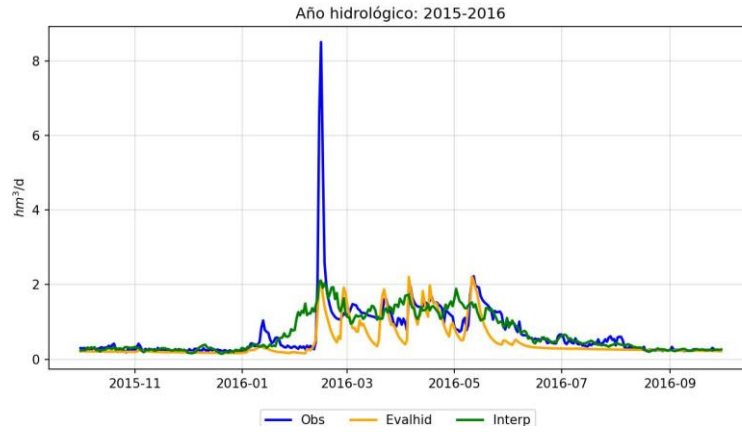


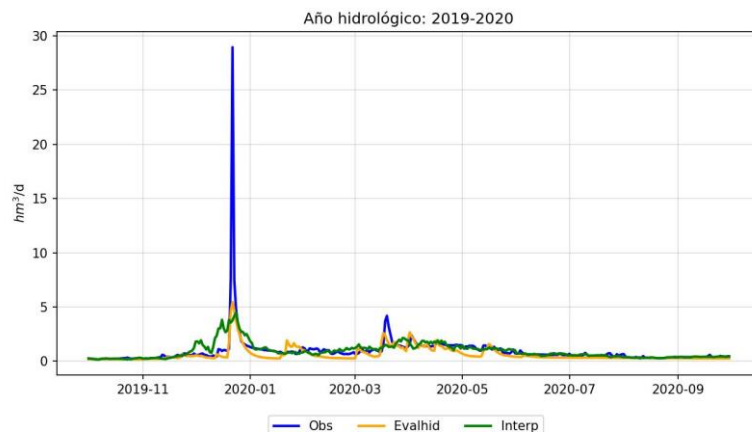
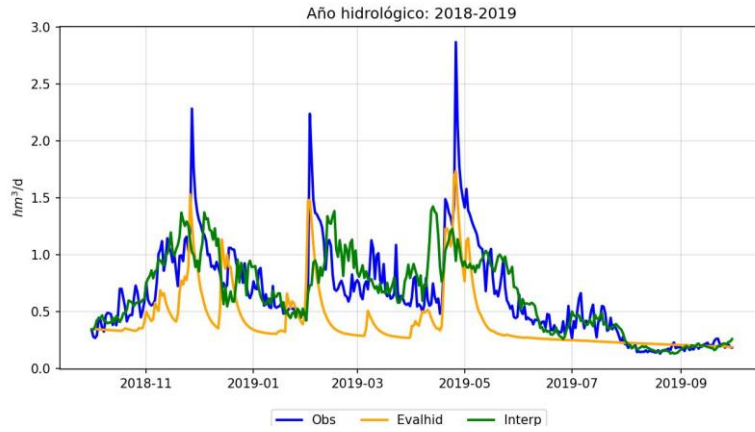




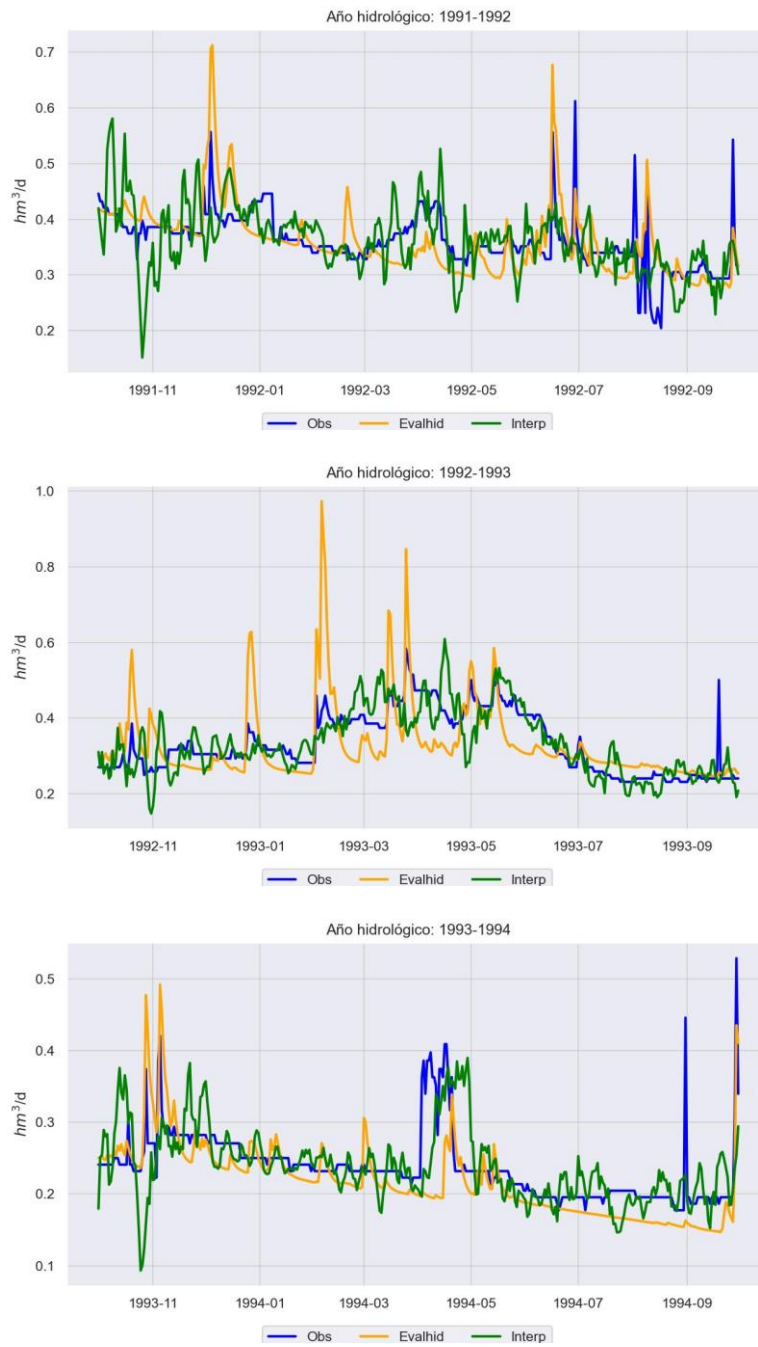


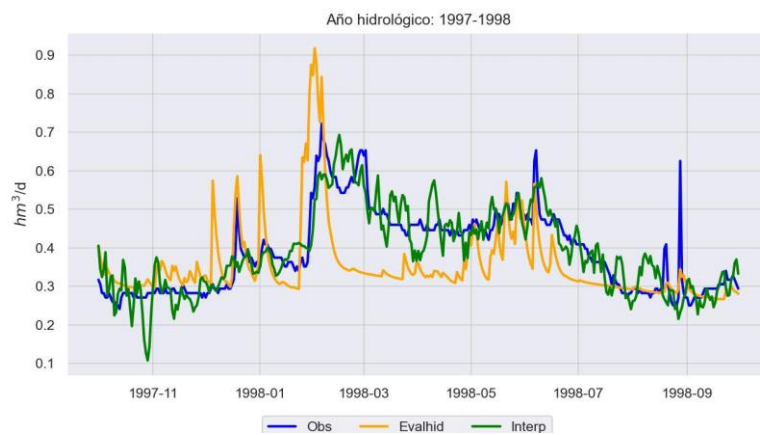
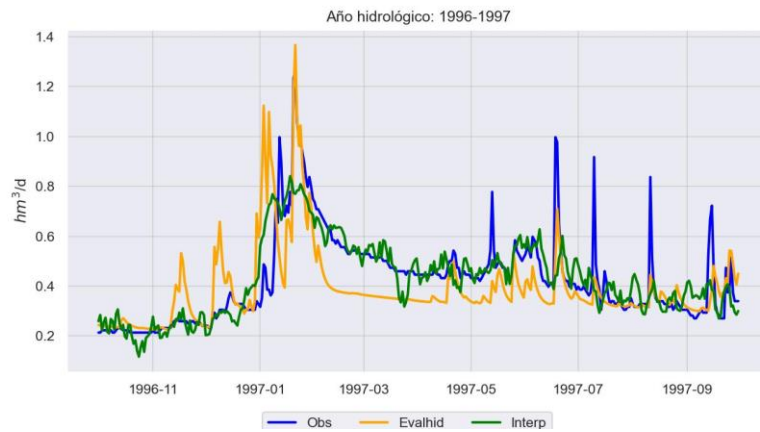
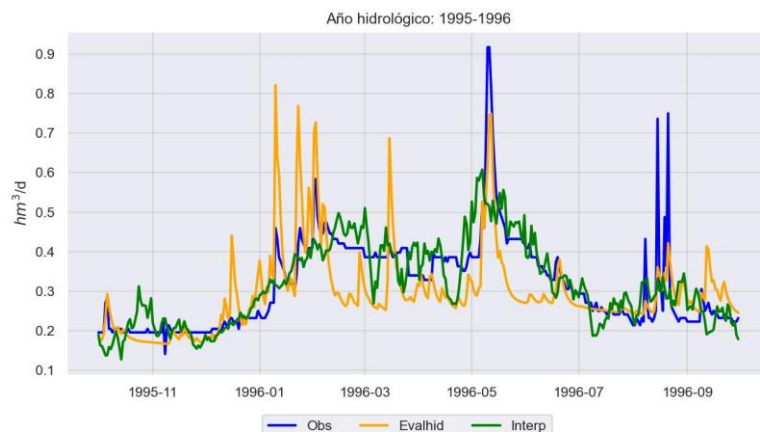
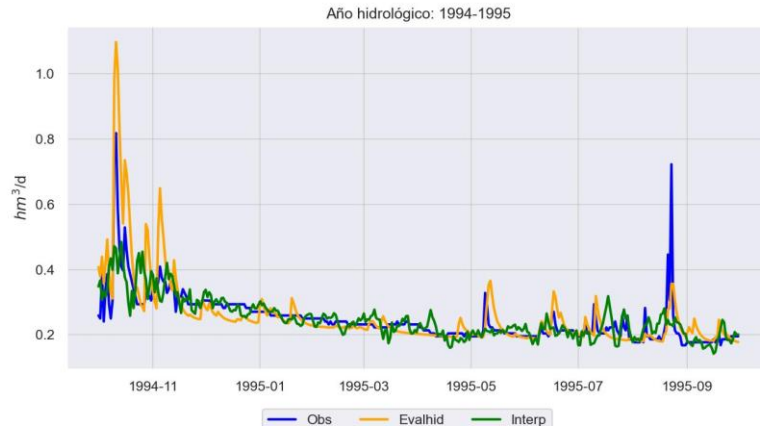


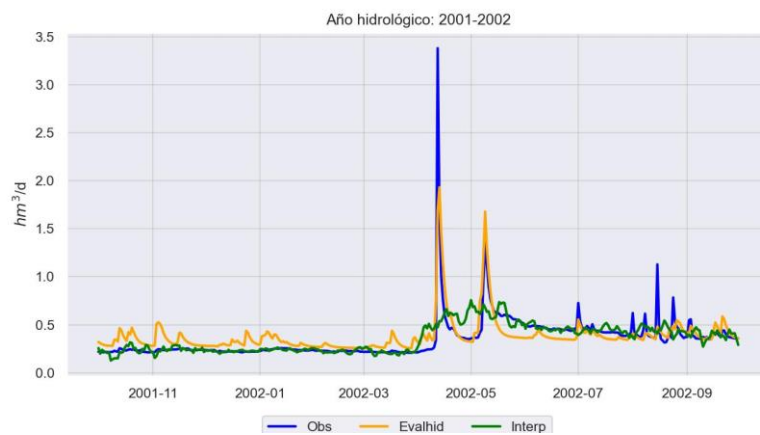
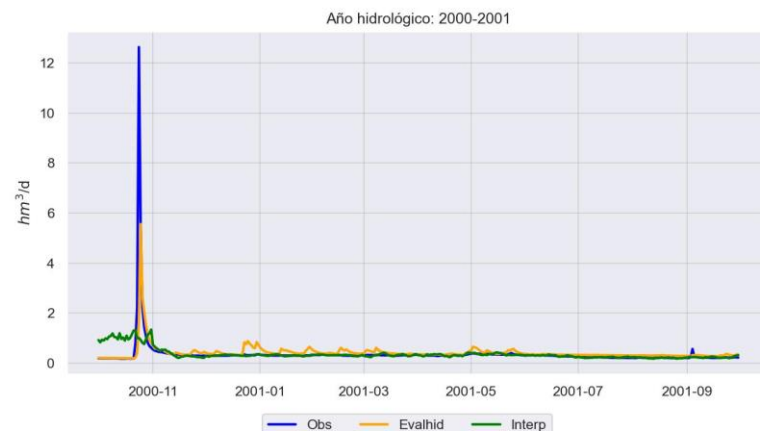
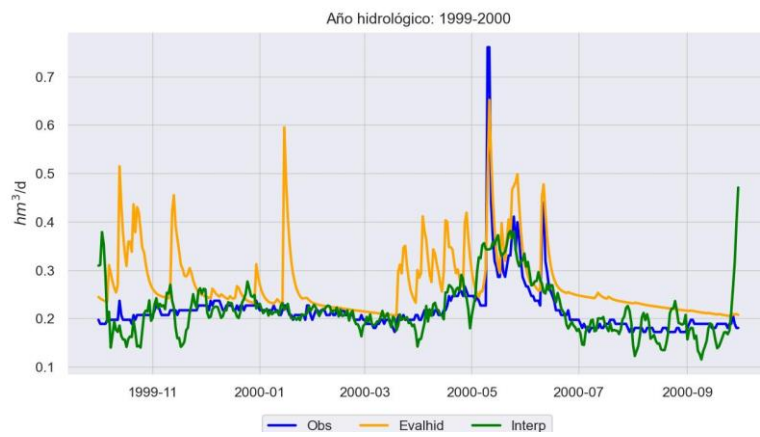
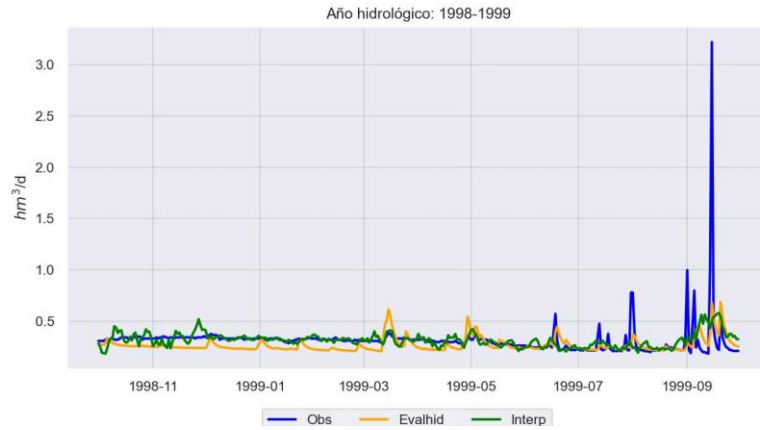


