

Trabajo Fin de Máster

DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN DE CAUDALES MÍNIMOS EN CAUCES DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL RÍO ÓRBIGO

**Intensificación: *ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE
CUENCAS***

Autor:

FRANCISCO DANIEL HERNÁNDEZ SALINAS

Tutor:

DR. TEODORO ESTRELA MONREAL

Cotutor:

DR. LUIS MARÍA GARROTE DE MARCOS

SEPTIEMBRE, 2017



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN DE CAUDALES MÍNIMOS EN CAUCES DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL RÍO ÓRBIGO

Título del TFM en inglés: MINIMUM ENVIRONMENTAL FLOWS REGIME DETERMINATION AT RIVERS OF THE EXPLOITATION SYSTEM OF ÓRBIGO RIVER BASIN

Título del TFM en Valenciano: DETERMINACIÓ DEL RÈGIM DE CABALS MÍNIMS EN LLITS DEL SISTEMA D'EXPLOTACIÓ DEL RIU ÓRBIGO

Alumno: FRANCISCO DANIEL HERNÁNDEZ SALINAS

Tutor: DR. TEODORO ESTRELA MONREAL

Cotutor: DR. LUIS MARÍA GARROTE DE MARCOS

Fecha de Lectura: SEPTIEMBRE, 2017

Resumen

El objetivo del presente trabajo es determinar el régimen de caudales mínimos, mediante la aplicación de métodos hidrológicos, en diferentes cauces del sistema de explotación del río Órbigo y proponer una metodología que nos brinde buenos resultados de estos caudales en la zona de estudio partiendo únicamente de las series mensuales del modelo SIMPA.

Se han elegido estaciones de aforo con datos diarios de caudales en régimen natural en donde también se tienen datos mensuales de las series hidrológicas obtenidas mediante modelización hidrológica a partir de las precipitaciones con el modelo SIMPA. Se ha realizado una desagregación de las series mensuales a escala diaria de las estaciones de aforo, por un reparto lineal y un reparto constante. Después se han calculado los caudales ecológicos, para diferentes longitudes de serie, con los datos diarios originales y los estimados a partir de la media mensual. Al ya haber obtenido estos caudales ecológicos se ha realizado una comparación, por medio de gráficos de dispersión, con el fin de conocer cual método de reparto diario proporciona un mejor comportamiento, es decir, cuál obtiene valores de los caudales ecológicos parecidos a los calculados con los



datos diarios originales. Finalmente se ha optado por elegir dicho reparto diario para aplicarlo en las series con datos SIMPA y así calcular los caudales mínimos.

La elección de las series hidrológicas se realizó a través de un análisis de la representatividad de las mismas en donde se efectuó un estudio del ajuste conseguido entre las series y las estaciones de aforo en régimen natural.

Los procedimientos de cálculo de los caudales ecológicos por métodos hidrológicos usados en el presente trabajo son algunos de los propuestos en la Instrucción de Planificación Hidrológica. Se han aplicado dos métodos de variables de centralización móviles: caudal básico de mantenimiento y media móvil de orden 25. Además, se han utilizado los caudales ecológicos obtenidos de los percentiles de la curva de caudales clasificados por dos criterios distintos: clasificación mensual y clasificación en dos periodos (seco y húmedo).

En el trabajo se resuelve una cuestión de carácter metodológico que es la duración mínima de la serie a analizar para calcular los caudales mínimos en la zona de estudio. Ahora, teniendo ya elegida la repartición diaria y la longitud mínima a utilizar se han calculado los caudales ecológicos a las series con datos de SIMPA. A continuación, se ha realizado una comparación entre los caudales mínimos obtenidos con los datos observados en las estaciones de aforo y los simulados por SIMPA.

Se ha efectuado un análisis de las garantías en tiempo considerando los caudales ecológicos como demandas. Finalmente, se ha propuesto una metodología para determinar el régimen de caudales mínimos en los cauces de la zona de estudio.

Palabras clave: Caudales ecológicos, sistema de explotación del Órbigo, desagregación diaria, longitud mínima de la serie, metodología



Abstract

The aim of this paper is to determinate the regime of minimum flow, through the application of hydrologic methods, at different riverbeds of the exploitation system of Órbigo river and to propose a methodology so we can obtain good results of these riverbeds at the analyzed area only using monthly series from SIMPA model.

Gauging stations have been chosen with flows daily data in natural regime in which we also have hydrologic series monthly data obtained through hydrologic modelling based on precipitations with SIMPA model. A daily disintegration has been made from monthly series, by a lineal and constant distribution. Afterwards, environmental flows have been calculated for different series lengths, with daily original data and with the estimated based on monthly average. After having these environmental flows, a comparison has been made, through scatter plots, to know which daily disintegration method provides a better behavior, in other words, which obtains environmental flows results similar to the ones calculated with the original daily data. Finally, that daily distribution has been applied on series with SIMPA data and with this distribution, minimum flows have been calculated.

The selection of hydrologic series has been made though an analysis from the representation of those in where a study about the obtained adjustment between series and gauging stations in natural regime had been made.

The calculation procedures of environmental flows though hydrologic methods used on this paper are those proposed by the Instrucción de Planificación Hidrológica. Two mobile centralization variables method have been applied: base flow maintenance and moving average 25th order. Also, the environmental flows obtained from the percentiles of the flows curve have been used, classified by two different criteria: monthly classification and classification in two periods (dry and humid).

On this paper is resolved a methodological issue which is the minimum duration of the analyzed series to calculate minimum flows at the area. When we have already chosen the daily distribution and the minimum length, environmental flows have been calculated to the series with SIMPA data. Afterwards, minimum flows obtained with observed data of the



gauging stations and the ones simulated by SIMPA have been compared.

Time guarantees have been analyzed considering environmental flows as demands. Finally, a methodology has been proposed to determinate minimum flows regime on riverbeds of the area.

Key words: Environmental flows, exploitation system of Órbigo River, daily disintegration, minimum series length, daily disintegration, methodology

Resum

L'objectiu del present treball és determinar el règim de cabals mínims, per mitjà de l'aplicació de mètodes hidrològics, en diferents llits del sistema d'explotació del riu Órbigo i proposar una metodologia que ens brinde bons resultats d'estos cabals en la zona d'estudi partint únicament de les sèries mensuals del model SIMPA.

S'han triat estacions d'aforament amb dades diàries de cabals en règim natural on també es tenen dades mensuals de les sèries hidrològiques obtingudes per mitjà de modelització hidrològica a partir de les precipitacions amb el model SIMPA. S'ha realitzat una desagregació de les sèries mensuals a escala diària de les estacions d'aforament, per un repartiment lineal i un repartiment constant. Després s'han calculat els cabals ecològics, per a diferents longituds de sèrie, amb les dades diàries originals i els estimats a partir de la mitjana mensual. Una vegada obtinguts estos cabals ecològics s'ha realitzat una comparació, per mitjà de gràfics de dispersió, a fi de conèixer quin mètode de repartiment diari proporciona un millor comportament, és a dir, quin obté valors dels cabals ecològics pareguts als calculats amb les dades diàries originals. Finalment s'ha optat per triar aquest repartiment diari per a aplicar-ho en les sèries amb dades SIMPA i així calcular els cabals mínims.

L'elecció de les sèries hidrològiques es va realitzar a través d'un anàlisi de la representativitat de les mateixes on es va efectuar un estudi de l'ajust aconseguit entre les sèries i les estacions d'aforament en règim natural.



Els procediments de càlcul dels cabals ecològics per mètodes hidrològics usats en el present treball són alguns dels proposats en la Instrucció de Planificació Hidrològica. S'han aplicat dos mètodes de variables de centralització mòbils: cabal bàsic de manteniment i mitja mòbil d'orde 25. A més, s'han utilitzat els cabals ecològics obtinguts dels percentils de la corba de cabals classificats per dos criteris distints: classificació mensual i classificació en dos períodes (sec i humit).

En el treball es resol una qüestió de caràcter metodològic que és la duració mínima de la sèrie a analitzar per a calcular els cabals mínims en la zona d'estudi. Ara, tenint ja triada la repartició diària i la longitud mínima a utilitzar s'han calculat els cabals ecològics a les sèries amb dades de SIMPA. A continuació, s'ha realitzat una comparació entre els cabals mínims obtinguts amb les dades observats en les estacions d'aforament i els simulats per SIMPA.

S'ha efectuat una anàlisi de les garanties en temps considerant els cabals ecològics com a demandes. Finalment, s'ha proposat una metodologia per a determinar el règim de cabals mínims en els llits de la zona d'estudi.

Paraules claus: Cabals ecològics, sistema d'explotació de l'Órbigo, desagregació diària, longitud mínima de la sèrie, metodologia

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Teodoro Estrela Monreal y al Dr. Luis María Garrote de Marcos, directores de este trabajo, por la orientación y supervisión que me brindaron en la elaboración de la tesina.

Quiero agradecer a las instituciones que han hecho posible la realización del trabajo presentado en esta memoria. En primer lugar, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, México) por la ayuda económica brindada y el constante esfuerzo que dedica para promover el desarrollo de la ciencia y la tecnología. En segundo lugar, a la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) por contar con un programa de gran calidad internacional donde pude continuar con mi formación.

Finalmente, un especial agradecimiento a mi familia por el apoyo que siempre me han brindado, lo que me ha hecho crecer en muchos ámbitos de mi vida, principalmente como persona.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos del trabajo y procedimiento seguido.....	4
2. DATOS DE PARTIDA.....	7
2.1 Características de la zona de estudio	7
2.2 Datos hidrológicos.....	7
2.2.1 Datos del Anuario de Aforos	8
2.2.2 Datos de series hidrológicas en régimen natural mediante el modelo SIMPA.....	9
3. ANÁLISIS DE LA REPRESENTATIVIDAD DE LAS SERIES	11
3.1 Gráficos de comparación de series	11
3.1.1 Gráfico de secuencia temporal.....	11
3.1.2 Gráfico de dispersión	12
3.1.3 Gráficos de error relativo.....	12
3.1.4 Gráficos de desviaciones acumuladas.....	13
3.2 Comparación de modelos hidrológicos con aforos.....	14
4. MÉTODOS DE CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS	17
4.1 Tipos de métodos de caudales ecológicos.....	17
4.1.1 Enfoque hidrológico	17
4.1.2 Enfoque hidráulico	18
4.1.3 Enfoque hidrobiológico o simulación de hábitat	19
4.1.4 Enfoque holístico.....	20
4.2 Variables de centralización móviles	21
4.2.1 Caudal Básico de Mantenimiento (QBM)	21
4.2.2 Media Móvil de orden 25.....	23

4.3	Percentiles de la curva de caudales clasificados	24
4.3.1	Clasificación mensual	24
4.3.2	Clasificación en dos periodos	24
5.	LONGITUD DEL PERIODO ANALIZADO	25
5.1	Caudales ecológicos por el método de percentiles	25
5.1.1	Clasificación mensual	25
5.1.2	Clasificación en dos periodos: seco y húmedo	29
5.2	Caudales ecológicos por los métodos de variables de centralización móviles	32
5.2.1	Caudal básico de mantenimiento	32
5.2.2	Media móvil de orden 25	34
6.	DESAGREGACIÓN DE LAS SERIES MENSUALES	36
6.1	Gráficos comparativos de caudales ecológicos: datos diarios originales vs estimados (reparto)	38
6.1.1	Media móvil de orden 25	38
6.1.2	Caudal básico de mantenimiento	39
6.1.3	Percentiles de clasificación mensual	40
6.1.4	Percentiles de clasificación por periodos	42
6.2	Resultados obtenidos	44
6.3	Conclusiones	49
7.	COMPARACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS: SERIE-AFORO	51
7.1	Periodos y años coincidentes	51
7.2	Metodología seguida	51
7.3	Comparación de caudales ecológicos por distintos métodos	53
7.3.1	Métodos de variables de centralización	53
7.3.2	Método de percentiles a escala mensual	53
7.3.3	Método de percentiles por periodos	55

7.4 Resultados obtenidos.....	55
7.5 Comparación de caudales ecológicos anuales: serie – aforo	59
8. CAUDALES MÍNIMOS ECOLÓGICOS: RESUMEN DE RESULTADOS.....	63
8.1 Caudales ecológicos considerando toda la serie disponible	63
8.2 Caudales ecológicos considerando la serie desde 1980-81	64
8.3 Caudales ecológicos por el método de percentiles de la curva de caudales por una clasificación mensual	66
9. ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE CUMPLIMIENTO DE LOS CAUDALES ECOLÓGICOS	71
9.1 Análisis del porcentaje de cumplimiento de los caudales ecológicos considerando toda la serie disponible	72
9.2 Análisis del porcentaje de cumplimiento de los caudales ecológicos considerando la serie desde 1980-81	76
10. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	80
10.1 Resumen.....	80
10.2 Conclusiones finales	86
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
12. ANEXOS.....	¡Error! Marcador no definido.

FIGURAS

Figura 1. Sistema de Explotación del río Órbigo	7
Figura 2. Estaciones de aforo del SE Órbigo.....	8
Figura 3. Mapa de la red fluvial del SE Órbigo y masas de agua estudiadas.....	9
Figura 4. Gráfico de secuencia temporal en la estación de Morla de Valdería.....	11
Figura 5. Gráficos de comparación de valores anuales (izquierda) y mensuales (derecha) en la estación de aforo Morla de la Valdería mediante el modelo SIMPA	12
Figura 6. Gráfico de error relativo de valores anuales en la estación de aforo Morla de la Valdería	13
Figura 7. Gráfico de error relativo de valores mensuales en la estación de aforo Morla de la Valdería	13
Figura 8. Gráficos de desviaciones acumuladas en la estación de aforo Morla de la Valdería	14
Figura 9. Evolución del caudal ecológico por el método del percentil 85 % en función de la longitud de la serie analizada para el mes de junio	26
Figura 10. Evolución del caudal ecológico por el método del percentil 90 % en función de la longitud de la serie analizada para el mes de enero	26
Figura 11. Evolución del caudal ecológico por el método del percentil 95 % en función de la longitud de la serie analizada para el mes de marzo	26
Figura 12. Evolución del valor de (Q85M/Q85Mlim) en función de la longitud de la serie analizada para el mes de junio	28
Figura 13. Evolución del valor de (Q90M/Q90Mlim) en función de la longitud de la serie analizada para el mes de enero.....	28
Figura 14. Evolución del valor de (Q95M/Q95Mlim) en función de la longitud de la serie analizada para el mes de marzo	28
Figura 15. Evolución del caudal ecológico por el método del percentil 85 % en función de la longitud de la serie analizada para el periodo húmedo (izquierda) y el periodo seco (derecha).....	30
Figura 16. Evolución del caudal ecológico por el método del percentil 90 % en función de la longitud de la serie analizada para el periodo húmedo (izquierda) y el periodo seco (derecha).....	30

Figura 17. Evolución del caudal ecológico por el método del percentil 95 % en función de la longitud de la serie analizada para el periodo húmedo (izquierda) y el periodo seco (derecha).....	30
Figura 18. Evolución del valor de (Q85P/Q85Plim) en función de la longitud de la serie analizada para el periodo húmedo (izquierda) y el periodo seco (derecha).....	31
Figura 19. Evolución del valor de (Q90P/Q90Plim) en función de la longitud de la serie analizada para el periodo húmedo (izquierda) y el periodo seco (derecha).....	31
Figura 20. Evolución del valor de (Q95P/Q95Plim) en función de la longitud de la serie analizada para el periodo húmedo (izquierda) y el periodo seco (derecha).....	31
Figura 21. Evolución de los caudales ecológicos por el método del caudal básico de mantenimiento en función de la duración de la serie (comenzando por el final)	33
Figura 22. Evolución del valor de (QBM/QBMLim) en función de la longitud de la serie	33
Figura 23. Evolución de los caudales ecológicos por el método de la media móvil de orden 25 en función de la duración de la serie (comenzando por el final).....	34
Figura 24. Evolución del valor de (QMM25/QMM25lim) en función de la longitud de la serie.....	35
Figura 25. Caudales medios diarios en la estación de aforo 2076 Las Omañas para el año hidrológico 1998-99 para la serie original y las series desagregadas por una repartición constante y lineal	38
Figura 26. Gráficos de comparación del caudal QMM25 en la estación de aforo La Garandilla entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)	39
Figura 27. Gráficos de comparación del caudal QBM en la estación de aforo Las Omañas entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)	40
Figura 28. Gráficos de comparación del caudal Q85M en la estación de aforo Morla de la Valdería entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)	41
Figura 29. Gráficos de comparación del caudal Q90M en la estación de aforo Morla de la Valdería entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)	41

Figura 30. Gráficos de comparación del caudal Q95M en la estación de aforo Morla de la Valdería entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)	41
Figura 31. Gráficos de comparación del caudal Q85P en la estación de aforo Las Omañas entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)	42
Figura 32. Gráficos de comparación del caudal Q90P en la estación de aforo Las Omañas entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)	43
Figura 33. Gráficos de comparación del caudal Q95P en la estación de aforo Las Omañas entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)	43
Figura 34. Gráficos de comparación de los caudales QMM25 (izquierda) y QBM (derecha) en la estación de aforo Morla de la Valdería entre series observadas y simuladas	53
Figura 35. Gráficos de comparación de los caudales Q85M (izquierda), Q90M (derecha) y Q95M (abajo) en la estación de aforo Morla de la Valdería entre series observadas y simuladas	54
Figura 36. Gráficos de comparación de los caudales Q85P (izquierda), Q90P (derecha) y Q95P (abajo) en la estación de aforo Morla de la Valdería entre series observadas y simuladas	55
Figura 37. Gráfico de secuencia temporal en la estación Las Omañas.....	57
Figura 38. Gráficos de comparación de los caudales anuales de QMM25 (izquierda) y QBM (derecha) en la estación de aforo Las Omañas entre series observadas y simuladas	61
Figura 39. Gráficos anuales de garantía de los caudales ecológicos calculados para los datos diarios medidos en la estación de aforo Cebrones del Río (Izquierda) y La Garandilla (derecha)	73
Figura 40. Gráficos anuales de garantía de los caudales ecológicos calculados por series simuladas mediante el modelo SIMPA en la estación de aforo Cebrones del Río (Izquierda) y La Garandilla (derecha)	74
Figura 41. Gráficos anuales de garantía de los caudales ecológicos calculados para los datos diarios medidos en la estación de aforo Las Omañas (Izquierda) y Morla de la Valdería (derecha) desde 1980-81	76

TABLAS

Tabla 1. Registros de estaciones de aforo utilizadas en el estudio	8
Tabla 2. Puntos de cálculo de aportaciones en régimen natural calculadas mediante el modelo SIMPA utilizados en el estudio.....	10
Tabla 3. Masas de agua utilizadas en el estudio	10
Tabla 4. Resultados del ajuste a escala anual	14
Tabla 5. Resultados del ajuste a escala mensual.....	15
Tabla 6. Valores medios de los errores relativos (con su signo)	15
Tabla 7. Valores medios de los errores relativos (valor absoluto)	15
Tabla 8. Resultados del ajuste de caudal ecológico por métodos de media móvil a partir de series observadas diarias y mensuales (Reparto lineal)	44
Tabla 9. Resultados del ajuste de caudal ecológico por métodos de media móvil a partir de series observadas diarias y mensuales (Reparto constante)	44
Tabla 10. Resultado del ajuste de caudal ecológico por el método de cuantiles a escala mensual a partir de series observadas diarias y mensuales (Reparto lineal) 46	
Tabla 11. Resultado del ajuste de caudal ecológico por el método de cuantiles a escala mensual a partir de series observadas diarias y mensuales (Reparto constante).....	46
Tabla 12. Resultado del ajuste de caudal ecológico por el método de cuantiles por periodos a partir de series observadas diarias y mensuales (Reparto lineal).....	48
Tabla 13. Resultado del ajuste de caudal ecológico por el método de cuantiles por periodos a partir de series observadas diarias y mensuales (Reparto constante)....	48
Tabla 14. Periodos y años con registros de datos para ambas series: AFORO-SIMPA	51
Tabla 15. Resultados del ajuste de caudal ecológico por métodos de media móvil a partir de series observadas (AFORO) y simuladas (SIMPA)	56
Tabla 16. Resultados del ajuste de caudal ecológico por el método de cuantiles a escala mensual a partir de series observadas (AFORO) y simuladas (SIMPA)	58
Tabla 17. Resultados del ajuste de caudal ecológico por el método de cuantiles por periodos a partir de series observadas (AFORO) y simuladas (SIMPA)	59
Tabla 18. Resultados del ajuste de los caudales ecológicos anuales por métodos de media móvil a partir de series observadas (AFORO) y simuladas (SIMPA)	62

Tabla 19. Caudales ecológicos (m ³ /s) calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo considerando toda la serie disponible	63
Tabla 20. Caudales ecológicos (m ³ /s) calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA considerando toda la serie disponible	63
Tabla 21. Caudales ecológicos (m ³ /s) calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo considerando la serie desde 1980-81	64
Tabla 22. Caudales ecológicos (m ³ /s) calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA considerando la serie desde 1980-81	65
Tabla 23. Caudales ecológicos (m ³ /s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2060 Cebrones del Río considerando toda la serie disponible.....	67
Tabla 24. Caudales ecológicos (m ³ /s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2076 Las Omañas considerando toda la serie disponible	67
Tabla 25. Caudales ecológicos (m ³ /s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2083 La Garandilla considerando toda la serie disponible	67
Tabla 26. Caudales ecológicos (m ³ /s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2089 Morla de la Valdería considerando toda la serie disponible.....	67
Tabla 27. Caudales ecológicos (m ³ /s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA en la masa de agua 48 Río Órbigo considerando toda la serie disponible.....	68
Tabla 28. Caudales ecológicos (m ³ /s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA en la masa de agua 64 Río Omañas considerando toda la serie disponible	68
Tabla 29. Caudales ecológicos (m ³ /s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA en la masa de agua 172 Río Eria considerando toda la serie disponible	68
Tabla 30. Caudales ecológicos (m ³ /s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2060 Cebrones del Río considerando la serie desde 1980-81	68
Tabla 31. Caudales ecológicos (m ³ /s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2076 Las Omañas considerando la serie desde 1980-81	69

Tabla 32. Caudales ecológicos (m ³ /s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2089 Morla de la Valdería considerando la serie desde 1980-81	69
Tabla 33. Caudales ecológicos (m ³ /s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA en la masa de agua 48 Río Órbigo considerando la serie desde 1980-81	69
Tabla 34. Caudales ecológicos (m ³ /s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA en la masa de agua 64 Río Omañas considerando la serie desde 1980-81	69
Tabla 35. Caudales ecológicos (m ³ /s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA en la masa de agua 172 Río Eria considerando la serie desde 1980-81	69
Tabla 36. Resultados de garantía (%) en tiempo del caudal ecológico considerando todos los años disponibles para las series diarias observadas	75
Tabla 37. Resultados de garantía (%) en tiempo del caudal ecológico considerando todos los años en coincidencia disponibles para las series simuladas mediante el modelo SIMPA.....	75
Tabla 38. Resultados de garantía (%) en tiempo del caudal ecológico considerando la serie desde 1980-81 para los datos diarios observadas.....	78
Tabla 39. Resultados de garantía (%) en tiempo del caudal ecológico considerando todos los años en coincidencia disponibles para las series simuladas mediante el modelo SIMPA desde 1980-81	78

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En las últimas décadas la sociedad ha apreciado las presiones que sufren los sistemas de aguas naturales en nuestro entorno y las consecuencias negativas que suponen las alteraciones a estas masas de agua, en las cuales la sobreexplotación de los recursos hídricos ha conducido al progresivo deterioro de los ecosistemas fluviales (Naiman et al. 2008). Se ha visto que estas acciones afectan al medio natural, como la flora y la fauna, así como provocan cambios cualitativos y cuantitativos del agua, el cual es un recurso fundamental para las sociedades. Por ello, ha crecido una preocupación generalizada del estado de las masas de agua, en donde la sociedad es más consciente de la importancia de estos sistemas naturales produciendo un compromiso por recuperar y vigilar el estado de las mismas.

En Europa, esta preocupación y compromiso se han visto reflejados en la Directiva Marco Europea del Agua (DMA) que nace como respuesta a la necesidad de unificar las actuaciones en materia de gestión de agua en la Unión Europea (CHJ, 2007) donde la DMA permite establecer unos objetivos medioambientales homogéneos entre los Estados miembros. En España los organismos competentes de establecer y vigilar las acciones para la mejora de los sistemas acuáticos son las denominadas Confederaciones Hidrográficas, que por medio de planes hidrológicos buscan cumplir estos propósitos.

Uno de los principales conceptos que se incluyen en estos planes son los llamados caudales ecológicos, definido por el Reglamento de Planificación Hidrológica como aquel régimen de caudales que permite mantener de forma sostenible la funcionalidad y estructura de los ecosistemas acuáticos y de los ecosistemas terrestres asociados, contribuyendo a alcanzar el buen estado o potencial ecológico en ríos o aguas de transición (Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre). En este contexto la definición de los caudales ecológicos está estrechamente relacionada con la cantidad de agua que debe haber en el ecosistema acuático en cada momento para su adecuada conservación y mantenimiento (Estrela, 2013).

La preocupación de la regulación de los caudales ecológicos, manteniendo un régimen de caudales circulantes con la finalidad de preservar la vida piscícola, no es una novedad de la actual regulación en materia de aguas en España sino que se pueden encontrar antecedentes normativos en los que se establecía la exigencia de unos caudales mínimos, como por ejemplo la Ley de 20 de febrero de 1942 por la que se regula el fomento y conservación de la pesca fluvial. Las primeras referencias al concepto de caudal ecológico se encuentran en la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. Su artículo 40, referido al contenido de los planes hidrológicos de cuenca, establece en su apartado c), como contenido obligatorio del plan, la asignación y reserva de recursos para usos actuales y futuros, así como para la conservación o recuperación del medio natural.

En el artículo 42 y apartado 1.b.c' del texto refundido de la Ley de Aguas (TRLA), en la modificación llevada a cabo por la Ley 11/2005, de 22 de junio de modificación de la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, se establece que los planes hidrológicos de cuenca deben buscar conseguir la conservación y recuperación del medio natural de los ríos. Para lograr el objetivo previamente señalado el TRLA considera los caudales ecológicos como aquellos que mantienen como mínimo la vida piscícola que de manera natural habitaría o pudiera habitar en el río, así como su vegetación de ribera.