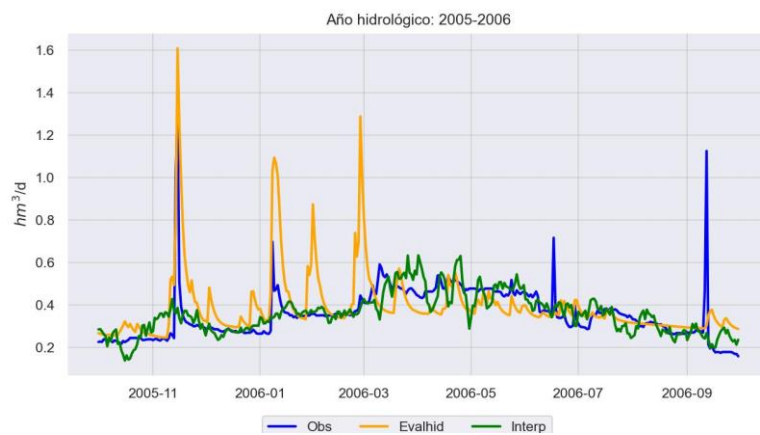
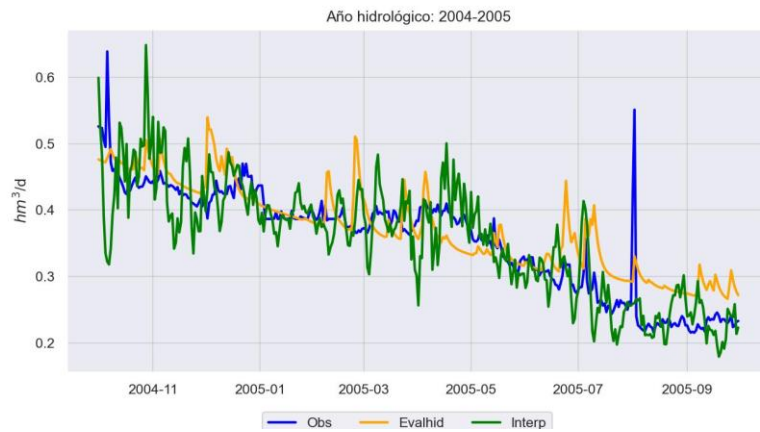
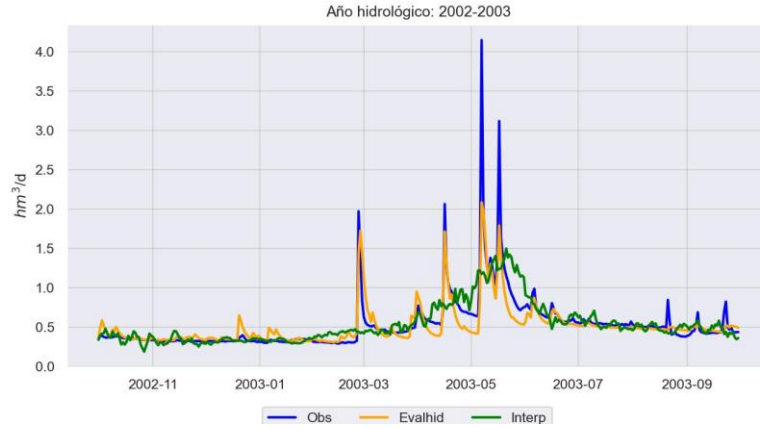


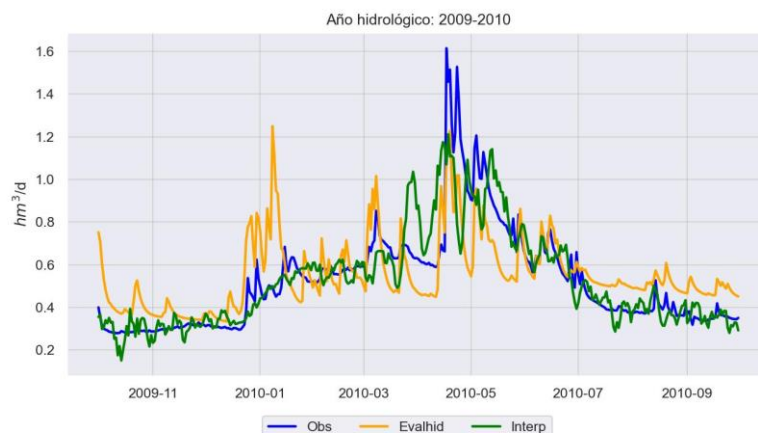
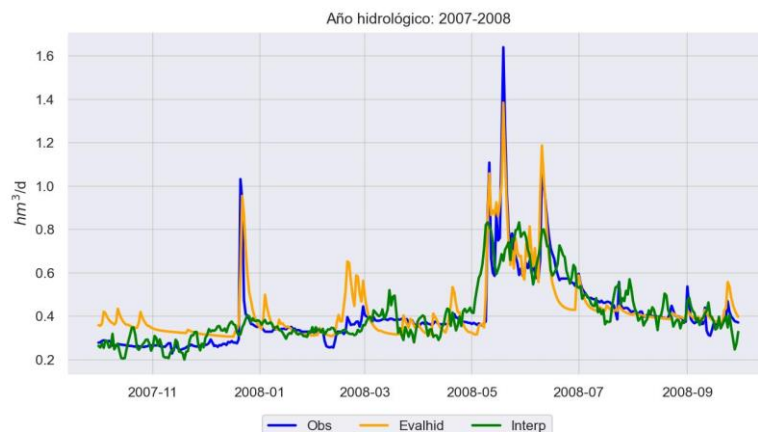
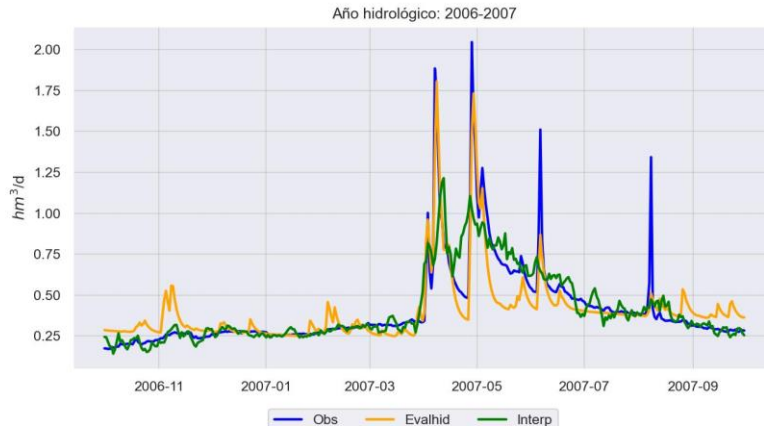
2.2. Comparación entre metodologías aplicadas en Arenós

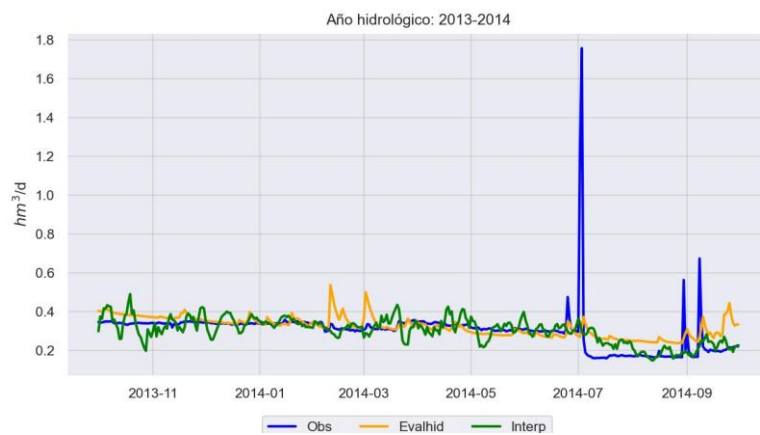
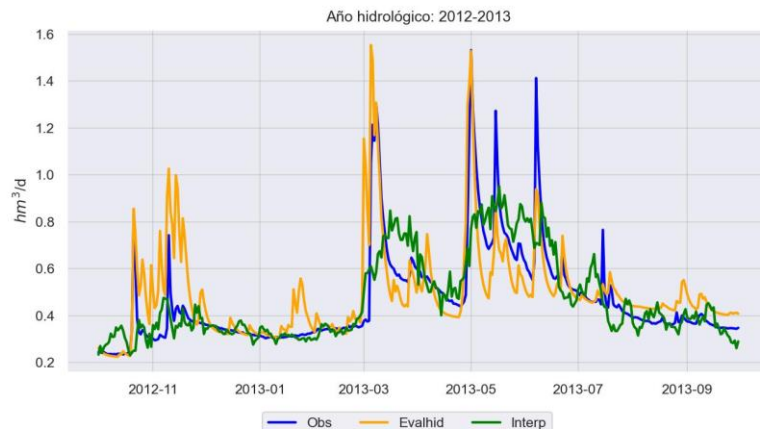
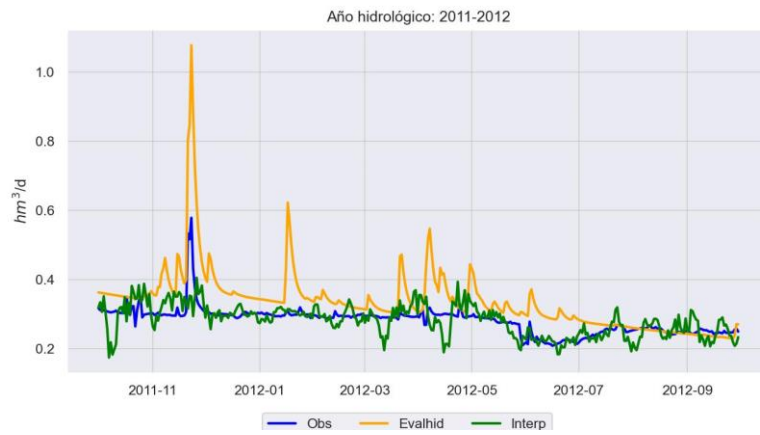
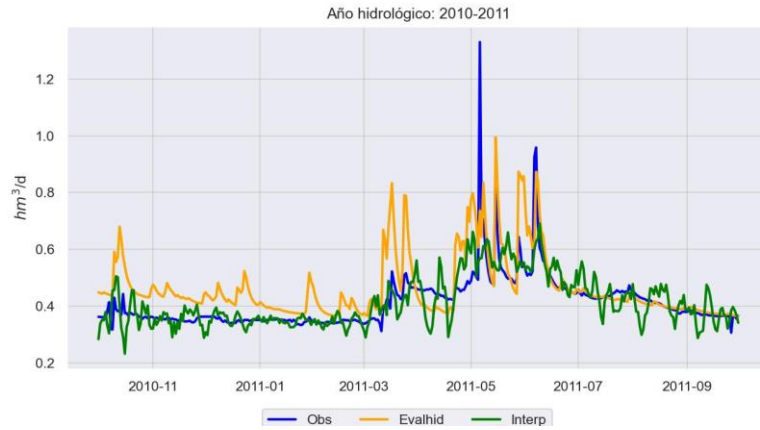