Por la complejidad técnica de la materia y por buscar alcanzar un mejor conocimiento de la funcionalidad de los caudales ecológicos y de la estructura de los ecosistemas acuáticos existe una necesidad de actualizar la normativa con respecto a los caudales ecológicos siendo un proceso de constante mejora. La legislación de aguas precisa de un régimen jurídico completo de los caudales ecológicos en la vertiente de su exigibilidad, de su seguimiento y en definitiva de su efectiva aplicación práctica. La búsqueda de una mejor conservación o recuperación del medio natural ha llevado a una constante actualización del Reglamento de Planificación Hidrológica siendo el Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre de 2016 (Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre) , el más reciente en el que se modificó el Reglamento del Dominio Público Hidráulico aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, el Reglamento de Planificación Hidrológica, aprobado por el Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, y otros reglamentos en materia de gestión

de riesgos de inundación, caudales ecológicos, reservas hidrológicas y vertidos de aguas residuales.

El régimen de caudales ecológicos se divide en los siguientes componentes: caudales mínimos que deben ser superados, caudales máximos que no deben ser superados, distribución temporal, caudales de crecida y tasa de cambio (CHDuero, 2015) teniendo cada uno de ellos una función e importancia ambiental.

Este trabajo está centrado en los caudales mínimos que deben ser superados con objeto de mantener la diversidad espacial del hábitat y su conectividad, asegurando los mecanismos de control del hábitat sobre las comunidades biológicas, de forma que se favorezca el mantenimiento de las comunidades autóctonas (CHDuero, 2015).

Al ya tener claro el concepto de los caudales mínimos sólo hace falta determinar la forma de calcularlos, situación que mostraba cierta dificultad para establecerse, pero ya ha sido resuelta. Con el fin de resolver esta cuestión de la determinación del régimen de caudales se han desarrollado en las últimas décadas multitud de métodos para el establecimiento del régimen de caudales ecológicos (Tharme, 2003). La complejidad técnica de los trabajos necesarios ha hecho que se haya desarrollado un enfoque metodológico en la Instrucción de Planificación Hidrológica, aprobada mediante Orden del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM) (Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, BOE núm. 229, de 22 de septiembre de 2008) (Polo y Torres, 2009). El objetivo de esta instrucción es establecer los criterios técnicos para la homogeneización y sistematización de los trabajos de elaboración de los planes hidrológicos de cuenca, conforme a lo establecido en el Reglamento de Planificación Hidrológica (Estrela, 2011).

La IPH plantea para la determinación de los caudales mínimos la utilización combinada de métodos hidrológicos y de simulación del hábitat. Los hidrológicos se fundamentan en un tratamiento estadístico de las series hidrológicas naturales o restituidas a régimen natural, mientras que los de simulación de hábitat se basan en las relaciones entre el hábitat físico de una especie de referencia y los diferentes regímenes de caudales que condicionan el hábitat de las especies.

En el estudio de caudales ecológicos se necesita conocer los caudales naturales de los ríos para al menos 20 años consecutivos con el fin de contar con datos representativos que presenten una alternancia equilibrada entre años secos y húmedos (Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre). El contar con registros para cada río, con años suficientes y, sobre todo, que no estén alterados es prácticamente imposible ya que se necesitaría una estación de aforo para cada río con suficientes años de registros y además, todos tendrían que tener la condición de no alterado. El conseguir que todos los ríos no muestren ninguna alteración resolvería el problema y no sería necesario calcular los caudales ecológicos ni tomar ninguna medida, pero no es la situación para muchos ríos que han sido alterados con barreras, tomas agrícolas, etc. para el uso del agua.

Por las razones anteriores se utilizan series hidrológicas que intentan restituir el régimen natural en los ríos a partir de datos de precipitación mediante modelizaciones. En España se utiliza el Sistema Integrado para la Modelación del proceso Precipitación Aportación, por sus siglas, SIMPA (CEDEX, 1996). Este modelo comenzó a desarrollarse con ocasión de la redacción del Libro Blanco del Agua y simula caudales medios mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica de una cuenca (Estrela y Quintas, 1996a y 1996b, Ruiz, 1998).

1.2 Objetivos del trabajo y procedimiento seguido

La finalidad del presente estudio es determinar el régimen de caudales mínimos, mediante la aplicación de métodos hidrológicos propuestos en la Instrucción de Planificación, en diferentes cauces del sistema de explotación del río Órbigo. Además, se pretende evaluar cuál es la metodología del cálculo de los caudales ecológicos que brinda buenos resultados de los mismos en la zona de estudio partiendo únicamente de las series mensuales del modelo SIMPA.

El éxito de la determinación de los caudales ecológicos se buscó conseguir con el empleo de diferentes análisis y estudios que se aplicaron a las series aforadas y/o simuladas. Estos estudios desempeñaron un papel de objetivos particulares siendo fundamentales para lograr el objetivo genérico del trabajo. La estructura del escrito se desarrolló en diferentes apartados que muestran los análisis y estudios efectuados como: el análisis de la representatividad de las series, determinación de la longitud mínima de la serie, elección del método de desagregación de la serie,

comparación de los caudales ecológicos entre series y análisis del porcentaje de cumplimiento de los caudales ecológicos.

En primer lugar, se han elegido las estaciones de aforo que cuentan con datos diarios de caudales en régimen natural dentro del sistema de explotación del río Órbigo y con un mínimo de 20 años de registro. Paso seguido, se seleccionaron los emplazamientos, con series hidrológicas mensuales a partir de las precipitaciones con el modelo SIMPA, más próximas a las estaciones de aforo. Por tanto, en este punto ya se tienen escogidas las estaciones de aforo y sus correspondientes masas de agua codificadas en el Plan Hidrológico del Duero. Lo siguiente, fue elaborar un análisis de la representatividad de las series, en la que se buscó examinar el parecido que tienen las series procedentes de los datos aforados con los datos simulados.

La elección de los métodos hidrológicos de cálculo de caudales ecológicos que se emplearon en el estudio fue la posterior cuestión que se resolvió. El siguiente análisis que se efectuó, de carácter metodológico, al igual que la elección del método de cálculo, fue el de la longitud del periodo a analizar. En este lo que se pretende es observar los valores y la evolución temporal de los caudales ecológicos en función de la longitud de la serie, viendo si se tiende a converger a un cierto valor y así conocer la duración mínima para la cual se obtendrían buenos resultados.

Los métodos hidrológicos propuestos en la Instrucción para el cálculo y determinación de caudales mínimos que se han usado en el presente trabajo necesitan de datos de caudales naturales diarios. Por lo anterior, resulta necesaria la desagregación de los datos mensuales del modelo SIMPA a una escala diaria (CHDuero, 2015). No obstante, se debe elegir con criterio una distribución de repartición para calcular los datos diarios procedentes de la serie mensual. Por esta razón, se han utilizado los registros de los caudales en las estaciones de aforo en régimen natural.

En las series aforadas se efectuó, por dos distribuciones, lineal y constante, la desagregación a escala diaria partiendo de las medias mensuales de las estaciones de aforo. Al igual que en el análisis de la longitud de la serie, se han calculado los caudales ecológicos para diferentes duraciones. Por último, se eligió el reparto que brindó resultados de los caudales ecológicos más parecidos a los obtenidos con los

datos diarios originales. Acto seguido se aplicó la distribución del reparto a los datos de la serie simulada para de esta manera conseguir una serie desagregada a escala diaria y así poder determinar los caudales ecológicos para las series con el modelo SIMPA. Después, se realizó la comparación entre los caudales ecológicos calculados a partir de las observaciones diarias en las estaciones de aforo y a partir de la serie desagregada por simulación hidrológica en las masas de agua. En donde lógicamente para efectuarse la comparación fue necesario determinar los caudales ecológicos con el mismo periodo de las series. Es decir, deben coincidir con la misma duración, comienzo y fin para cada una de las dos series, aforada y simulada, que se van a comparar.

El capítulo siguiente muestra la recopilación de los resultados obtenidos de los caudales ecológicos por todos los métodos de cálculo usados en el estudio. Se presenta el resumen para las series originales registradas en las estaciones de aforo para la totalidad de las series y para las series desde 1980-81, mientras que para las series hidrológicas simuladas se presentan los caudales ecológicos para la denominada serie larga (1940/41-2005/06) y la serie corta (1980/81-2005/06).

Finalmente se ha realizado un análisis de los porcentajes de cumplimiento en tiempo de los caudales ecológicos, obtenidos con las series aforadas y simuladas, para ver si en las series en régimen natural se incumplen los umbrales de dichos caudales. La normativa española, precisa que el incumplimiento de los caudales ambientales debe ser considerado una situación excepcional. Lo que se busca con este análisis es seleccionar el método más apropiado y fijar sus criterios de cálculo.

2. DATOS DE PARTIDA

2.1 Características de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en el sistema de explotación Órbigo la cual comprende la cuenca generada por el río homónimo con una superficie total del sistema de 4986 km². Este río se encuentra en el noroeste de España y discurre de Norte a Sur por las provincias de León y Zamora hasta aguas abajo de la ciudad de Benavente donde cede su caudal al río Esla, que a su vez es tributario del Duero. La cabecera del Órbigo está formada por los ríos Omañas y Luna, cuya confluencia da origen al río Órbigo propiamente dicho. Los afluentes más destacados del Órbigo surgen por su derecha, coincidiendo con las elevaciones orográficas de los Montes de León y la Sierra de la Cabrera; así, se distingue los ríos Tuerto, del que el Duerna es tributario directo, Jamuz y Eria. Finalmente, el Órbigo entrega sus aguas al Esla antes de que éste confluya con el Tera (CHDuero, 2012).

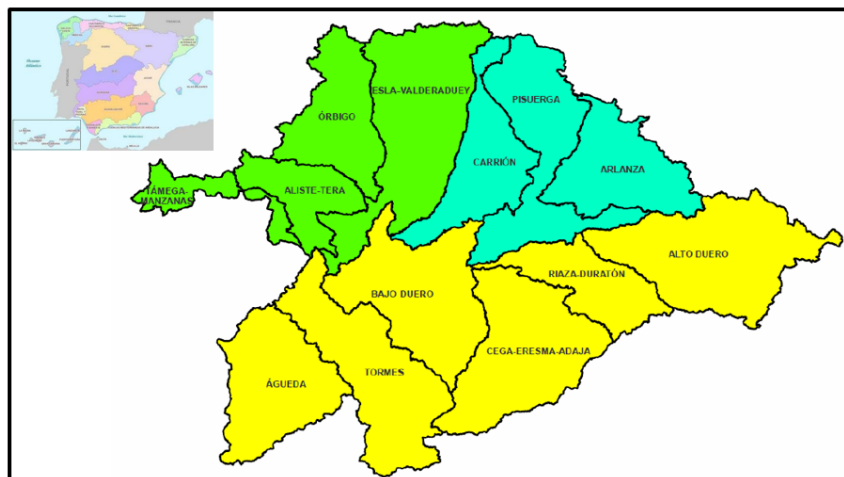


Figura 1. Sistema de Explotación del río Órbigo

2.2 Datos hidrológicos

En el estudio se han utilizado dos fuentes fundamentales de datos:

- Datos de series hidrológicas en régimen natural, obtenidos por el Centro de Estudios Hidrográficos mediante el empleo del modelo SIMPA a escala mensual en el periodo 1940-41 a 2005-06.
- Datos del Anuario de Aforos 2013-2014, publicado por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA, 2014).

2.2.1 Datos del Anuario de Aforos

Los datos de aforos se recogen de los anuarios de datos foronómicos y de embalses de la cuenca del Duero así como de los datos de estaciones foronómicas del anuario de aforos realizados por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. En la zona en estudio hay un total de 12 estaciones de aforos con datos, que se representan en la Figura 2.



Figura 2. Estaciones de aforo del SE Órbigo

Se han seleccionado todas las estaciones de aforos en régimen natural dentro del sistema de explotación del río Órbigo con un mínimo de veinte años de registro de caudales medios diarios.

Tabla 1. Registros de estaciones de aforo utilizadas en el estudio

Estación	Denominación	Río	Inicio - fin lecturas	Años con datos (completos)	Superficie de la cuenca receptora (km ²)	Porcentaje del área respecto a la cuenca total del río (%)
EA 2060	Cebrones del Río	Órbigo	1972 - 2013	41 (36)	3192	63
EA 2076	Las Omañas	Omañas	1961 - 2013	52 (39)	481	93
EA 2083	La Garandilla	Omañas	1969 - 1994	25 (20)	402	78
EA 2089	Morla de la Valdería	Eria	1942 - 2013	71 (70)	280	43

2.2.2 Datos de series hidrológicas en régimen natural mediante el modelo SIMPA

El Sistema Integrado para la Modelación del proceso Precipitación Aportación, por sus siglas, SIMPA, es el modelo del cual se han obtenido los datos de series hidrológicas en régimen natural que, como su nombre lo dice, obtiene sus datos mediante modelización hidrológica a partir de las precipitaciones. La modelización ha sido realizada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. La zona modelada corresponde al territorio peninsular de España en la cual se ha utilizado un paso de tiempo de un mes y una resolución espacial de 1 km². El modelo comenzó a desarrollarse a mediados de los años 90 con el propósito de la redacción del Libro Blanco del Agua, y ha ido evolucionando con sucesivas versiones. Los datos disponibles abarcan la denominada serie larga del periodo 1940-41 a 2005-06.