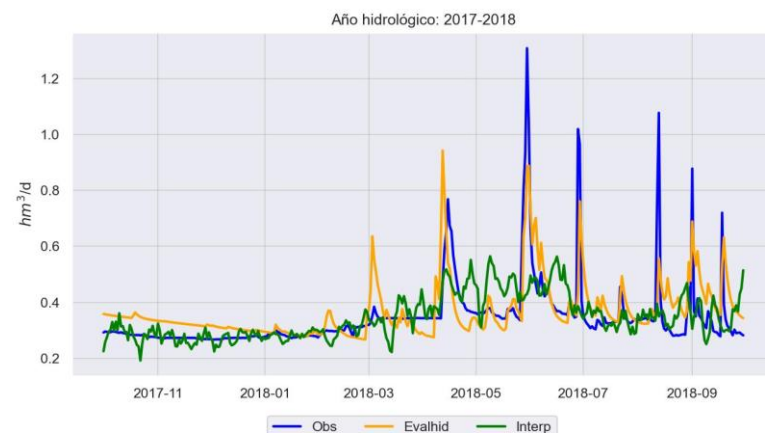
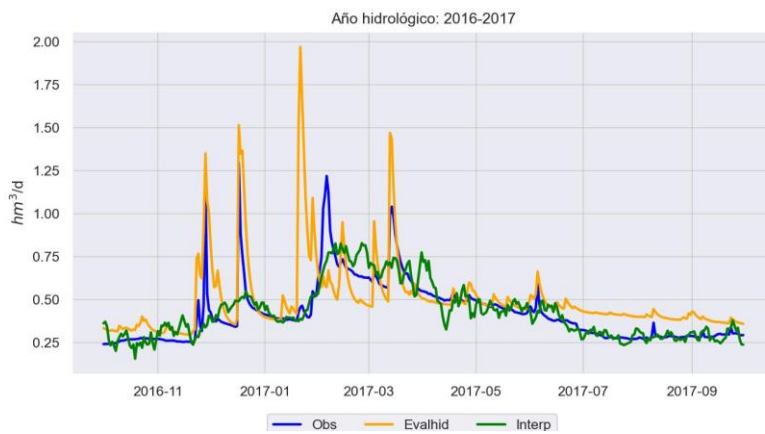
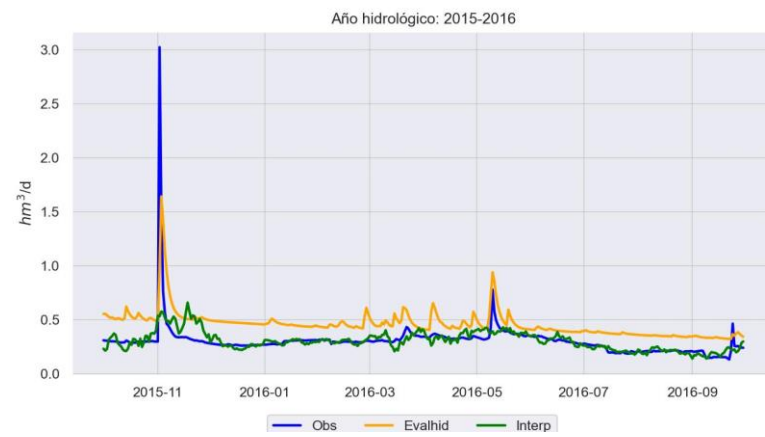
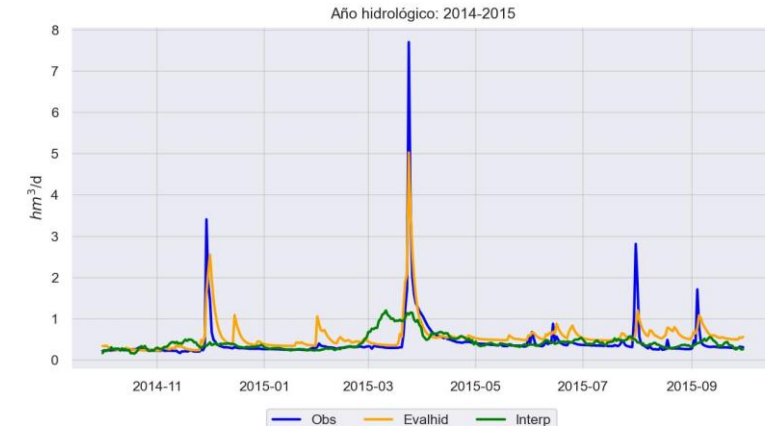


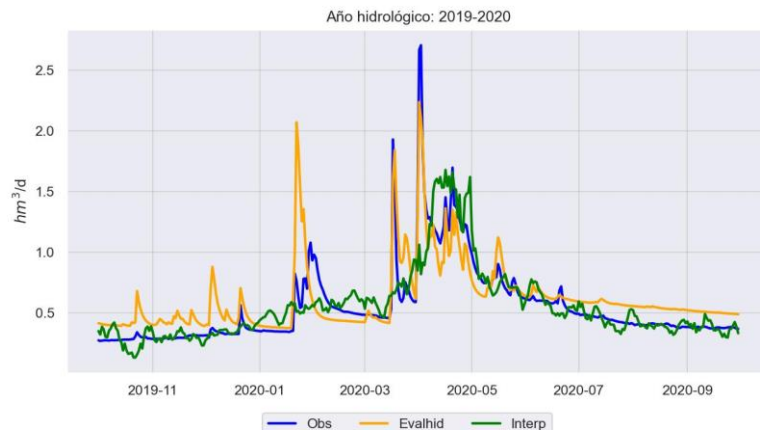
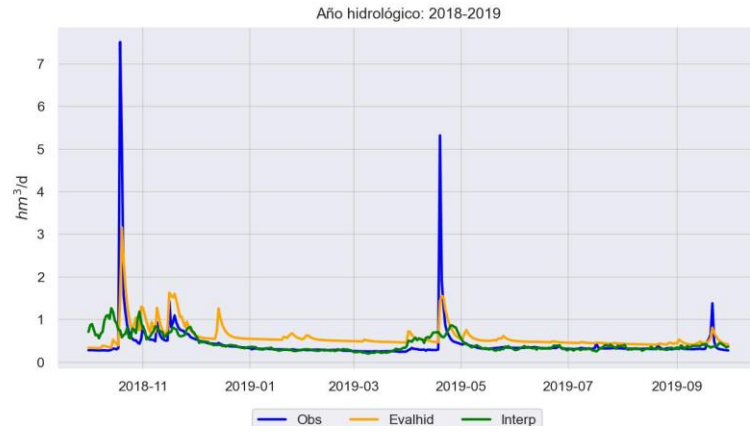




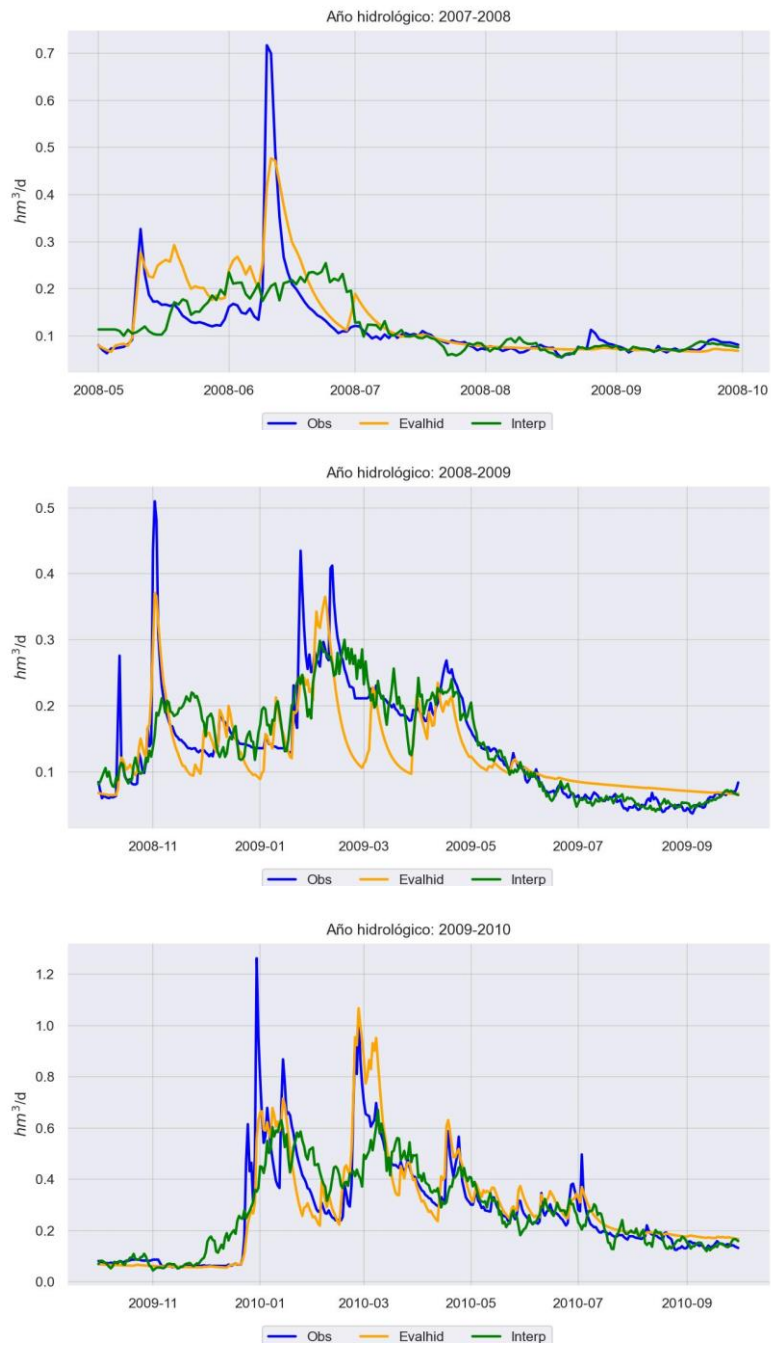


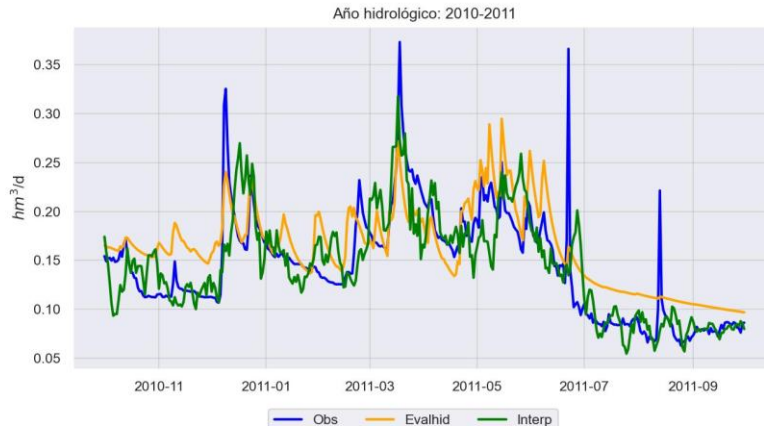


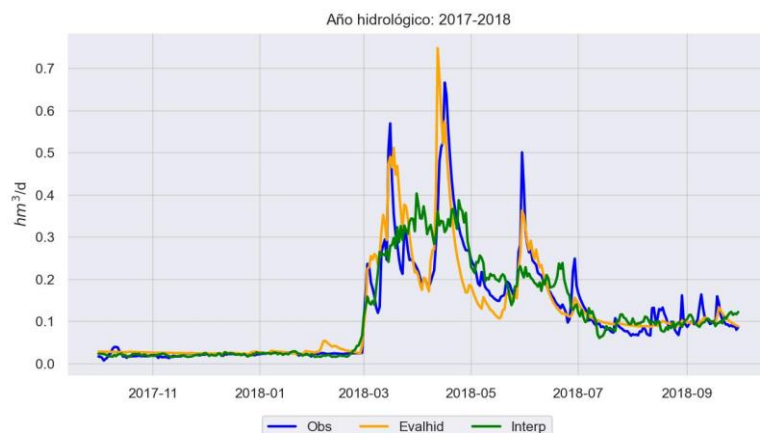
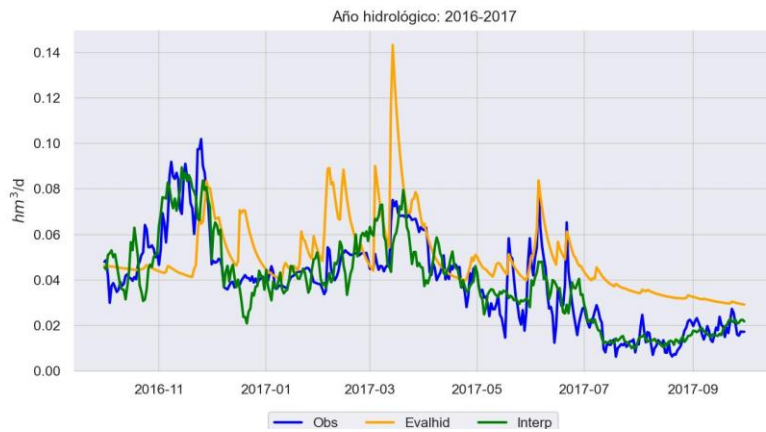
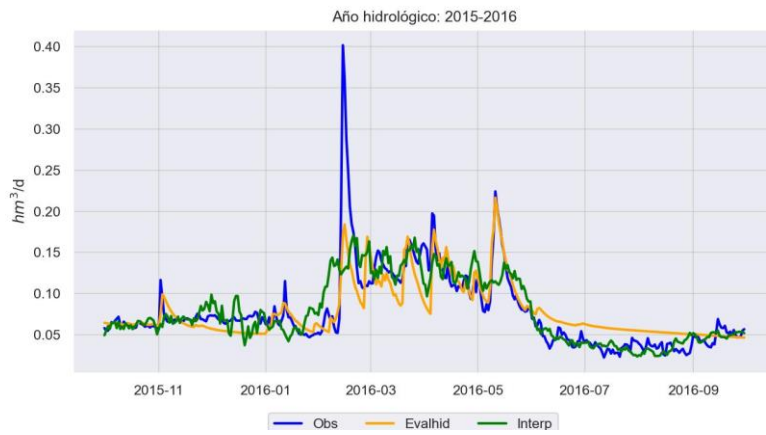
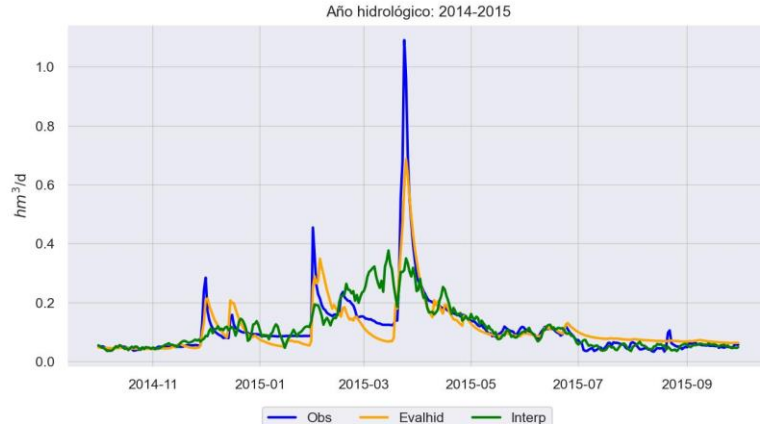