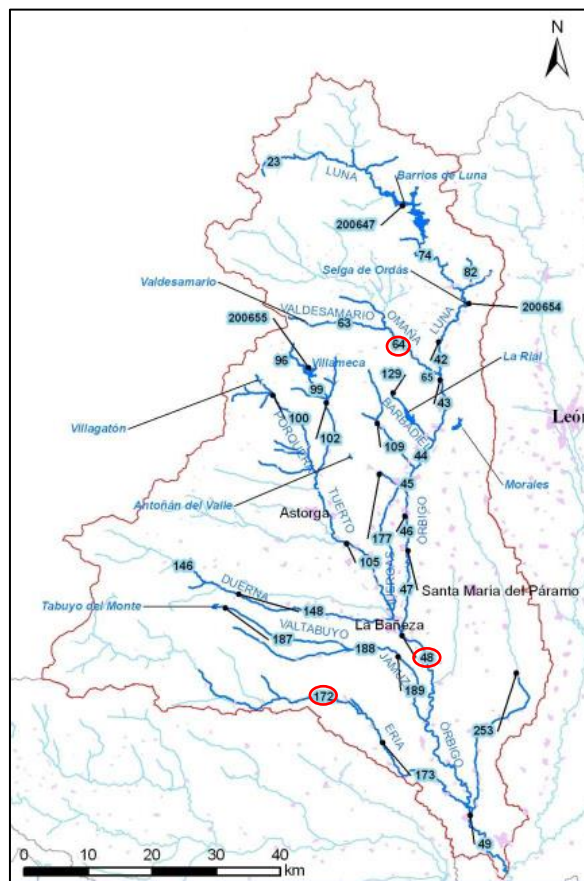


Figura 3. Mapa de la red fluvial del SE Órbigo y masas de agua estudiadas

A continuación, se detallan las masas de agua seleccionadas para el estudio que coinciden con las estaciones de aforo identificadas anteriormente.

Tabla 2. Puntos de cálculo de aportaciones en régimen natural calculadas mediante el modelo SIMPA utilizados en el estudio

Código	Denominación	Río	Aportación media (Hm ³ /año)	Caudal medio (m ³ /s)	Superficie de la cuenca receptora (km ²)	Porcentaje del área respecto a la cuenca total del río (%)
48	EA 2060 Cebrones del Río	Órbigo	1336.88	42.39	3730.5	74.0
64	EA 2076 Las Omañas	Omañas	347.18	11.01	502.9	97.5
	EA 2083 La Garandilla					
172	EA 2089 Morla de la Valdería	Eria	189.48	6.01	557.9	84.9

Tabla 3. Masas de agua utilizadas en el estudio

Código	Descripción del tramo
48	Río Órbigo desde confluencia con el Río Tuerto hasta límite del LIC Ribera del Río Órbigo y afluentes
64	Río Omañas desde confluencia con el Río Negro hasta LIC Riberas Río Órbigo y afluentes y Río Negro desde cabecera hasta confluencia con Río Omañas
172	Río Eria desde el límite inicio del LIC "Riberas del río Órbigo y afluentes" hasta límite final de dicho LIC, a la altura de Alcubilla de Nogales, y afluentes (Ayo. del Villar y Ayo. Valdellimbre o del Hoyuelo)

3. ANÁLISIS DE LA REPRESENTATIVIDAD DE LAS SERIES

En esta sección se analiza en primer lugar la representatividad de las series hidrológicas obtenidas mediante simulación. Para ello se ha realizado un estudio del ajuste conseguido entre las series y las estaciones de aforo en régimen natural. Para ilustrar la metodología empleada se han tomado como ejemplo los resultados obtenidos con la serie de la estación de aforos EA2089 Morla de la Valdería del río Eria. En los Anexos 1 a 4 se presentan con detalle los resultados obtenidos en todas las series analizadas.

3.1 Gráficos de comparación de series

Con el propósito de analizar la representatividad y similitud de las series se ha realizado la comparación entre los valores de la serie obtenida por simulación hidrológica SIMPA y las observaciones en la estación de aforos mediante distintos procedimientos gráficos. A continuación, se describen los gráficos obtenidos, presentando los ejemplos correspondientes a la serie de Morla de Valdería del Eria.

3.1.1 Gráfico de secuencia temporal

En los gráficos de secuencia temporal se comparan los valores de caudales medios mensuales simulados mediante el modelo SIMPA con los valores registrados por la estación de aforo. El periodo simulado (1944-2005) se ha dividido en cuatro partes, representando una en cada gráfico individual.

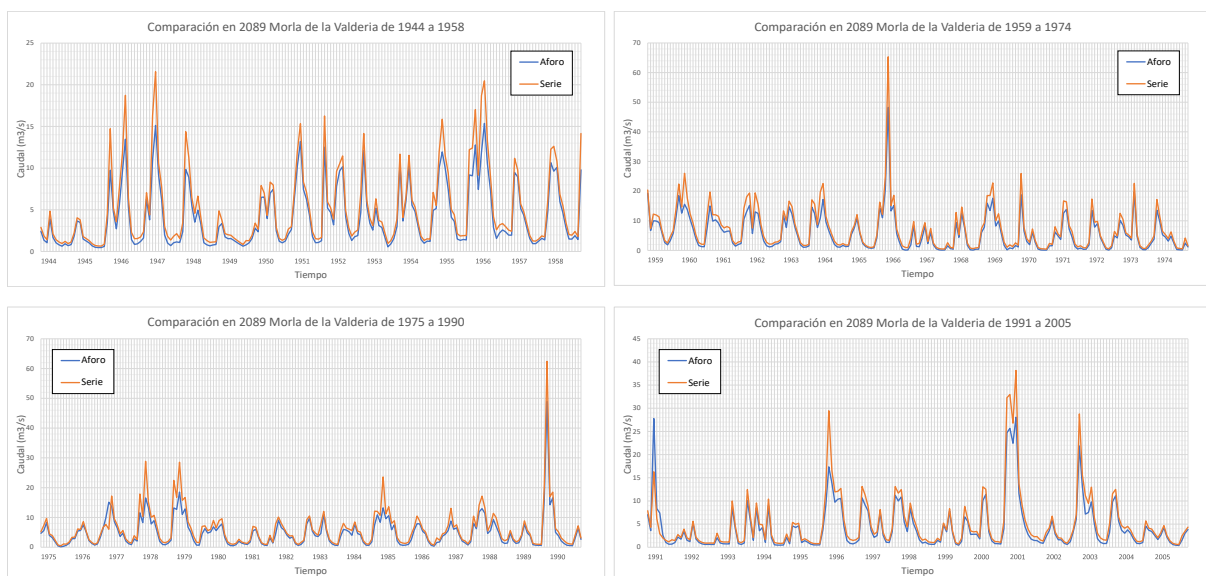


Figura 4. Gráfico de secuencia temporal en la estación de Morla de Valdería

En estos gráficos se aprecia un gran parecido entre las series, donde vemos que la curva de la serie simulada siempre está por encima de la serie aforada. Esto indica que los caudales simulados son mayores a los registrados en las estaciones de aforo.

3.1.2 Gráfico de dispersión

En los gráficos de dispersión se muestra la nube de puntos en el que se comparan los valores de caudales simulados mediante el modelo SIMPA con los valores registrados por la estación de aforo. Se han elaborado gráficos a escala anual y mensual.

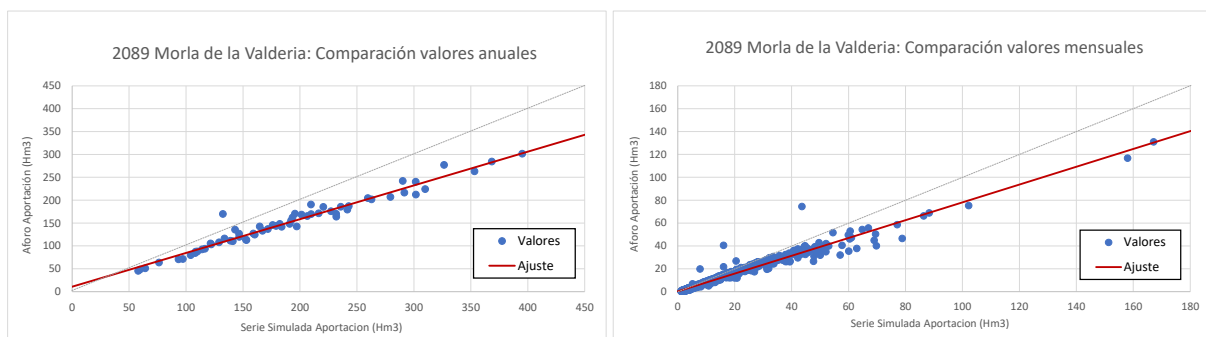


Figura 5. Gráficos de comparación de valores anuales (izquierda) y mensuales (derecha) en la estación de aforo Morla de la Valdería mediante el modelo SIMPA

La nube de puntos se ha ajustado mediante un modelo de regresión lineal, en donde se ve que se consigue un mejor ajuste para los valores mensuales por presentar una pendiente más próxima a la unidad y porque los puntos se acercan más a la diagonal principal, indicando que los caudales de las series son muy parecidos.

3.1.3 Gráficos de error relativo

En los gráficos de error relativo se representa el valor de las desviaciones entre los valores de las aportaciones simuladas mediante el modelo SIMPA, s_i , y los valores registrados por la estación de aforo, a_i . Se han analizado las series a escala anual y mensual. Las desviaciones en cada periodo, e_i , se miden en porcentaje del error con relación al valor medido:

$$e_i = \frac{s_i - a_i}{a_i} \times 100 \%$$

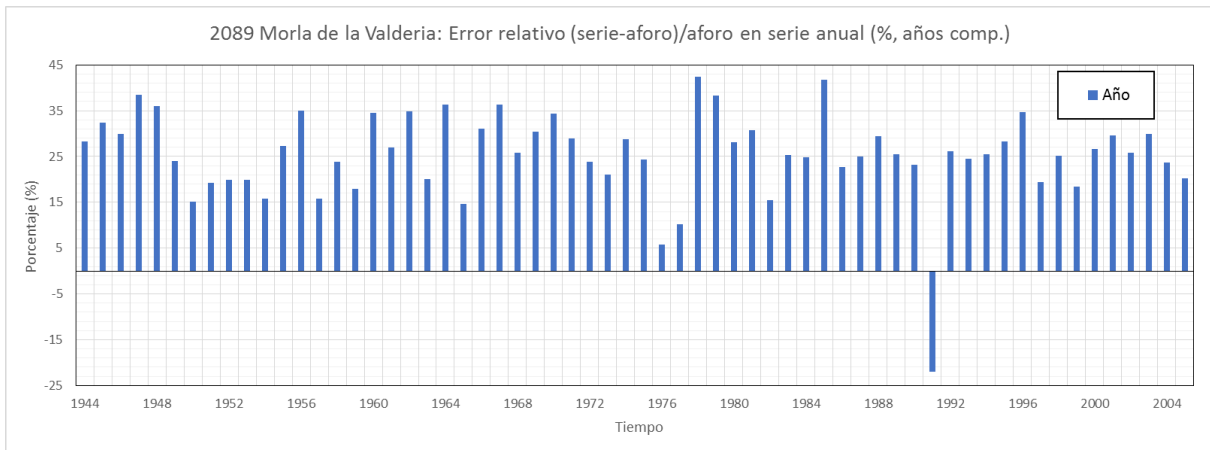


Figura 6. Gráfico de error relativo de valores anuales en la estación de aforo Morla de la Valdería

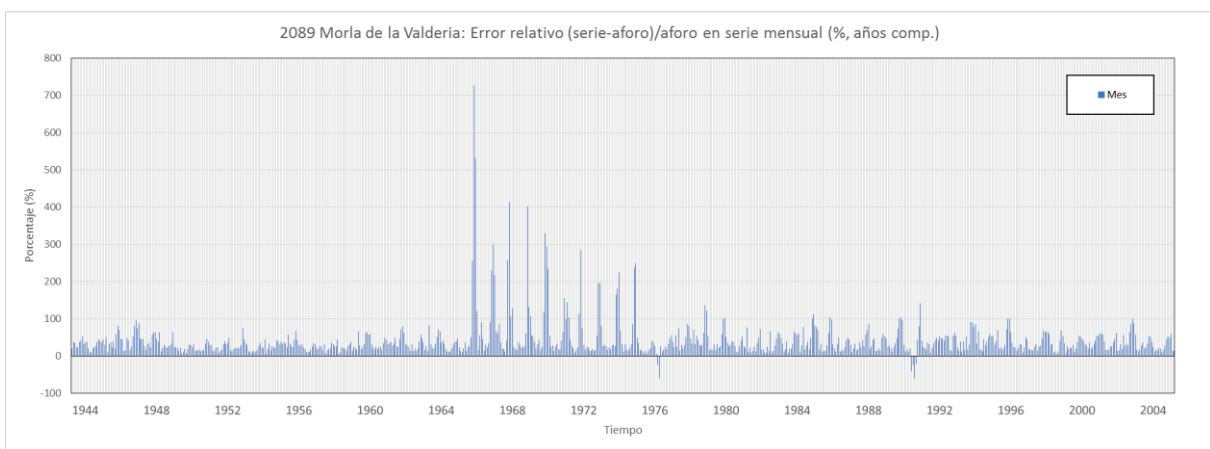


Figura 7. Gráfico de error relativo de valores mensuales en la estación de aforo Morla de la Valdería

Se aprecia que en la totalidad de la serie a escala anual se tienen errores relativos cercanos al 25%. Mientras que para casi toda la serie a escala mensual se obtienen errores relativos menores al 100% a excepción del periodo de 1966 a 1975 donde los errores relativos crecen llegando incluso por encima del 700%.

3.1.4 Gráficos de desviaciones acumuladas

En el gráfico de desviaciones acumuladas se comparan las curvas correspondientes a las aportaciones mensuales mediante el modelo SIMPA y a los valores registrados por la estación de aforo. El gráfico de desviaciones acumuladas se construye con relación al caudal medio de la serie, S . El periodo simulado (1944-2005) se ha dividido en cuatro partes, representando una en cada gráfico individual.

$$ds_i = \sum_{j=1}^{j=i} (s_j - S) \quad ; \quad da_i = \sum_{j=1}^{j=i} (as_j - S)$$

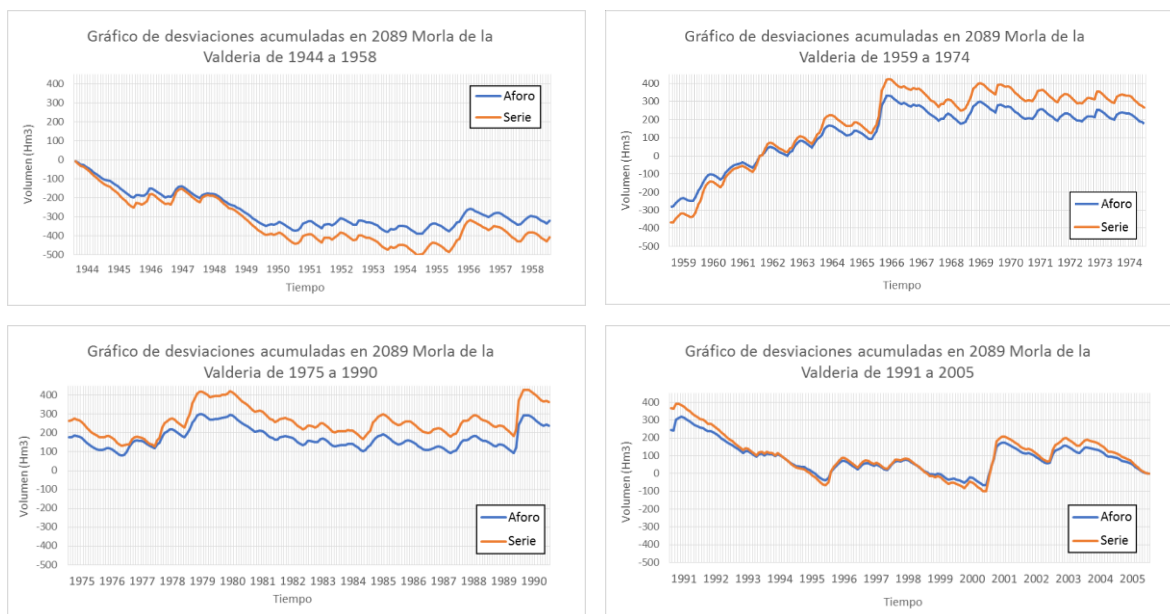


Figura 8. Gráficos de desviaciones acumuladas en la estación de aforo Morla de la Valderia

De estos gráficos se deduce que la modelización es buena ya que se consigue un paralelismo entre las curvas y en muchos periodos las mismas están muy próximas.

3.2 Comparación de modelos hidrológicos con aforos

A continuación, se presentan las tablas que resumen los resultados obtenidos en la comparación. En primer lugar, se presentan las tablas que contienen los resultados del ajuste de la regresión entre los valores de las series simuladas por el modelo SIMPA y los registros observados en las estaciones de aforo tanto a escala anual como mensual.

Tabla 4. Resultados del ajuste a escala anual

Código	Denominación	Correlación R^2	Pendiente m	Ordenada q_0 (m ³ /s)
48	EA 2060 Cebrones del Río	0.82	0.84	-269.64
64	EA 2076 Las Omañas	0.75	0.80	58.91
64	EA 2083 La Garandilla	0.87	0.72	17.89
172	EA 2089 Morla de la Valderia	0.96	0.74	10.73

Tabla 5. Resultados del ajuste a escala mensual

Código	Denominación	Correlación R ²	Pendiente m	Ordenada q _o (m ³ /s)
48	EA 2060 Cebrones del Río	0.83	0.75	-12.71
64	EA 2076 Las Omañas	0.85	0.92	1.41
64	EA 2083 La Garandilla	0.92	0.77	0.06
172	EA 2089 Morla de la Valderia	0.96	0.78	0.27

Para la escala anual los mejores ajustes se consiguen en las estaciones EA 2089 y EA 2083 en donde se obtienen valores de R² de 0.96 y 0.87 respectivamente, además de ordenadas al origen cercanas a cero.

Por otra parte, para la escala mensual las estaciones EA 2076 y EA 2089 son las que presentan mejores ajustes. La dispersión entre los valores de la estación de aforo EA 2060 Cebrones del Río y la masa de agua 48 Río Órbigo es la que obtiene peores resultados ya que las líneas de tendencia muestran unas ordenadas al origen, para la escala anual y mensual, muy alejadas a cero.

Se presentan también las tablas con los valores medios de los errores relativos, con su signo y en valor absoluto. En las tablas de errores con su signo se ha considerado la posible compensación de errores positivos o negativos al realizar la media. En el caso de los errores en valor absoluto, la media se ha realizado sobre los valores absolutos de los errores.

Tabla 6. Valores medios de los errores relativos (con su signo)

Código	Denominación	Anual (%)	Mensual (%)
48	EA 2060 Cebrones del Río	68.29	96.48
64	EA 2076 Las Omañas	4.04	31.21
64	EA 2083 La Garandilla	31.04	38.43
172	EA 2089 Morla de la Valderia	25.42	41.87

Tabla 7. Valores medios de los errores relativos (valor absoluto)

Código	Denominación	Anual (%)	Mensual (%)
48	EA 2060 Cebrones del Río	68.29	97.45
64	EA 2076 Las Omañas	7.41	35.86
64	EA 2083 La Garandilla	31.68	46.97
172	EA 2089 Morla de la Valderia	26.13	42.50

Los valores medios de los errores relativos más altos se presentan en la serie de la masa de agua 48 Río Órbigo lo que indica un mal ajuste del modelo respecto a la serie observada en la estación de aforo EA 2060 en Cebrones del Río.

4. MÉTODOS DE CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS

4.1 Tipos de métodos de caudales ecológicos

Para el cálculo de los caudales ecológicos existen una multitud de metodologías. Los pioneros en la aplicación de métodos científicos para la determinación de los regímenes de caudales ecológicos fueron los americanos utilizando los primeros métodos en la década de los 60 en la zona noroeste de EEUU con el objetivo de estimar unos caudales mínimos en los ríos regulados que asegurasen la pesca de salmónidos de gran interés económico. Desde la aparición de estos primeros métodos se han desarrollado un sinnúmero de métodos para la determinación de los caudales ecológicos. A grandes rasgos, puede considerarse que, básicamente existen cuatro enfoques, a partir de los cuales se perfilan todas las metodologías existentes de cálculo de caudales de mantenimiento (Palau et al., 2002). A continuación se presentan dichos enfoques y ejemplos de sus métodos más conocidos y empleados.

4.1.1 Enfoque hidrológico

Se fundamentan en un tratamiento estadístico de las series hidrológicas restituidas a régimen natural mediante técnicas que deducen un caudal mínimo expresado como porcentaje de un estadístico de tendencia central, como caudales clasificados, como tanto por ciento del caudal medio, como percentil de la curva de duración de caudales, etc. Para su aplicación requieren de unos conocimientos técnicos y datos de campo (generalmente se utilizan con series diarias y mensuales) relativamente limitados que proporcionan de manera rápida y barata resultados fáciles de interpretar lo que hace que estos métodos se caractericen como los más versátiles y sean aplicables a la planificación hidrológica.

Uno de los métodos más destacados del enfoque hidrológico es el método de *Northern Great Plains Resource Program* (NGPRP, 1974), en este se calcula el caudal mínimo de cada mes como el percentil 90 de la curva de caudales medios diarios, descartando los caudales extremos correspondientes a periodos secos y húmedos. Uno de los métodos más antiguos es el 7Q2 (Stalnaker y Arnette, 1976), usado sobre todo en los estados del sur de Estados Unidos. Se calcula el caudal ecológico como el caudal mínimo medio de siete días consecutivos, para un periodo de retorno de dos años. De este surgieron variaciones que derivaron a nuevos

métodos como por ejemplo el 7Q10 (Caissie y El-Jabi, 1995) con duraciones y periodos diferentes.

El método más aplicado en los proyectos hidroeléctricos de Estados Unidos es el NEFM (New England Flow Method; USFWS, 1980) conocido también como el *Aquatic Base Flow*. Este calcula el caudal ecológico como la media aritmética de los valores de la mediana calculada para los caudales medios diarios de los meses de agosto, para todos los años disponibles.

La evolución de los métodos hidrológicos generó que en la década de los 90 se desarrollasen unos métodos de carácter más complejo como los métodos hidrológicos secuenciales o pulsátiles debido a que se basan en el estudio de los pulsos en las series continuas de caudales diarios. De ellos destaca el método QBM (Caudal Básico de Mantenimiento; Palau 1994; Palau & Alcazar, 1996) en el cual a partir de series de caudales medios diarios y mediante la aplicación de medias móviles sobre intervalos crecientes de datos, se obtiene una distribución de caudales mínimos acumulados, sobre la que se obtiene el Caudal Básico como el correspondiente al incremento relativo mayor. El método RVA (Range of Variability Approach; Ritcher et al., 1997) es otro de estos métodos en el cual, a partir de series de caudales medios diarios, se calculan una serie de indicadores de alteración hidrológica predefinidos (magnitud, momento temporal, frecuencia, duración y ratio de cambio) y para cada uno se decide cual será el objetivo en condiciones de regulación.

4.1.2 Enfoque hidráulico

El caudal ecológico se deduce de la relación entre algún parámetro hidráulico (normalmente el perímetro mojado o la profundidad) y el caudal circulante en secciones transversales identificadas como críticas. Estos métodos sólo se admiten en aplicaciones locales.

El Método del Perímetro Mojado (Nelson, 1980) es uno de los métodos hidráulicos más conocidos y posiblemente el tercero más empleado en Estados Unidos (Reiser et al., 1989), que desarrolla la variación entre el perímetro mojado y el caudal en las secciones de rápidos, presuponiendo que la integridad de un hábitat fluvial está determinada por el área mojada del biotopo. En el punto de inflexión de la

curva es donde se encuentra el caudal mínimo y a partir de ese punto, el incremento relativo del perímetro (hábitat) con el caudal es progresivamente menor. Una vez fijado este caudal mínimo para los rápidos, se asume que las condiciones del hábitat en otros lugares son igualmente aceptables (Díez-Hernández, 2005).

El método de Montana (Tennant, 1976) es una de las técnicas de mayor aplicación en el ámbito mundial. Se referencia su empleo en al menos 25 países, siendo de los más utilizados en Estados Unidos (Reiser et al., 1989) y Canadá (Bietz et al., 1985), mientras que en Europa ha servido de referencia para buena parte de los criterios administrativos de definición de caudales ecológicos. El método se fundamenta en la relación observada entre el caudal y la calidad del hábitat para la trucha, evaluada integrando las idoneidades individuales de la profundidad, la velocidad y la anchura de la lámina de agua. Se obtienen los caudales recomendados para dos periodos del año (octubre-marzo y abril-septiembre) en donde en cada uno se especifican unos porcentajes del caudal medio interanual necesarios para lograr una calidad del hábitat fluvial. Por esta última cualidad, se le suele clasificar como un método hidrológico dado que su aplicación consiste en el cálculo de porcentajes fijos del módulo anual, pero como se ha visto antes, en realidad es un método hidráulico pues se basa en la relación entre el caudal y descriptores hidráulicos.

4.1.3 Enfoque hidrobiológico o simulación de hábitat

Se basan en relaciones entre el hábitat físico de una especie de referencia (generalmente poblaciones piscícolas) y los diferentes regímenes de caudales, es decir, a partir de todos los factores hidrológicos, morfológicos, biológicos, etc. que condicionan el hábitat de las especies. Por su naturaleza, estos métodos requieren un amplio conocimiento de la especie de referencia como sus preferencias, ciclos biológicos, etc.

La metodología incremental de flujo o IFIM (Instream Flow Incremental Methodology; Bovee, 1982) es una técnica que sirve como herramienta para evaluar los efectos que provocan los cambios incrementales de caudal en la disponibilidad de hábitat físico utilizable con ayuda de datos hidráulicos, hidrológicos y biológicos. En este método hidrobiológico se suele seleccionar la especie de pez más exigente como bioindicador de referencia en donde se busca caracterizar su hábitat potencial

disponible a partir de la abundancia-densidad de individuos en términos de condiciones físicas de hábitat como el calado, velocidad media, sustrato. Este hábitat potencial disponible se representa en las llamadas curvas de preferencia las cuales reproducen el grado de adecuación de un organismo respecto a las variables que determinan su hábitat físico, evaluado mediante un coeficiente que varía de cero a uno (Díez-Hernández, 2005).

4.1.4 Enfoque holístico

Es un procedimiento o protocolo basado en la investigación de múltiples estudios y aspectos relacionados con los caudales ecológicos buscando una solución consensuada por un panel de expertos. Los estudios que se realizan son análisis independientes de la magnitud y distribución de caudal que necesitan los componentes del ecosistema fluvial objetivo, sean aspectos abióticos (geomorfología, calidad del agua, etc.), ecológicos (comunidades naturales), perceptuales (paisaje), socioeconómicos o todos en conjunto. Como planteamiento metodológico es ciertamente impecable, pero en la práctica su aplicación puede ser compleja en función de la heterogeneidad de los resultados parciales obtenidos para cada componente considerado (Palau et al., 2002). Por su naturaleza es una metodología de aplicación local que hace difícil su uso a escala de planificación.