2.3. Comparación entre metodologías aplicadas en Arquillo

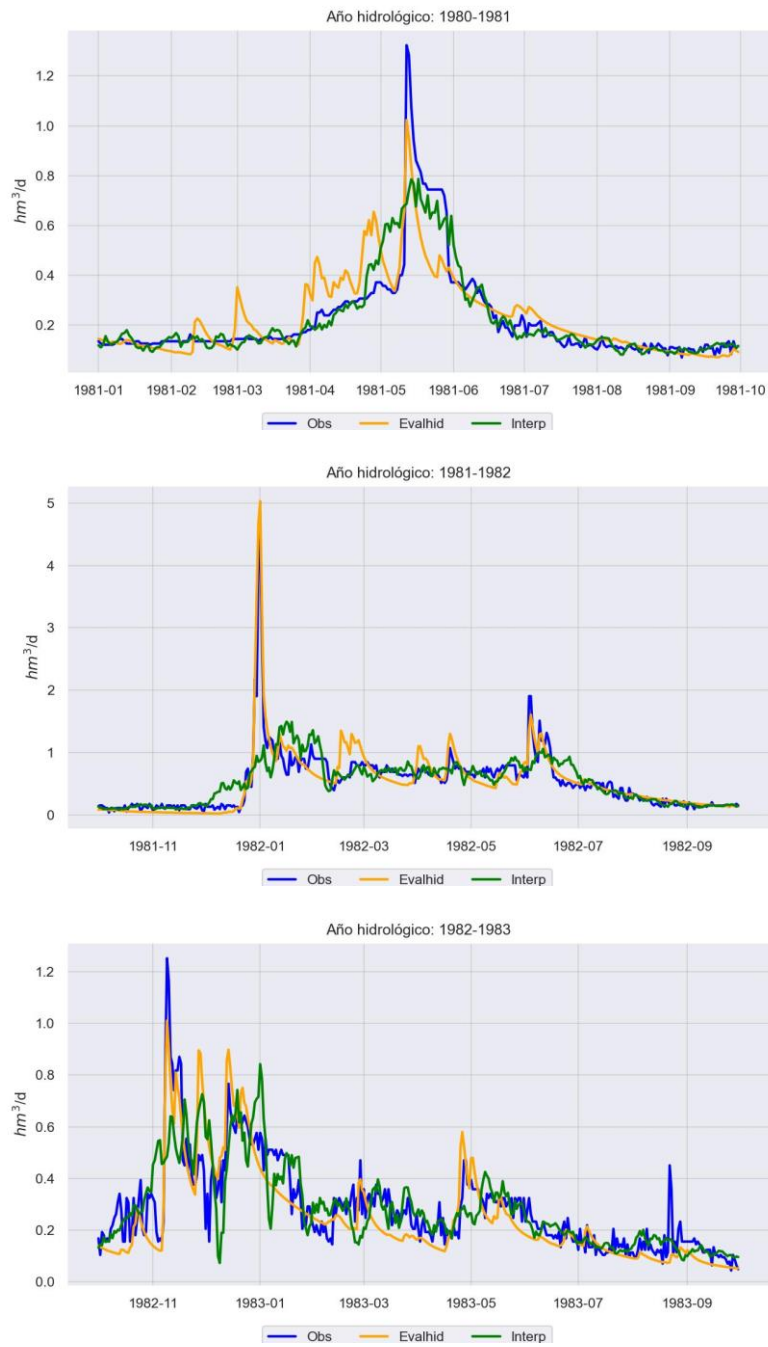


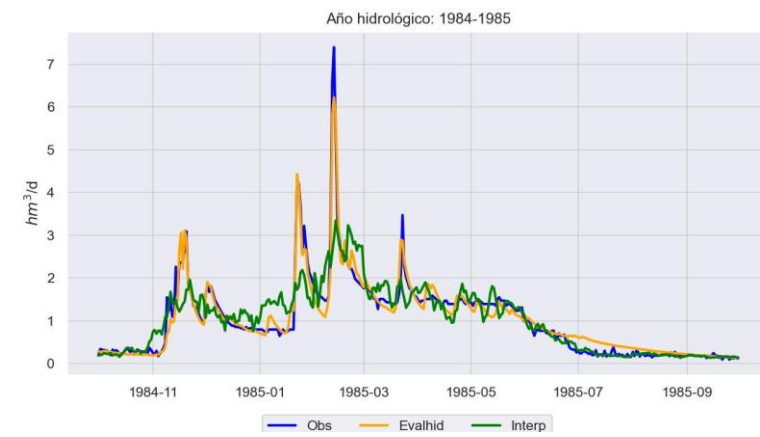
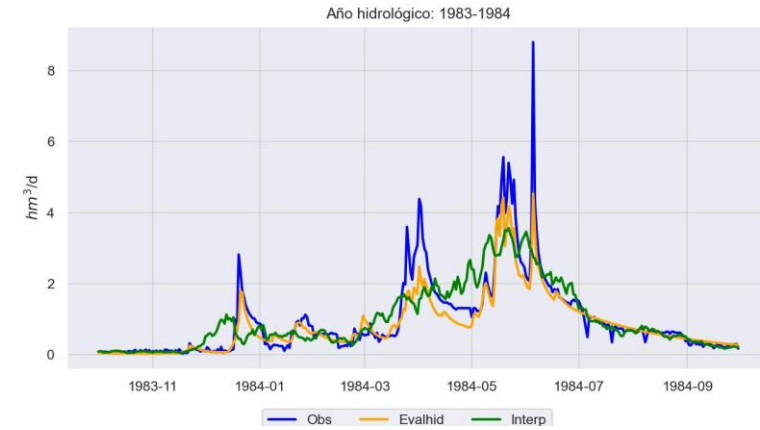


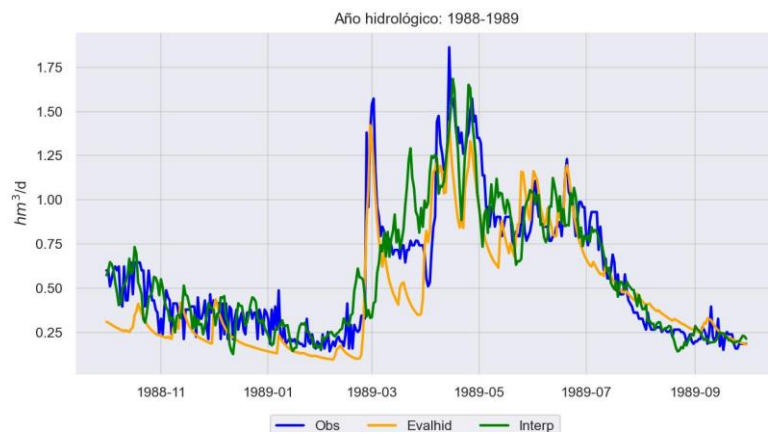
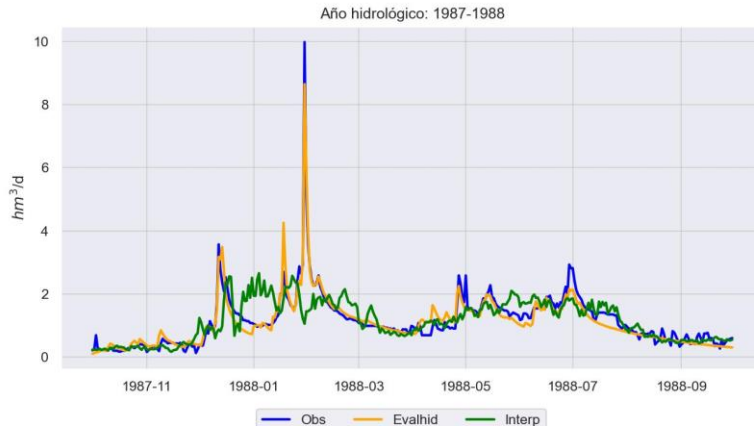


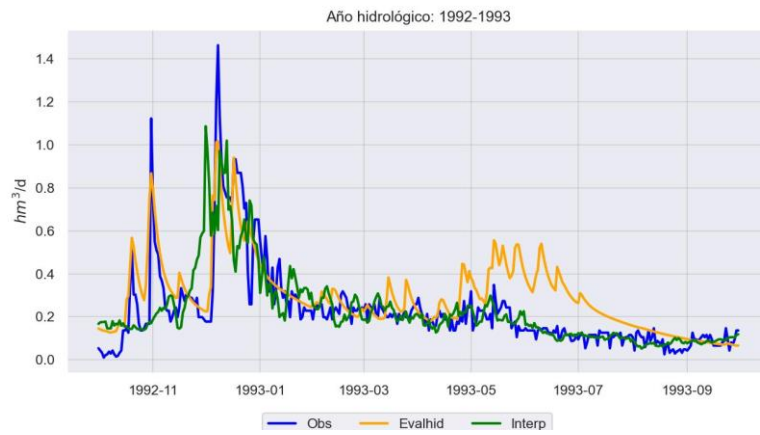
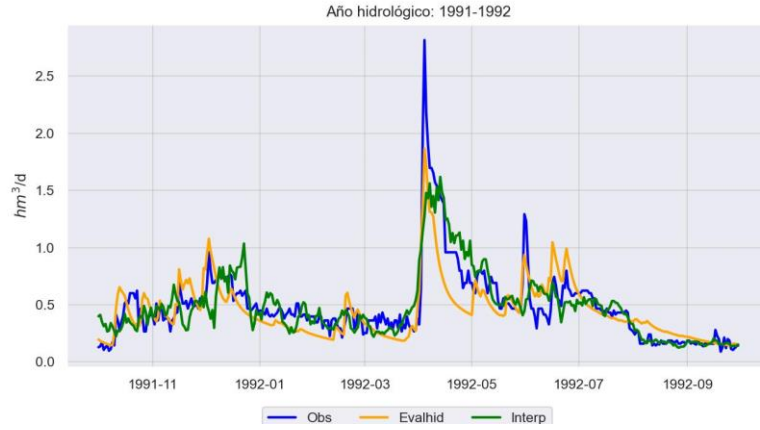