El método BBM (Building Block Methodology; King et al., 2000) es el más conocido de los propios con un enfoque holístico. Este consiste en un protocolo sistemático en el cual un panel de expertos utiliza los datos hidrológicos de caudales donde se incluye varios índices hidrológicos, datos hidráulicos en la sección transversal de los ríos e información sobre las necesidades de los diferentes componentes del ecosistema relacionados con el caudal para determinar un régimen de caudales ecológicos. Seguido se construye un régimen hidrológico modificado o regulado que permita preservar los componentes bióticos, abióticos, culturales, económicos o sociales, previamente identificados como objetivos de conservación.

Los métodos de cálculo de los caudales ecológicos empleados en este estudio corresponden a un enfoque hidrológico. A continuación se detalla tanto su definición como su método de cálculo.

4.2 Variables de centralización móviles

Se han aplicado dos métodos de variables de centralización móviles para determinar el régimen medioambiental de caudales mínimos. Los métodos son los siguientes:

- Caudal básico de mantenimiento (QBM)
- Media móvil de orden 25 (MM25)

A continuación, se describe el procedimiento de cálculo en cada uno de ellos.

4.2.1 Caudal Básico de Mantenimiento (QBM)

En el método conocido como Método del Caudal Básico o QBM (Palau, 1998), el caudal mínimo ecológico corresponde con el caudal en el que los incrementos relativos de los valores mínimos de dos intervalos consecutivos de medias móviles, es máximo (DHCMA, 2015).

Este método, también conocido como método de Palau, se basa en el estudio de las series temporales de caudales medios diarios, mediante la utilización de medias móviles de diferente amplitud (1 día a 3 meses) a lo largo de las series. Se trata de un método hidrológico que se ha desarrollado a partir de la idea de que el caudal que circula por un tramo de río (series hidrológicas) es la variable primaria que contiene toda la información necesaria para la organización física y biológica del ecosistema fluvial (...) el caudal básico corresponde al caudal mínimo necesario para que se conserve la estructura y función del ecosistema acuático afectado (...) es el caudal mínimo que debe circular en todo momento por el río, aunque no siempre el recomendado por la metodología (CHDUERO, 2015). El caudal básico es el parámetro fundamental del método, el cual es una regularidad hidrológica situada entre el caudal mínimo absoluto y el caudal medio, estando tanto más cerca del caudal medio cuanto más breves sean los períodos de sequía.

El método considera que puede aplicarse conociendo los últimos 10 años de caudales consecutivos. Se calcula el caudal básico independientemente para cada año de la serie, aplicando el siguiente procedimiento:

Se parte de la serie de caudales diarios de cada año, Q_i . En primer lugar, se calculan las medias móviles Mk_j de los caudales diarios considerando intervalos de k datos consecutivos, con valores de k crecientes entre 1 y 100.

$$Mk_j = \frac{\sum_{i=j}^{i=j+k-1} Q_i}{k}$$

El límite de 100 se utiliza para garantizar que se incluirá el periodo de estiaje completo.

A partir de la matriz de caudales naturales medios diarios Q_i se evalúan las medias móviles de orden $k=1 \dots 100$, por lo que ahora es posible formar una matriz A de dimensión 365×100 .

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{365} \end{bmatrix} \rightarrow A = \begin{bmatrix} Q_1 & : & - & : & - & : & : & - \\ Q_2 & : & \frac{Q_1 + Q_2}{2} & : & - & : & : & - \\ : & : & \frac{Q_2 + Q_3}{2} & : & \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} & : & : & - \\ : & : & : & : & : & : & : & \frac{Q_{265} + \dots + Q_{364}}{100} \\ Q_{365} & : & \frac{Q_{364} + Q_{365}}{2} & : & \frac{Q_{363} + Q_{364} + Q_{365}}{3} & : & : & \frac{Q_{266} + \dots + Q_{365}}{100} \end{bmatrix}$$

Con estas medias se consigue el vector V cuyas componentes se obtienen como el valor mínimo para cada columna j de la matriz A . Es decir, un vector que contiene los valores mínimos M_k de la media móvil para cada duración k .

$$V = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ \dots \ m_k \ \dots \ m_{100}] \quad \text{donde} \quad m_k = \min(Mk_j)_{j=1 \text{ a } 100}$$

Paso seguido, se obtiene el vector gradiente cuyas componentes son los incrementos relativos de cada par de valores, es decir:

$$IR = [i_1 \ i_2 \ i_3 \ \dots \ i_k \ \dots \ i_{99}] \quad \text{donde} \quad i_k = \frac{m_{k+1} - m_k}{m_k} \quad k = 1, \dots, 99$$

El caudal básico q_{bas} de cada año corresponde a aquella componente del vector V , o de mínimos, en la cual se produce el mayor incremento relativo.

$$q_{bas} = m_p \quad \text{si} \quad IR_p = \max(IR_k)_{k=1 \text{ a } 99}$$

El caudal básico final Q_{bas} se obtiene como la media aritmética de los caudales básicos anuales q_{bas} para la serie considerada.

$$Q_{bas} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{bas,i}}{n}$$

4.2.2 Media Móvil de orden 25

La metodología de medias móviles se ha utilizado ampliamente en hidrología, para caracterizar series de caudales (Gustard et al., 1992).

La media móvil de orden 25 (Jalón, 1999) es un método estadístico desarrollado en la Escuela de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid bajo la dirección de Diego García Jalón y que representa como caudal ecológico el definido por la media de los caudales medios mínimos correspondientes a 25 días consecutivos, calculada sobre la serie hidrológica seleccionada.

Se parte de la serie de caudales diarios de cada año, Q_i . En primer lugar, se calculan las medias móviles M_i de los caudales diarios considerando intervalos de 25 días consecutivos.

$$M_i = \frac{\sum_{k=i}^{k=i+24} Q_k}{25}$$

Con estas medias se obtiene un vector V , que contiene los valores mínimos m_j de la media móvil para cada uno de los n años analizados.

$$V = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ \dots \ m_j \ \dots \ m_n] \quad \text{donde} \quad m_j = \min(M_i)_{i=1 \text{ a } 365}$$

El caudal ecológico de cada año es el valor correspondiente del vector de mínimos.

$$Q_{25_j} = m_j$$

El caudal ecológico final se obtiene como la media aritmética de los caudales ecológicos anuales calculados para cada año de estudio.

$$Q_{25} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{25,i}}{n}$$

4.3 Percentiles de la curva de caudales clasificados

En este grupo de métodos se considera que el caudal ecológico es el superado por un determinado porcentaje de los valores en la serie disponible. Estos métodos hidrológicos permiten definir el umbral habitual del caudal mínimo a establecer para la determinación de un régimen ambiental de caudales, tomando una serie de al menos 20 años. El método se ha aplicado con dos criterios distintos:

- Clasificación mensual
- Clasificación en dos periodos: seco y húmedo

A continuación, se describe el procedimiento de cálculo en cada uno de ellos.

4.3.1 Clasificación mensual

En este método con aplicación a escala mensual se ha obtenido la distribución de caudales correspondiente a cada mes a lo largo de toda la serie disponible. Se selecciona como caudal ecológico aquel que resulta superado por un determinado porcentaje de los valores medios diarios. Tal y como lo establece la Instrucción de Planificación, se han considerado los valores que resultan superados por el 95%, 90% y 85% de los datos de la serie para ese mismo mes. Los caudales ecológicos según este método son los valores marcados de los percentiles.

4.3.2 Clasificación en dos periodos

En la clasificación en dos periodos se ha distinguido entre el periodo seco, compuesto por los meses de estiaje (julio, agosto y septiembre) y el periodo húmedo, compuestos por el resto de los meses. Al igual que en el caso mensual, se ha seleccionado como caudal ecológico el que resulta superado por un determinado porcentaje de los valores de la serie en ese periodo. Se han considerado los valores que resultan superados por el 95%, 90% y 85% de los datos de la serie para ese mismo mes.

5. LONGITUD DEL PERIODO ANALIZADO

La longitud del periodo a analizar es una cuestión de carácter metodológico de gran importancia en este trabajo ya que se busca proponer una metodología adecuada para la determinación de los caudales ecológicos. Por ello, en el cálculo de caudales mínimos en la zona de estudio se ha realizado un análisis de los valores obtenidos de estos caudales ecológicos en función de la longitud del periodo seleccionado. Es decir, se obtuvieron los caudales ecológicos por todos los métodos utilizados en el estudio (QBM, QMM25, Q85M, Q90M, Q95M, Q85P, Q90P y Q95P) para diferentes longitudes de la serie.

Es relevante señalar que la Instrucción de Planificación Hidrológica propone emplear una serie de longitud mínima de 20 años, preferentemente consecutivos, que presente una alternancia equilibrada entre años secos y húmedos. En este análisis se obtuvieron los valores de los caudales ecológicos para diferentes longitudes de serie partiendo de los últimos 5 años y añadiendo un año más a cada periodo. En otras palabras, el primer periodo analizado es para los últimos 5 años, el siguiente para los últimos 6 años y así sucesivamente hasta completar la totalidad de la serie disponible.

Lo que se pretende es analizar los valores y su evolución temporal, viendo si se tiende a converger a un cierto valor y así conocer la duración mínima para la cual se obtendrían buenos resultados.

5.1 Caudales ecológicos por el método de percentiles

5.1.1 Clasificación mensual

Se ha efectuado un análisis de los valores de los caudales ecológicos de las cuatro estaciones de aforo estudiadas por el método de percentiles de clasificación mensual en función de la longitud del periodo seleccionado. Se ha realizado este estudio por medio de unas gráficas que contienen los valores de Q85M, Q90M y Q95M respecto a la longitud de la serie. Para ilustrar la metodología empleada se muestran algunos de estos gráficos para diferentes percentiles (85, 90 y 95) y diferentes meses. En el Anexo 5 se presentan con detalle la totalidad de los gráficos obtenidos para todos los meses y percentiles estudiados.

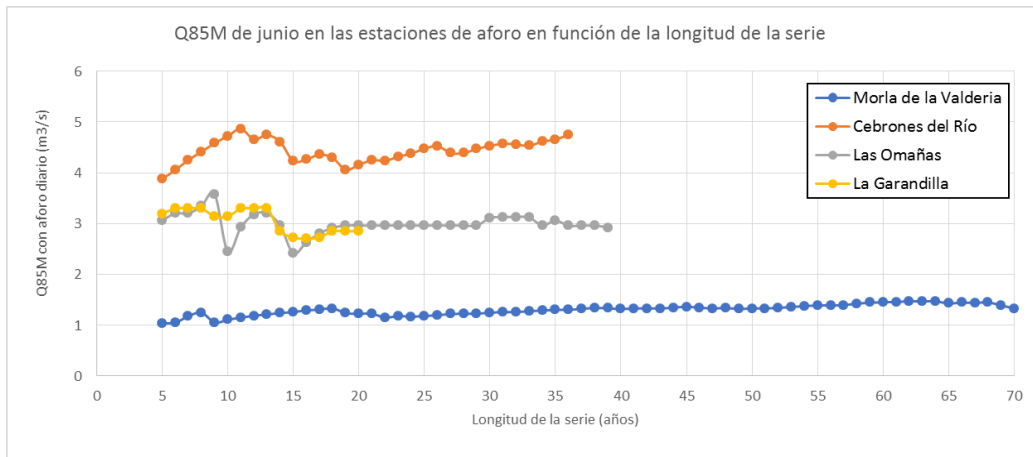


Figura 9. Evolución del caudal ecológico por el método del percentil 85 % en función de la longitud de la serie analizada para el mes de junio

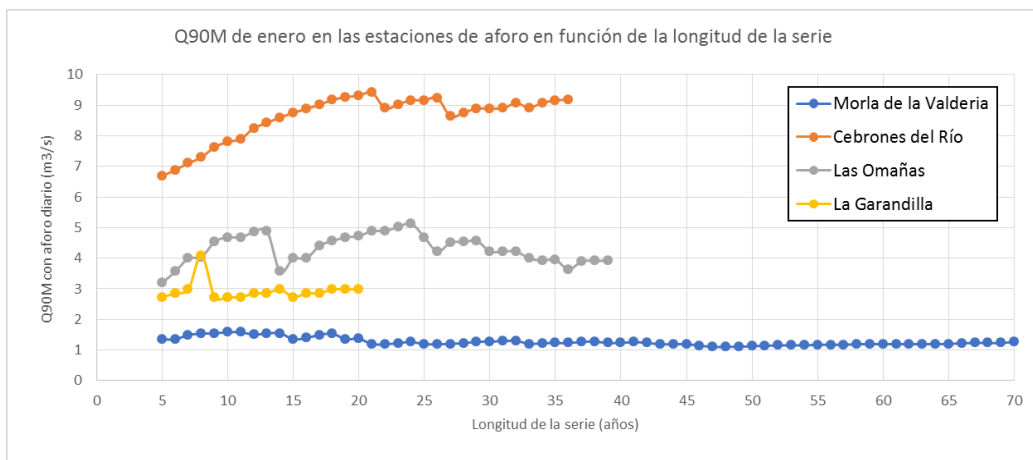


Figura 10. Evolución del caudal ecológico por el método del percentil 90 % en función de la longitud de la serie analizada para el mes de enero