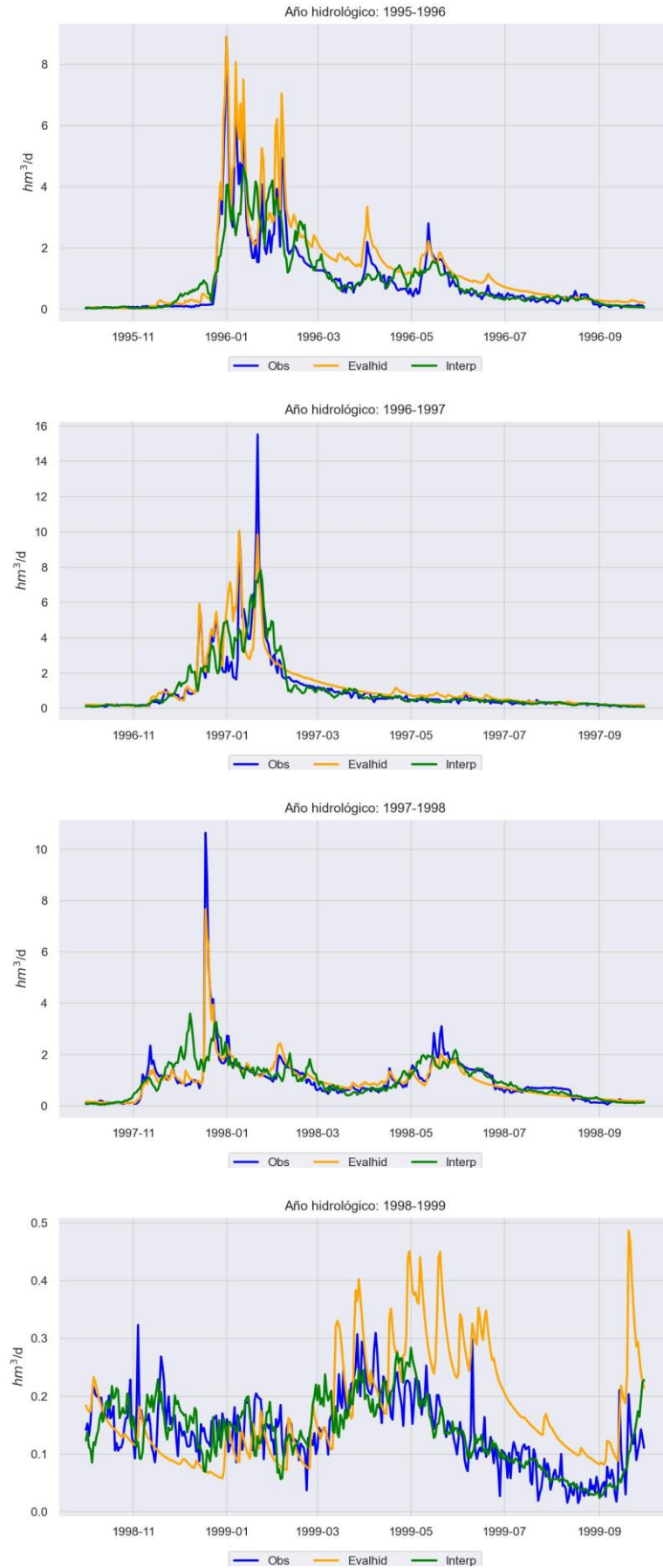
2.4. Comparación entre metodologías aplicadas en Cuenca

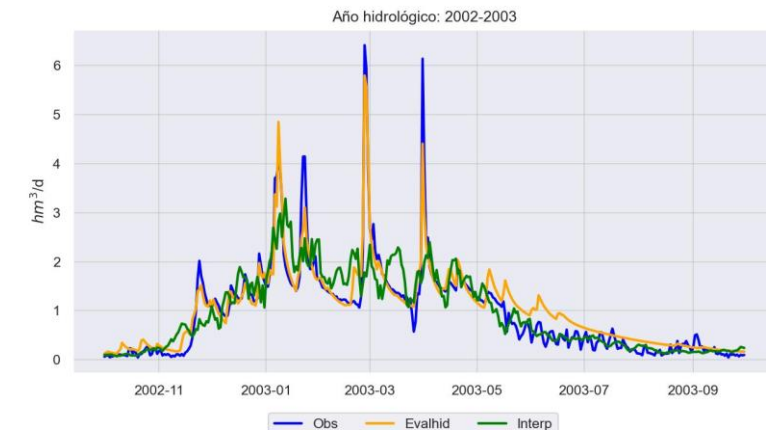
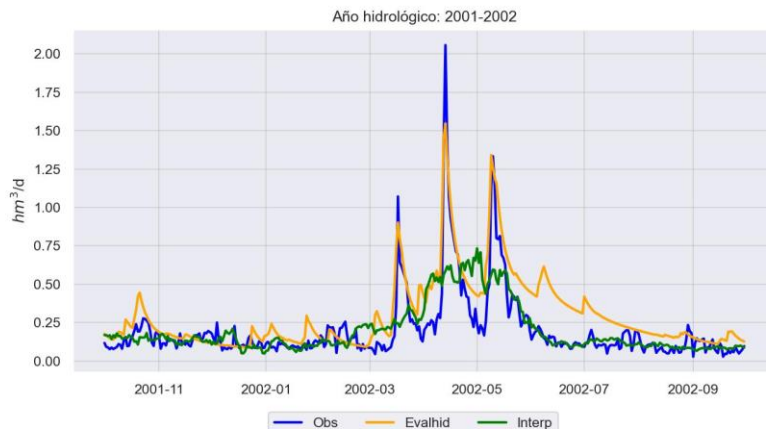
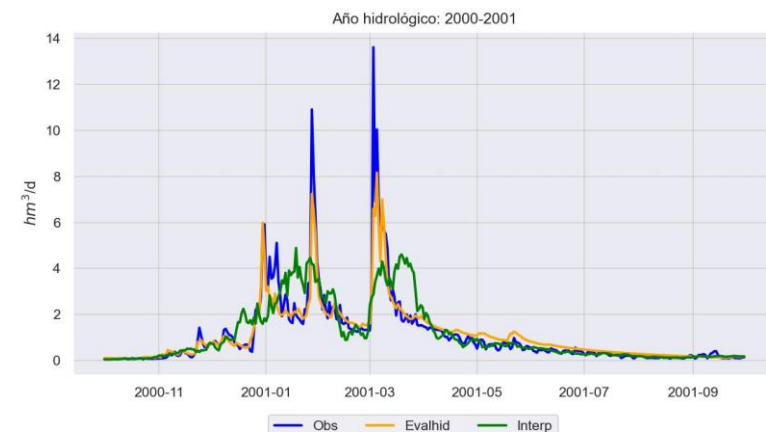


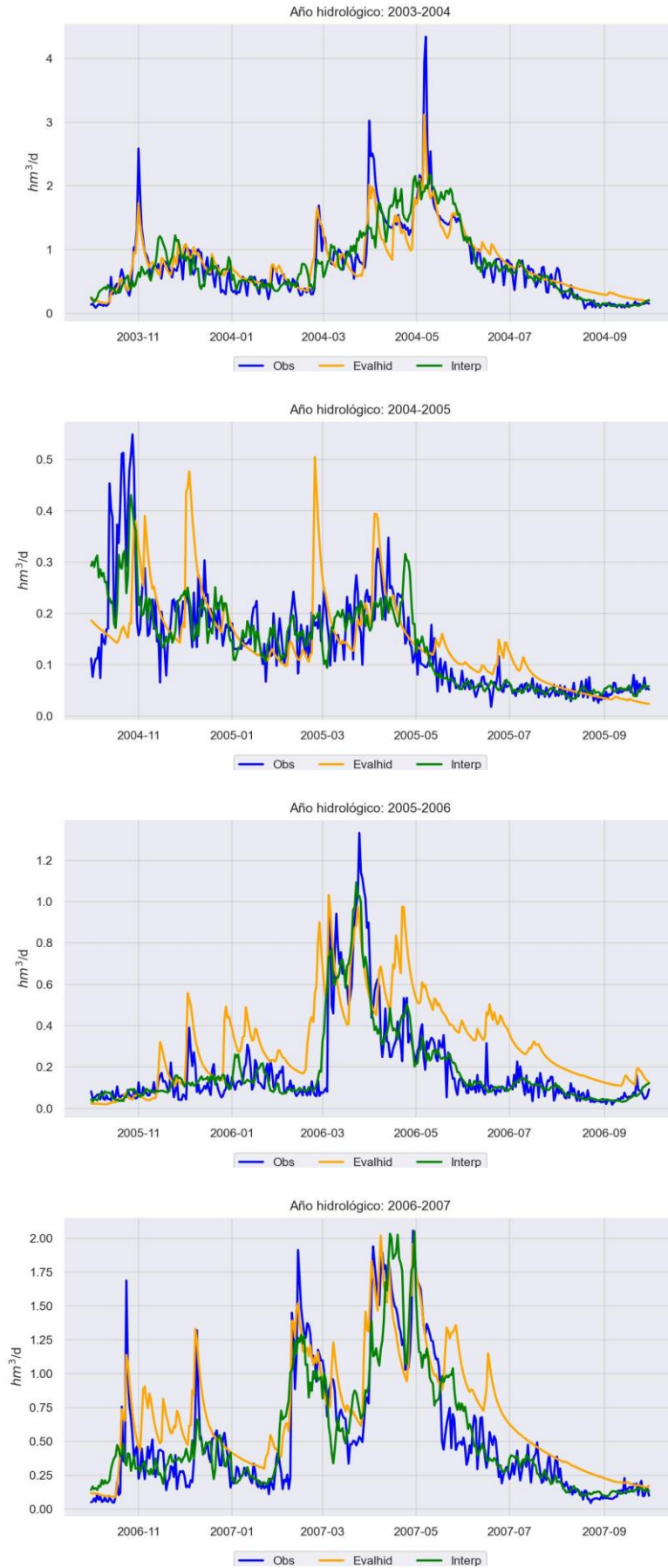


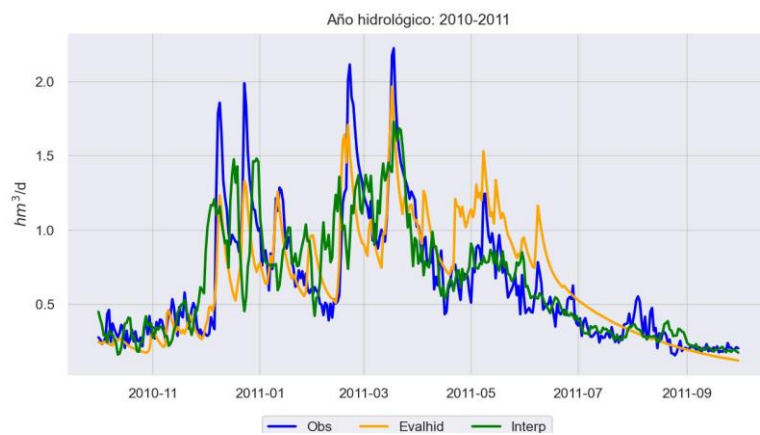
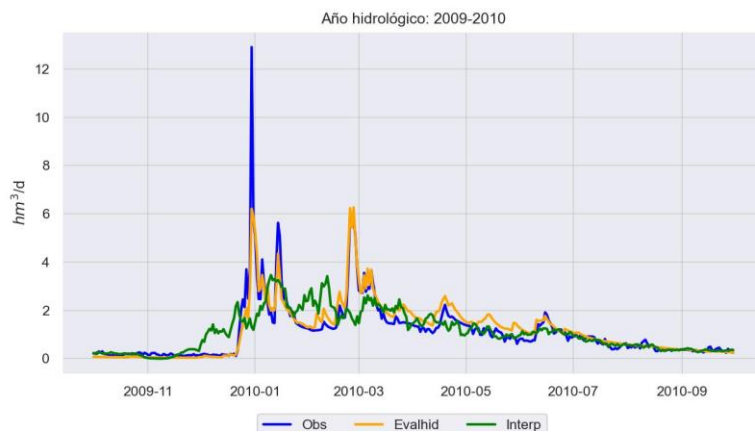
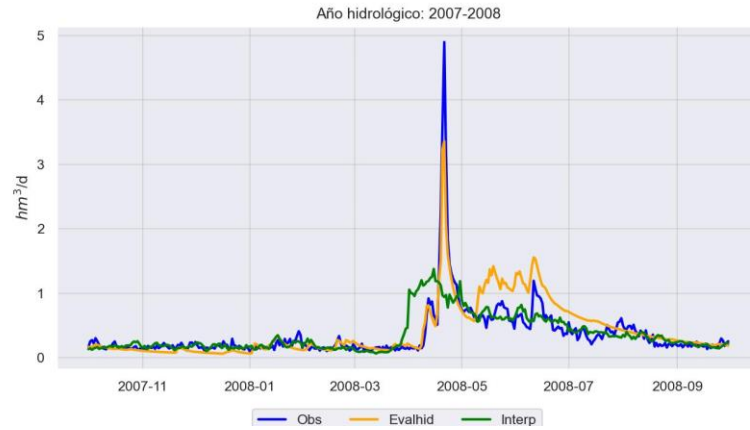


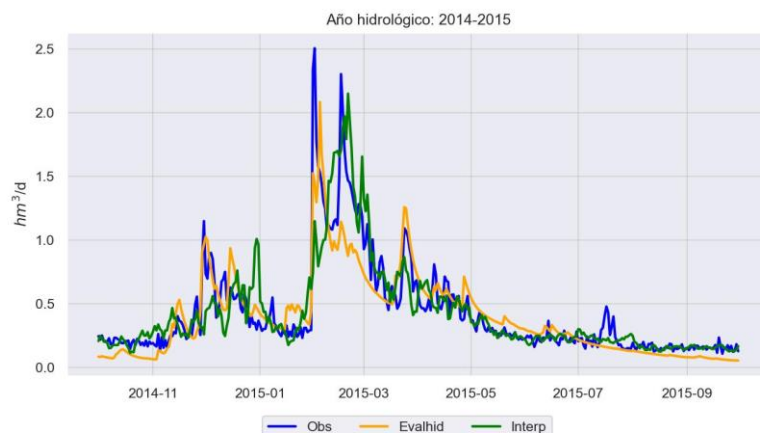
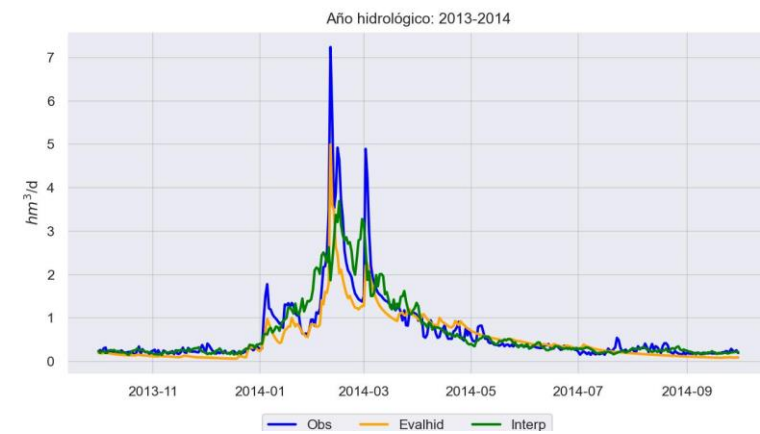
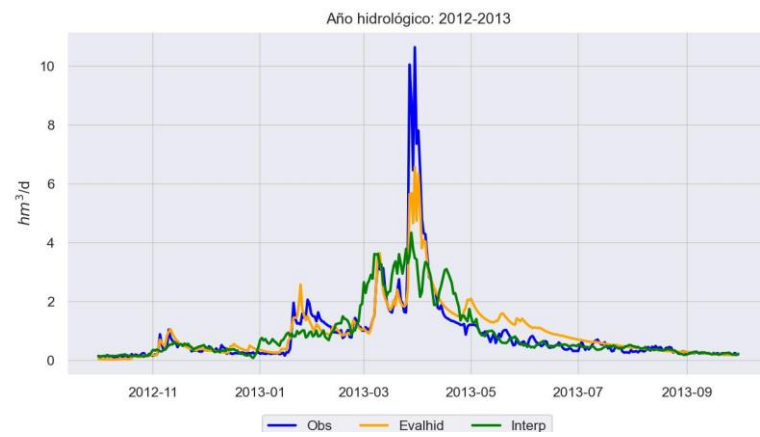
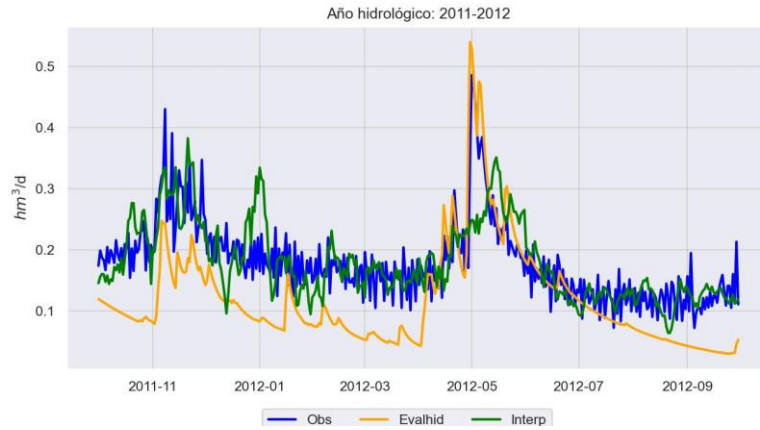


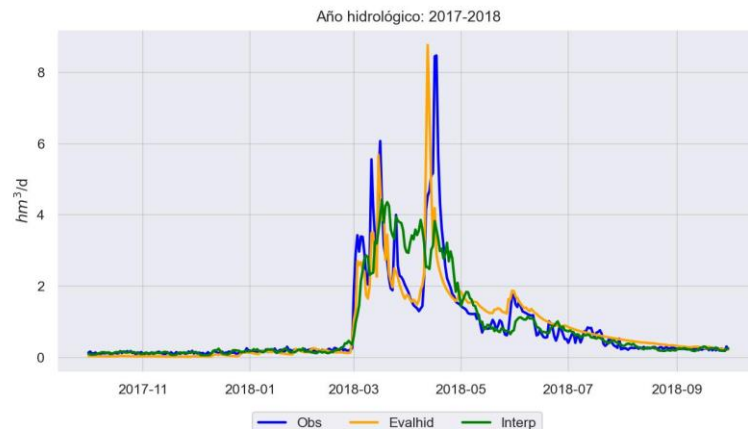
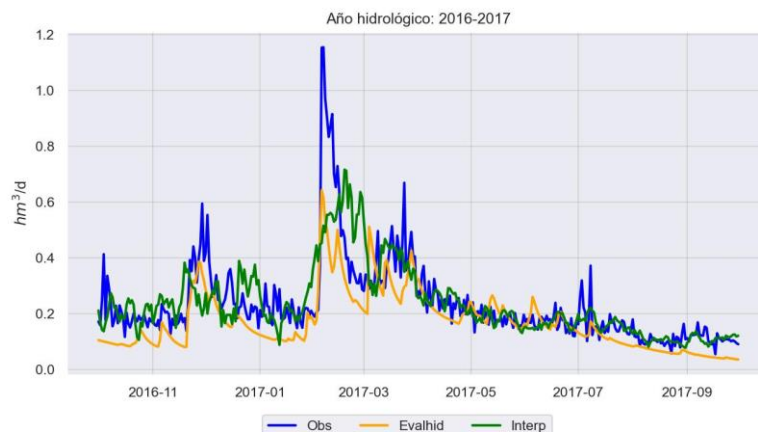
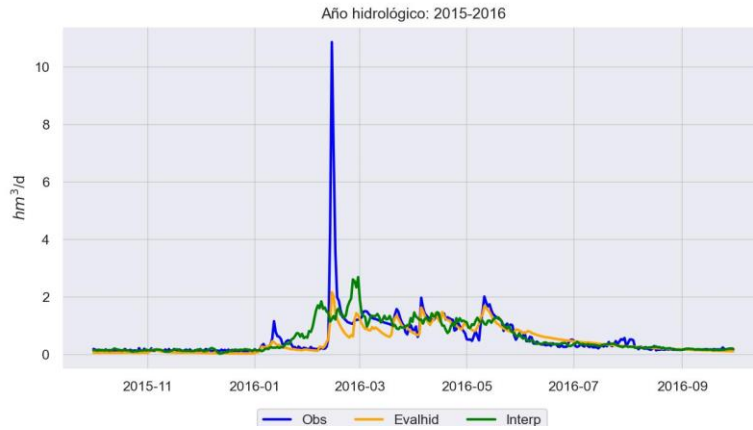


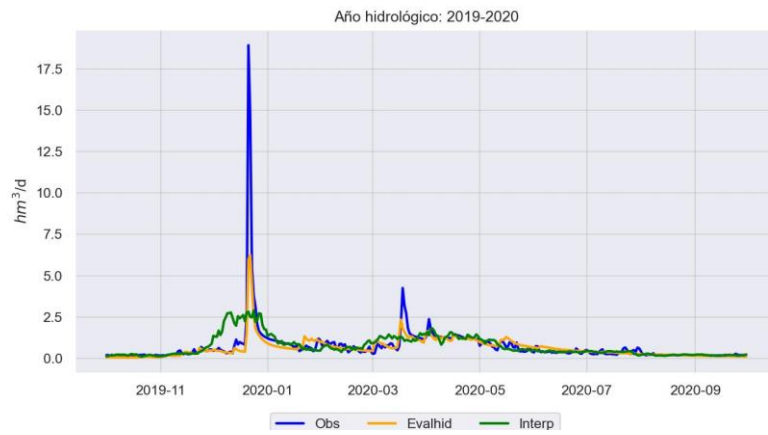
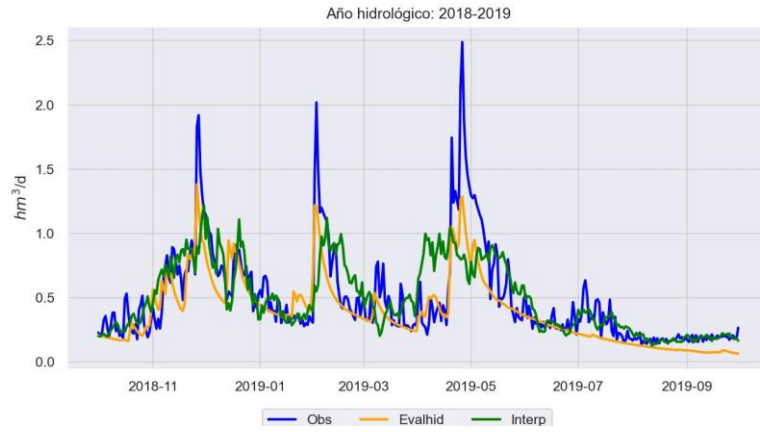




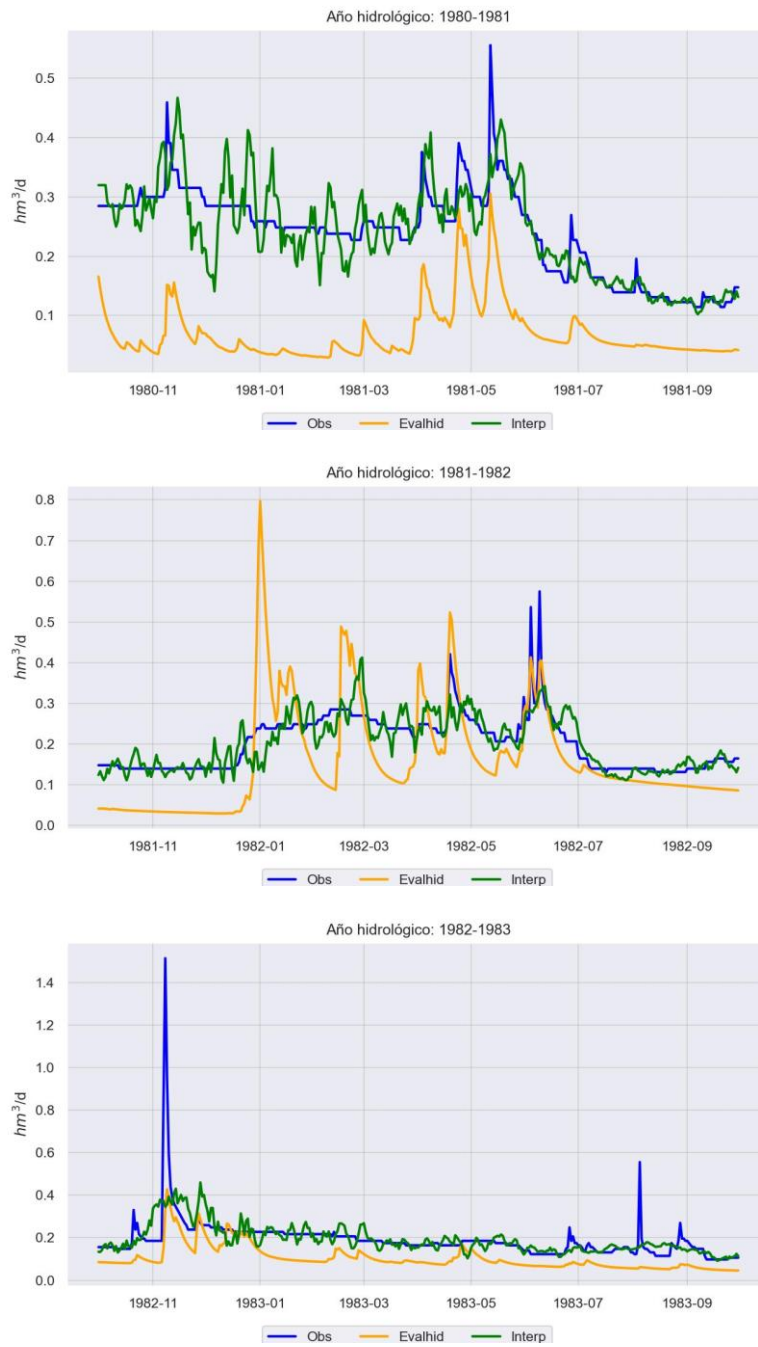


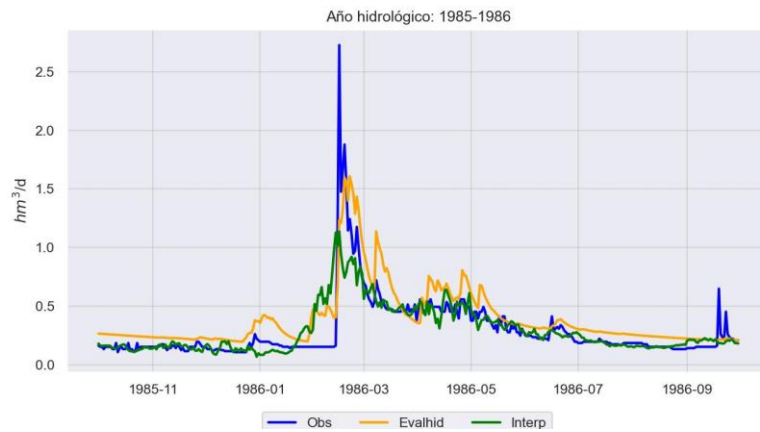
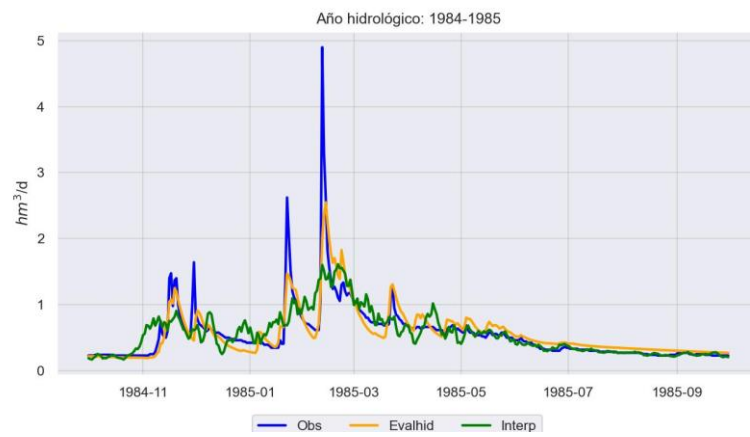
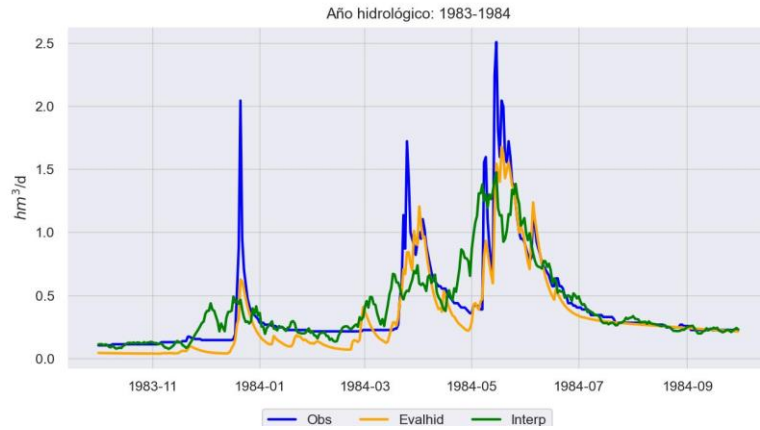