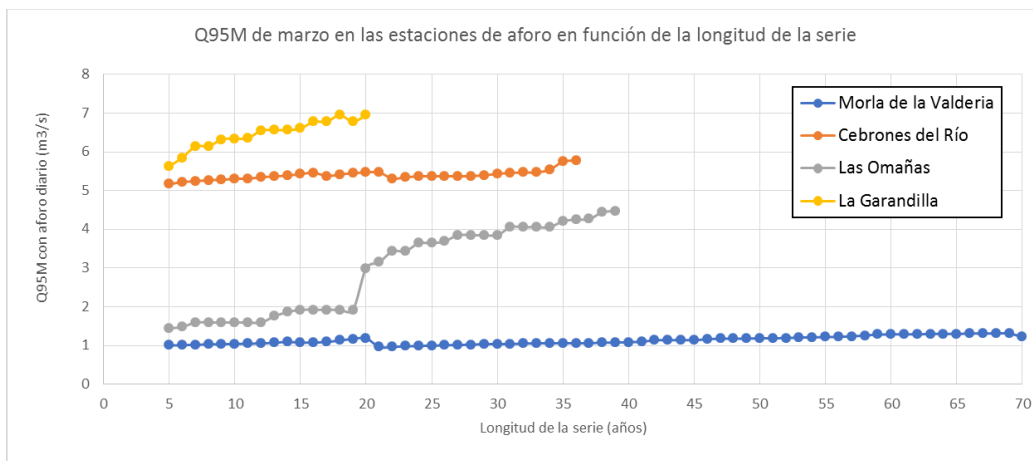


Figura 11. Evolución del caudal ecológico por el método del percentil 95 % en función de la longitud de la serie analizada para el mes de marzo

En los gráficos se puede apreciar que el comportamiento de los valores de caudales ecológicos se tiende a estabilizar en el tiempo según crece la longitud de la serie. Lo anterior, se puede afirmar ya que para las cuatro estaciones estudiadas las

gráficas comienzan formando más curvas y oscilaciones en las duraciones de pocos años y conforme crece la longitud de la serie se empieza a asemejar a una línea horizontal recta.

Además, se ve que la serie de la estación de aforo EA2083 La Garandilla parece no llegar a estabilizarse por los pocos años (20) y no será útil para la determinación de la longitud mínima para la cual se obtengan buenos resultados. Como se ha mencionado previamente, para determinar una longitud mínima del periodo a analizar y con ello obtener buenos resultados de los caudales ecológicos se debe tomar una longitud superior a 20 años ya que a partir de estos años las gráficas de las estaciones EA 2089 Morla de la Valdería, EA 2060 Cebrones del Río y EA 2076 Las Omañas tienden a estabilizarse.

Si bien los gráficos anteriores ilustran muy bien la distribución y los valores de los caudales ecológicos en función a la longitud de la serie, no son muy útiles para analizar de forma conjunta el comportamiento de las cuatro estaciones de aforo.

Debido a lo anterior se han construido otros gráficos que ilustran los valores correspondientes a los caudales ecológicos para cada longitud de años (Q_n) sobre el caudal ecológico de la totalidad de la serie disponible (Q_{lim}). Es decir, se obtiene un valor que refleje una cierta proporcionalidad respecto al caudal ecológico que se consigue con la totalidad de la serie y de esta forma se puede observar en un mismo gráfico el comportamiento de las cuatro estaciones de aforo. Por ejemplo, para el caudal ecológico por el método del percentil 85 % resulta un gráfico de ($Q_{85M}/Q_{85M_{lim}}$) respecto a la longitud de la serie.

A continuación, se ilustran los gráficos de este análisis para diferentes percentiles (85, 90 y 95) y diferentes meses. En el Anexo 6 se presentan con detalle la totalidad de los gráficos obtenidos para todos los meses y percentiles estudiados.

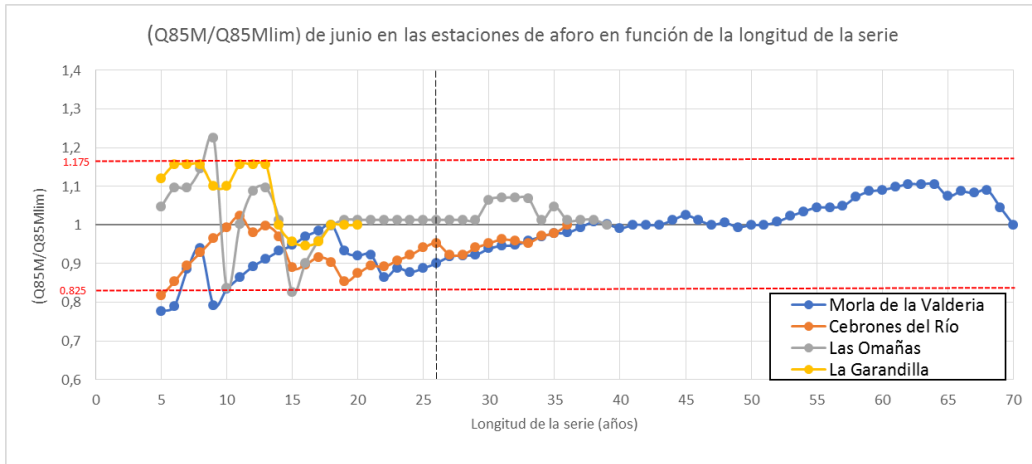


Figura 12. Evolución del valor de $(Q85M/Q85Mlim)$ en función de la longitud de la serie analizada para el mes de junio

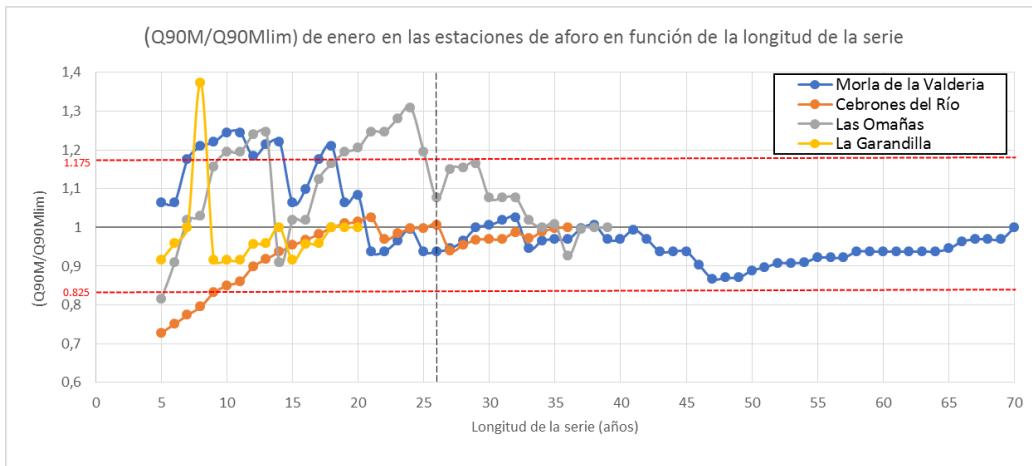


Figura 13. Evolución del valor de $(Q90M/Q90Mlim)$ en función de la longitud de la serie analizada para el mes de enero

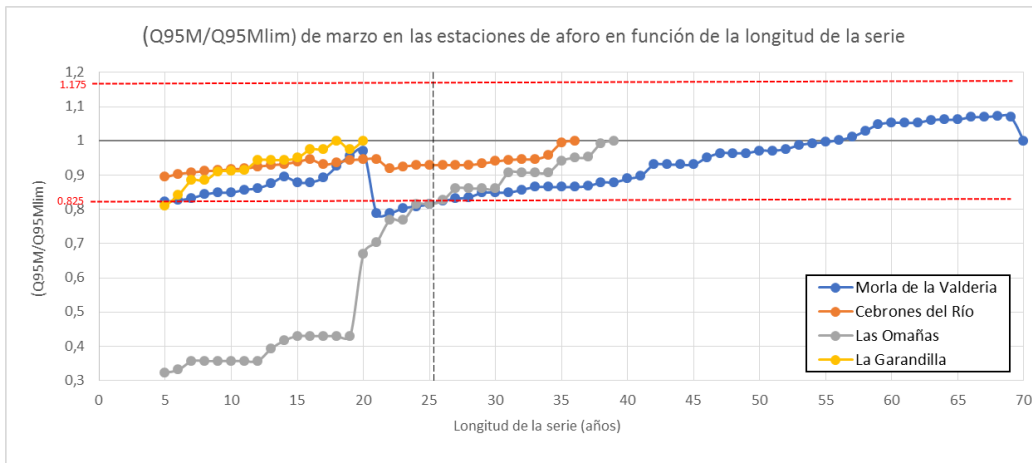


Figura 14. Evolución del valor de $(Q95M/Q95Mlim)$ en función de la longitud de la serie analizada para el mes de marzo

En los gráficos anteriores se puede confirmar que efectivamente para obtener valores adecuados de los caudales ecológicos por el método de los percentiles se

debe optar por duraciones de las series mayores a 20 años. Ahora bien, el objetivo es proponer una duración mínima para la determinación de los caudales ecológicos y que esta metodología sea adecuada para obtener buenos resultados en la zona de estudio.

Se puede observar que las curvas (QM/QM_{lim}) tienen un comportamiento que forma oscilaciones que se mueven cerca de la unidad. Al tener valores cercanos por encima y por debajo de la unidad, lo que indica que cada vez se acerca más al caudal ecológico que se obtiene con la totalidad de la serie, es conveniente elegir una duración mínima en la cual no se alejen mucho estos valores de la unidad. Se ha seleccionado como duración mínima de la serie un periodo de 26 años ya que es un valor en el cual se obtienen caudales ecológicos muy parecidos a los calculados con la totalidad de la serie. Asimismo, a partir de este periodo no se llegan a obtener valores muy lejanos a los caudales ecológicos obtenidos con la totalidad de la serie disponible.

Se ha tomado como criterio de selección un periodo que contenga como máximo un error del 35% respecto al valor del caudal ecológico obtenido con la totalidad de la serie disponible (QM_{lim}). Es decir, uno que asegure que los valores de (QM/QM_{lim}) no se encuentren fuera del rango de 0.825 y 1.175 de los gráficos anteriores.

5.1.2 Clasificación en dos periodos: seco y húmedo

Al igual que en la clasificación mensual se ha efectuado un análisis de los valores de los caudales ecológicos de las cuatro estaciones de aforo estudiadas en función de la duración de la serie seleccionada para los periodos seco y húmedo de acuerdo a la clasificación por periodos. Como se ha señalado anteriormente, en esta clasificación por periodos se distingue el periodo seco, compuesto por los meses de estiaje (julio, agosto y septiembre) y el periodo húmedo, compuesto por el resto de los meses.

Se ha realizado este estudio por medio de unas gráficas que contienen los valores de Q85P, Q90P y Q95P respecto a la longitud de la serie tanto para el periodo seco como para el húmedo. A continuación, se muestran las gráficas para los tres percentiles estudiados y los dos periodos.

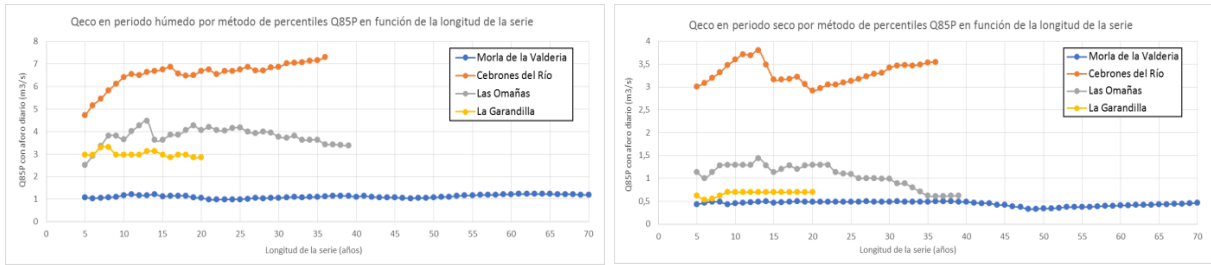


Figura 15. Evolución del caudal ecológico por el método del percentil 85 % en función de la longitud de la serie analizada para el periodo húmedo (izquierda) y el periodo seco (derecha)

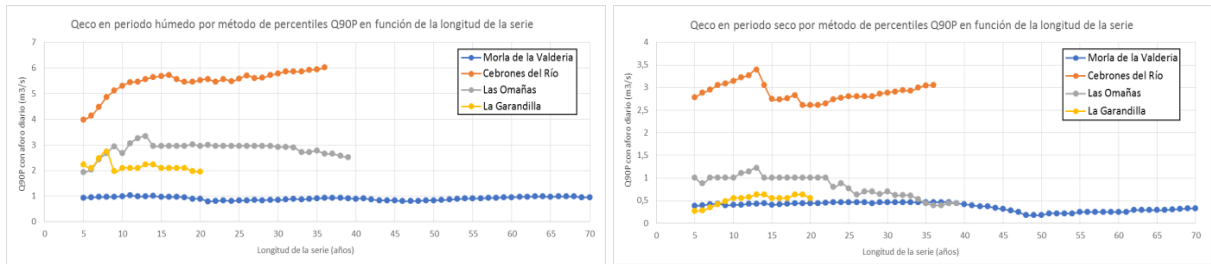


Figura 16. Evolución del caudal ecológico por el método del percentil 90 % en función de la longitud de la serie analizada para el periodo húmedo (izquierda) y el periodo seco (derecha)

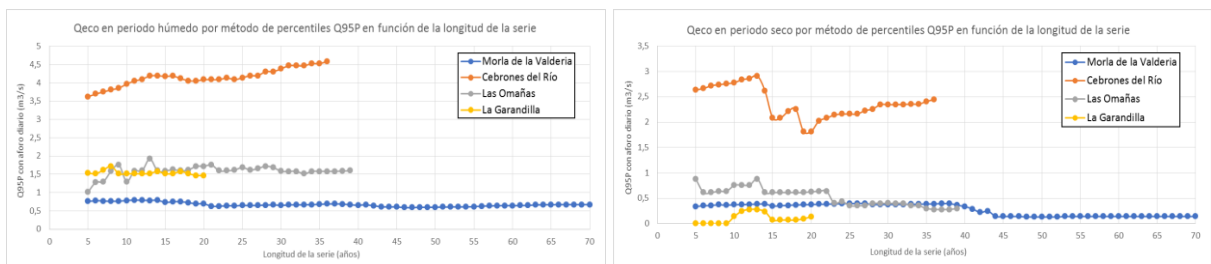


Figura 17. Evolución del caudal ecológico por el método del percentil 95 % en función de la longitud de la serie analizada para el periodo húmedo (izquierda) y el periodo seco (derecha)

En los gráficos se puede distinguir una mayor variación en los valores de los caudales ecológicos calculados para el periodo seco a diferencia del periodo húmedo que tienden a estabilizarse de mejor manera y no presentan tantas oscilaciones.