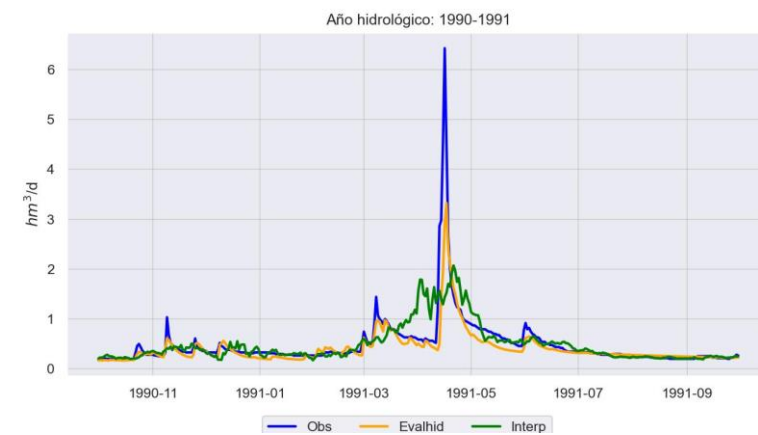
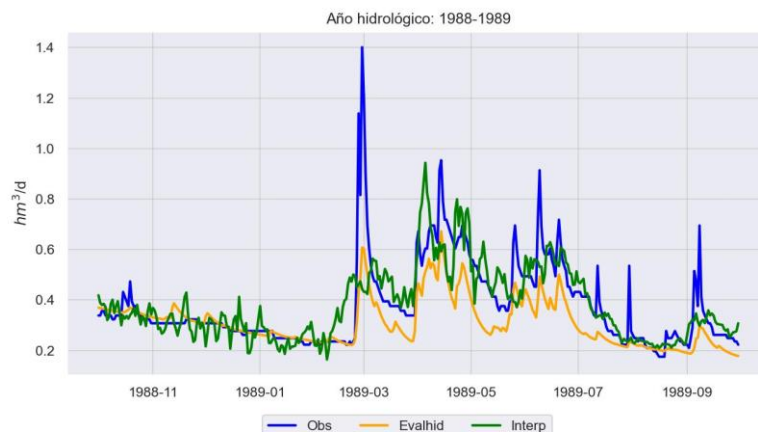
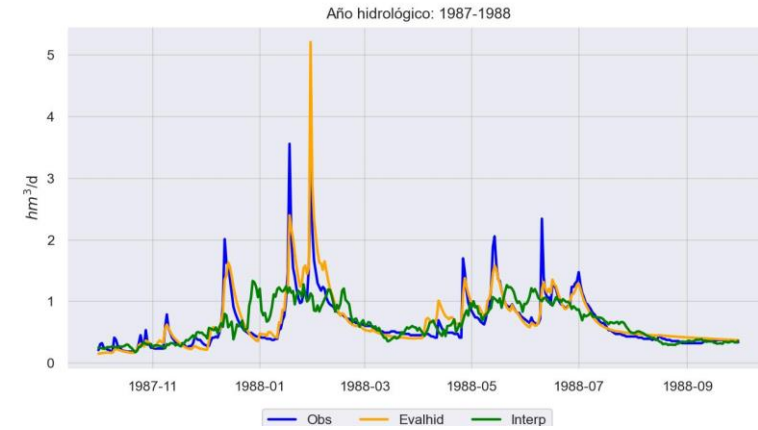


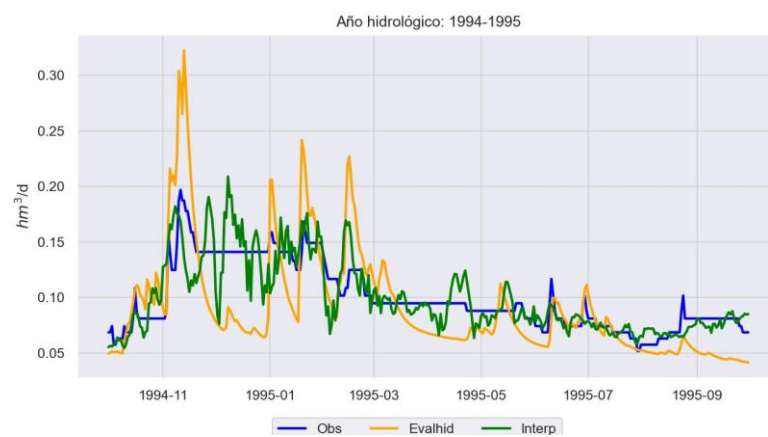
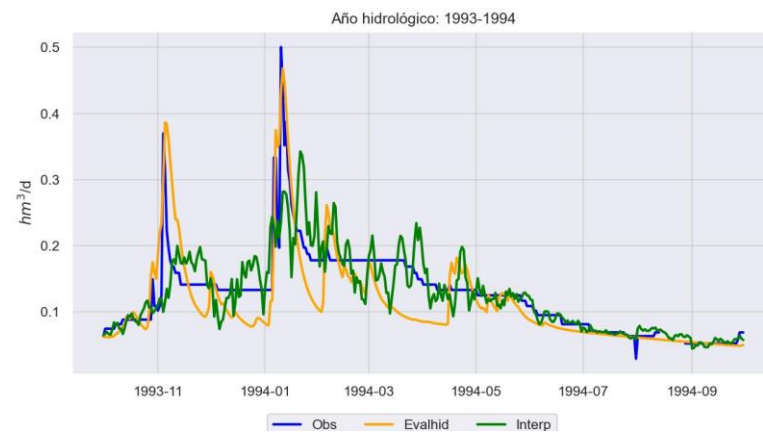
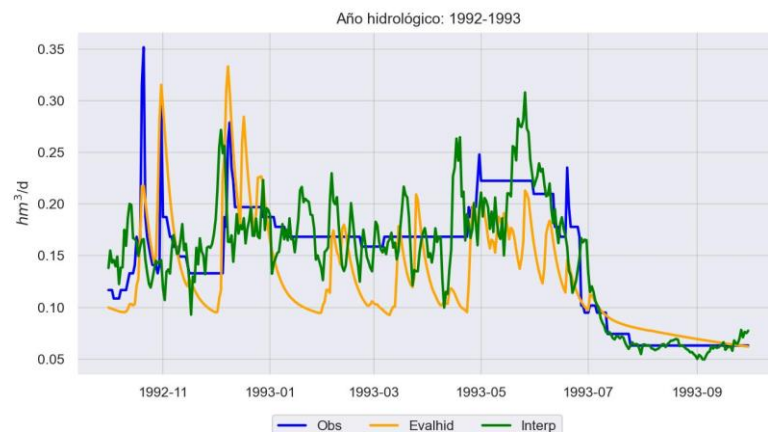


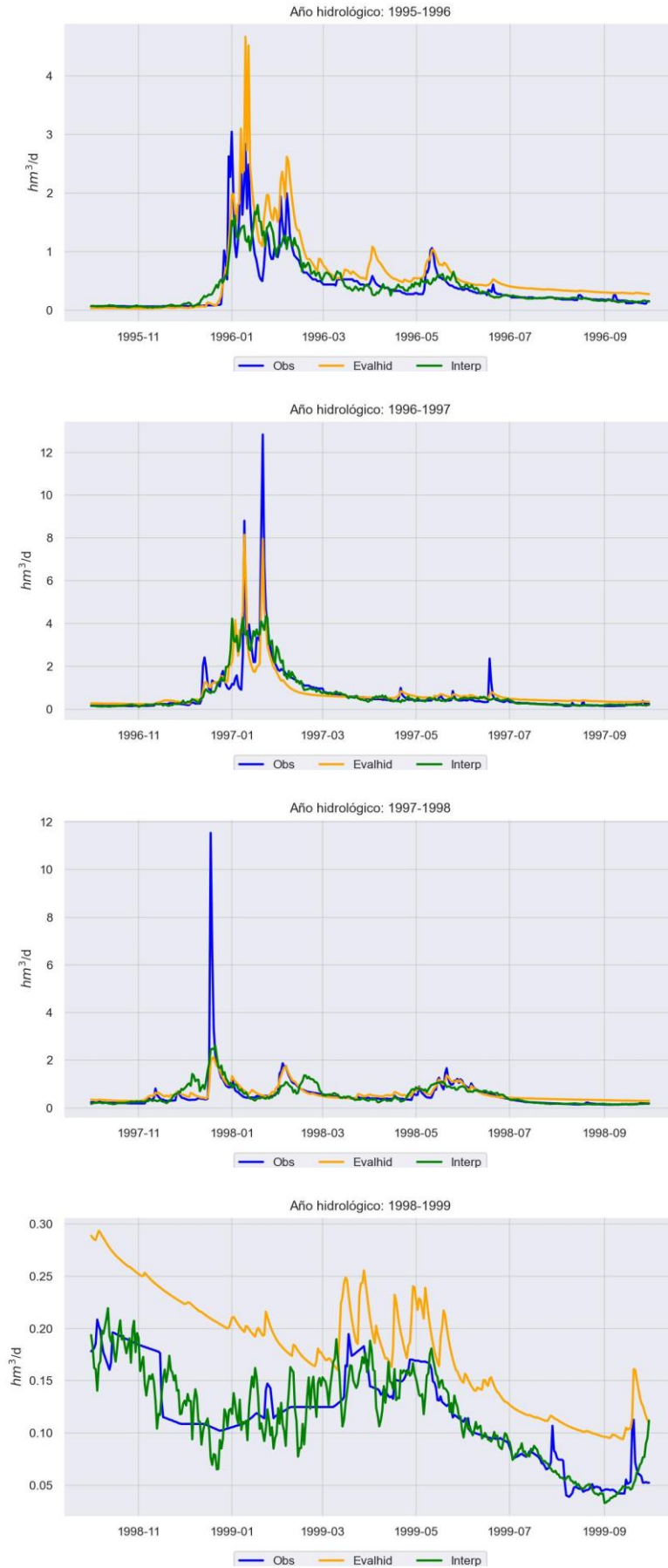
2.5. Comparación entre metodologías aplicadas en Pajaroncillo

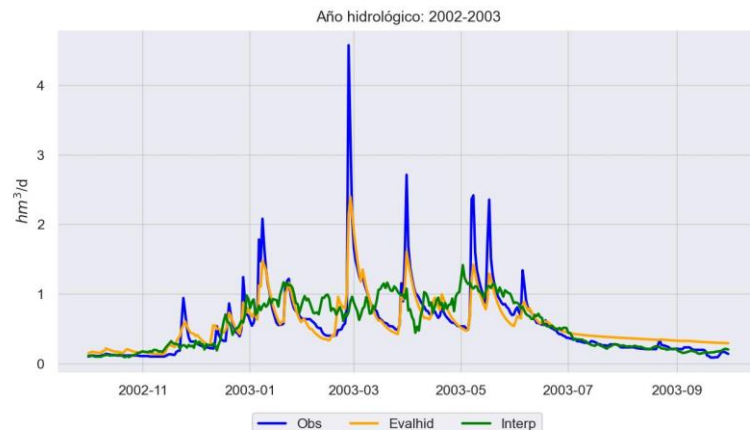
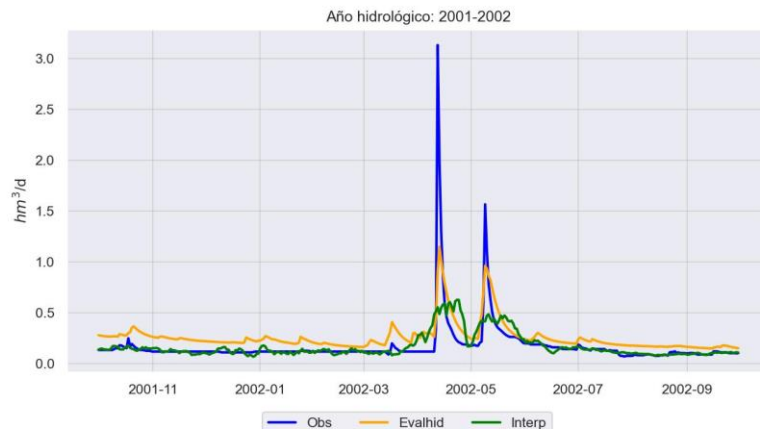
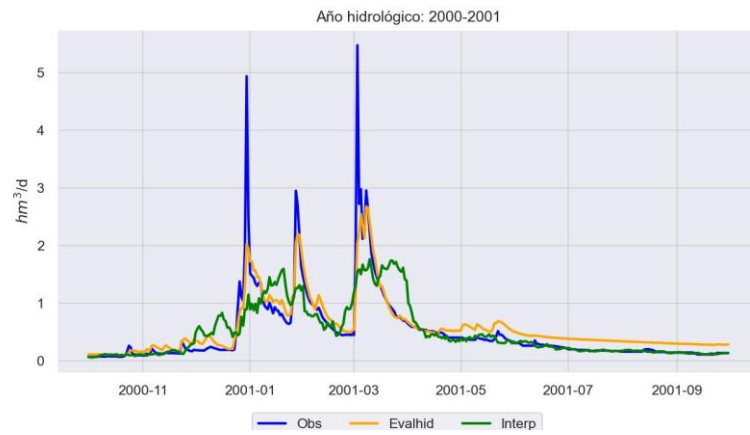
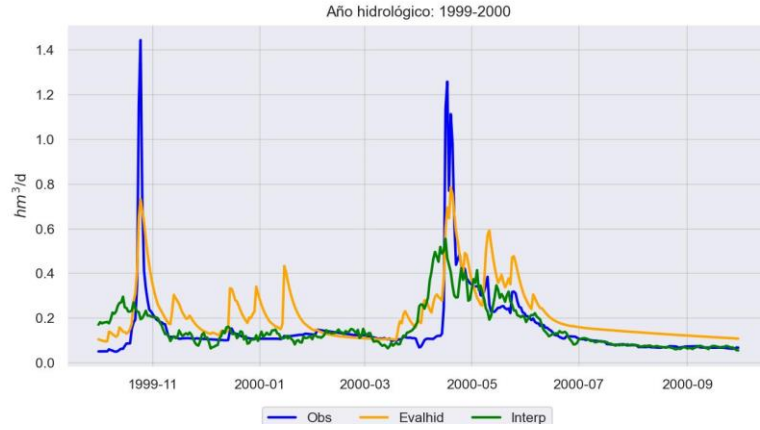


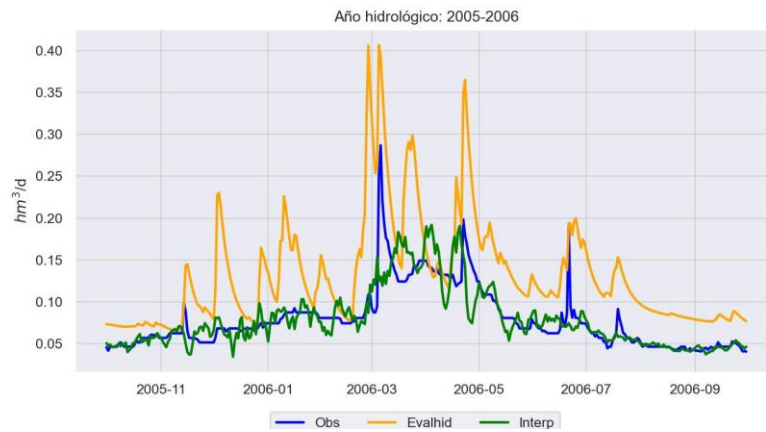
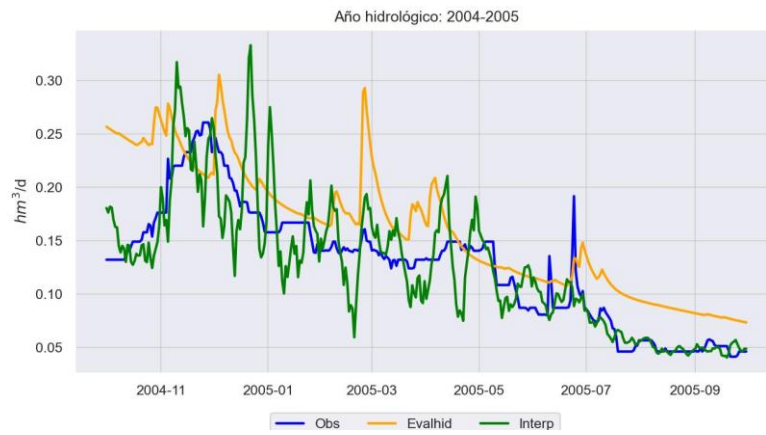
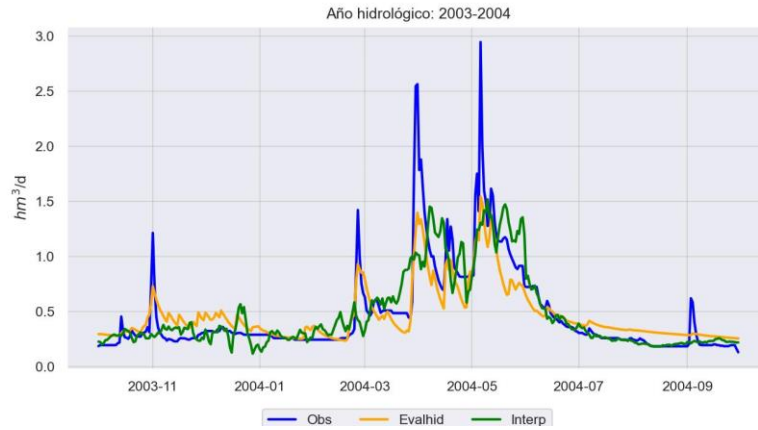




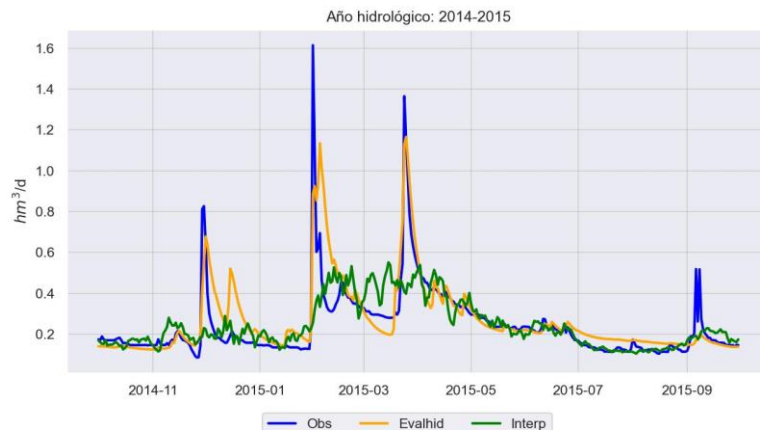
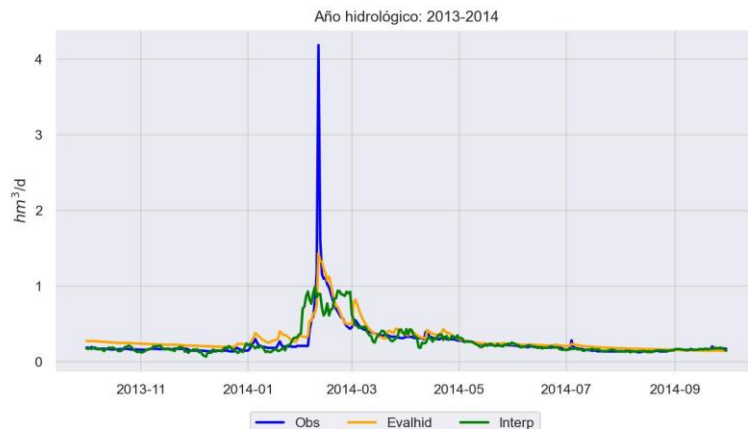
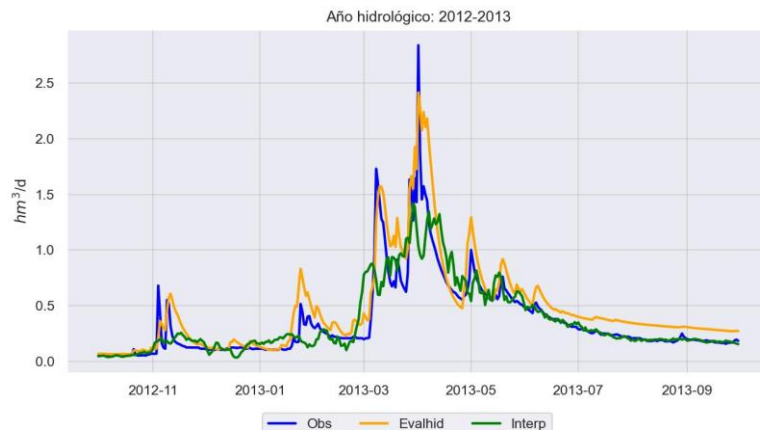
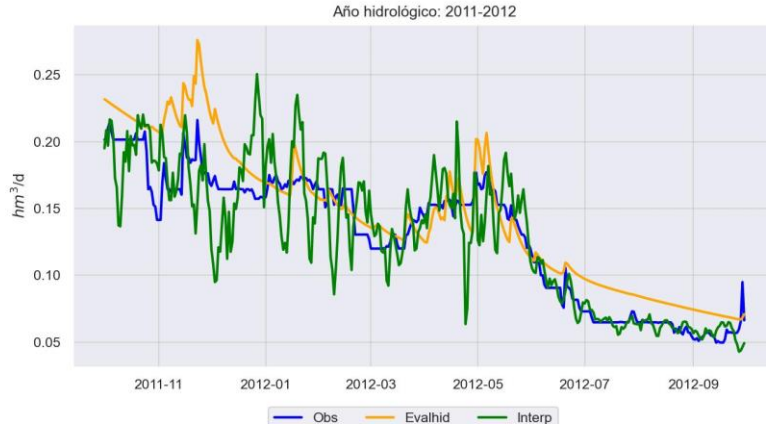


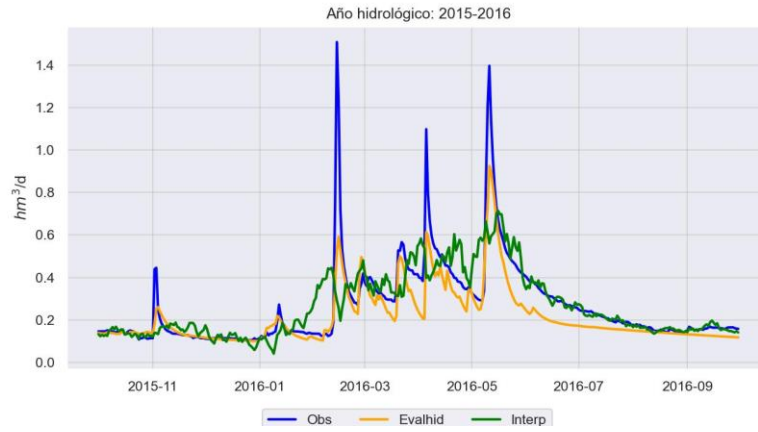


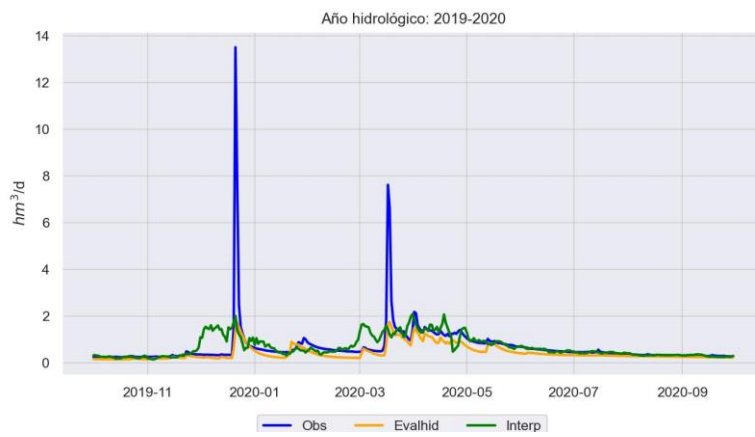
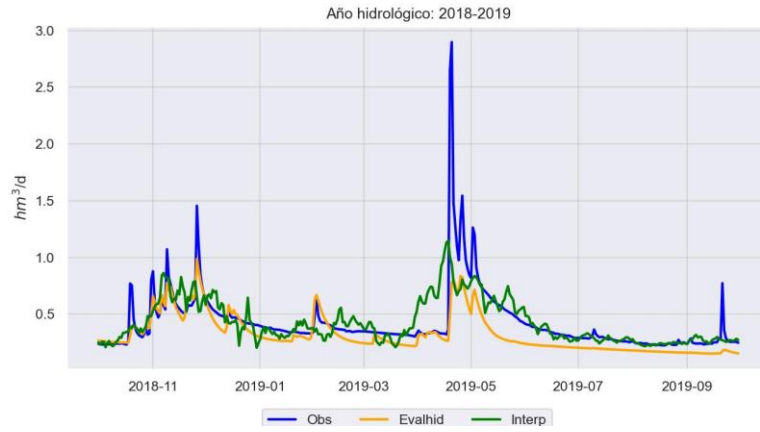












2.6. Comparación entre metodologías aplicadas en Zagra