Tanto para el periodo húmedo como para el seco parece difícil establecer una duración mínima de la serie, con sólo estos gráficos, para la cual se obtengan valores adecuados de los caudales ecológicos. Por esta problemática, al igual que en los caudales ecológicos por clasificación mensual, es conveniente realizar el mismo análisis, pero en unos gráficos que contengan de forma conjunta el comportamiento de las cuatro estaciones. Se han construido las gráficas (QP/QP_{lim})-longitud de serie para los tres percentiles estudiados y los dos periodos.

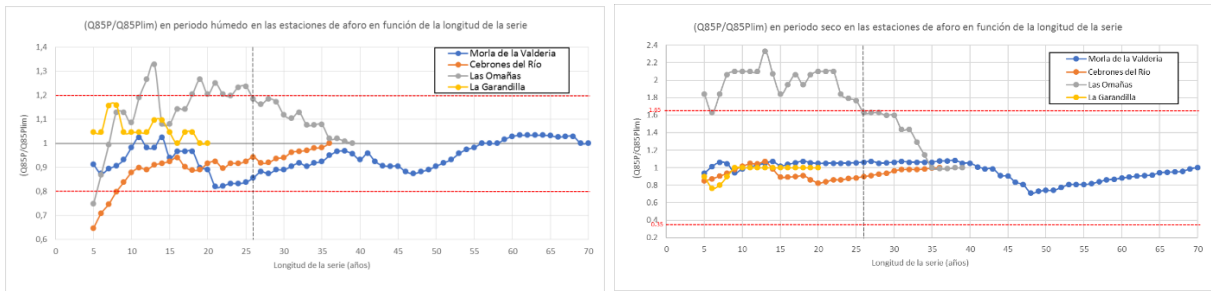


Figura 18. Evolución del valor de $(Q85P/Q85Plim)$ en función de la longitud de la serie analizada para el periodo húmedo (izquierda) y el periodo seco (derecha)

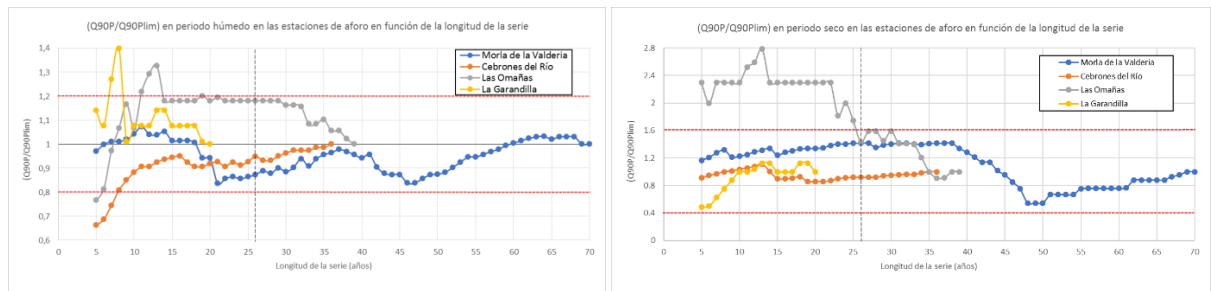


Figura 19. Evolución del valor de $(Q90P/Q90Plim)$ en función de la longitud de la serie analizada para el periodo húmedo (izquierda) y el periodo seco (derecha)

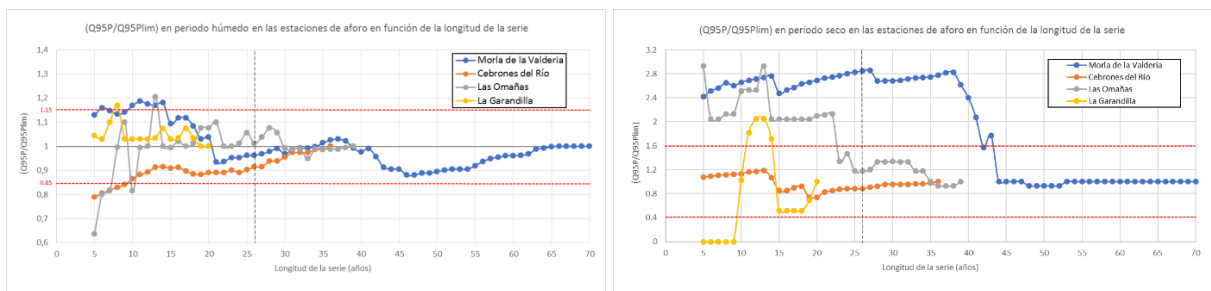


Figura 20. Evolución del valor de $(Q95P/Q95Plim)$ en función de la longitud de la serie analizada para el periodo húmedo (izquierda) y el periodo seco (derecha)

Se puede observar, que al igual que en las curvas de los caudales ecológicos por el método de los percentiles con clasificación mensual, las curvas (QP/QP_{lim}) tienen un comportamiento que forma oscilaciones que se mueven cerca de la unidad. Como se ha señalado anteriormente, los caudales ecológicos para el periodo húmedo tienden a estabilizarse de una mejor manera y esto nos hace seleccionar nuevamente como duración mínima de la serie un periodo de 26 años.

Se ha tomado como criterio de selección, para el periodo húmedo, una duración que contenga como máximo un error del 40%, 40% y 30% respecto al valor del caudal ecológico obtenido con la totalidad de la serie disponible (QP_{lim}) para los percentiles 85, 90 y 95 respectivamente. Es decir, uno que asegure que los valores

de $(Q_{85P}/Q_{85P_{lim}})$ y $(Q_{90P}/Q_{90P_{lim}})$ no se encuentren fuera del rango de 0.80 y 1.20, y del rango 0.85 y 1.15 para los valores de $(Q_{95P}/Q_{95P_{lim}})$.

El comportamiento de los percentiles para el periodo seco es muy inestable (sobre todo para las estaciones Las Omañas y Morla de la Valdería). Por esta variabilidad sufrida no es posible determinar una duración mínima de la serie para la cual se obtengan buenos resultados de los caudales ecológicos por el método de los percentiles para el periodo seco.

En los gráficos del periodo seco se ha mostrado que para elegir nuevamente como duración mínima de la serie un periodo de 26 años se debería optar como criterio de selección un periodo que contenga como máximo un error del 65% y 60% respecto al valor del caudal ecológico obtenido con la totalidad de la serie disponible (QP_{lim}) para los percentiles 85 y 90 respectivamente. Por otra parte, para el percentil 95 no sería suficiente con un error del 65% debido a que el caudal ecológico para la estación Morla de la Valdería no llega a estabilizarse hasta contar con longitudes de serie mayores a 43 años.

5.2 Caudales ecológicos por los métodos de variables de centralización móviles

5.2.1 Caudal básico de mantenimiento

Se ha efectuado un análisis de los valores de los caudales mínimos de las cuatro estaciones de aforo estudiadas por el método del caudal básico de mantenimiento en función de la longitud del periodo seleccionada. Al igual que en los caudales ecológicos por los métodos de percentiles, se obtuvieron los valores de los caudales para diferentes longitudes de serie partiendo de los últimos 5 años y añadiendo un año más a cada periodo.

A continuación, se muestra la gráfica que contiene la evolución temporal de los caudales ecológicos en función de la duración de la serie (comenzando por el año más reciente) para las cuatro estaciones de aforo.

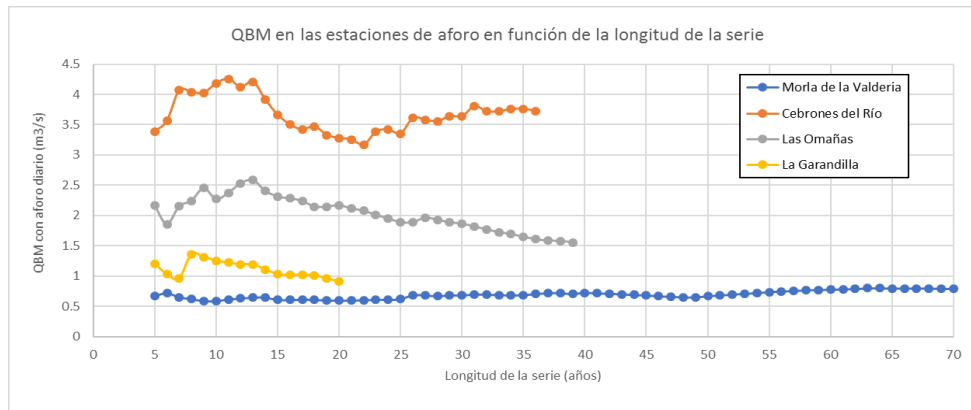


Figura 21. Evolución de los caudales ecológicos por el método del caudal básico de mantenimiento en función de la duración de la serie (comenzando por el final)

A partir del gráfico anterior se puede determinar que las series que obtienen unos caudales ecológicos más homogéneos son las correspondientes a las estaciones EA 2060 en Cebrones del Río y EA 2089 en Morla de la Valdería.

Por otro lado, la serie de Las Omañas muestra una notoria disminución de sus caudales ecológicos a partir de la longitud de 27 años y la serie de La Garandilla parece no llegar a estabilizarse por los pocos años que cuenta de registro.

En este punto conviene construir una gráfica que ilustre de forma conjunta el comportamiento de las cuatro estaciones de aforo. En este gráfico se muestran los valores correspondientes a los caudales ecológicos para cada longitud de años (Q_n) sobre el caudal ecológico que se obtiene de la totalidad de la serie disponible (Q_{lim}). Es decir, se representan los valores (QBM/QBM_{lim}) respecto a la longitud de la serie.

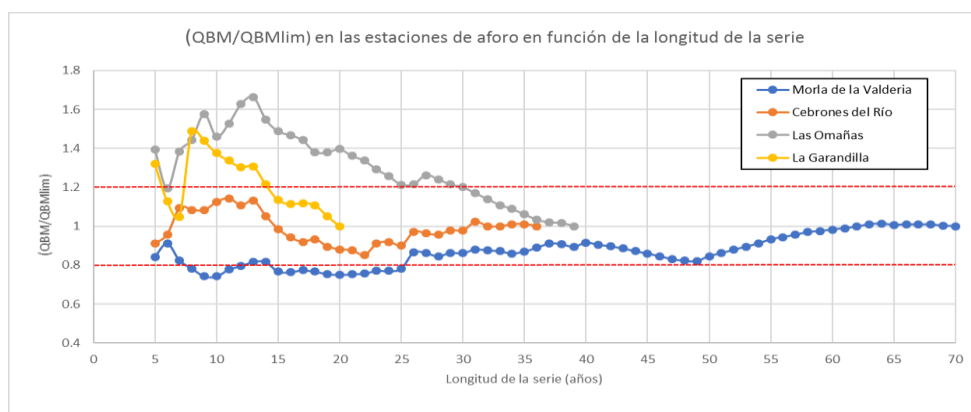


Figura 22. Evolución del valor de (QBM/QBM_{lim}) en función de la longitud de la serie

Las series que muestran una mayor estabilidad son aquellas pertenecientes a las estaciones EA 2060 en Cebrones del Río y EA 2089 en Morla de la Valdería ya que forman oscilaciones que se mueven cerca de la unidad.

Por otra parte, las otras dos series (de las estaciones Las Omañas y La Garandilla) presentan un claro descenso en los valores de los caudales ecológicos para las longitudes más largas, no mostrando una convergencia.

Se ha propuesto como longitud mínima de la serie un periodo de 30 años ya que a partir de esta duración se obtienen valores de los caudales ecológicos muy cercanos a los calculados con la totalidad de la serie.

Se ha tomado como criterio de selección un periodo que contenga como máximo un error del 40% respecto al valor del caudal ecológico obtenido con la totalidad de la serie disponible (QBM_{lim}). Es decir, uno que asegure que los valores (QBM/QBM_{lim}) no se encuentren fuera del rango de 0.80 y 1.20 en el gráfico anterior.

5.2.2 Media móvil de orden 25

Ahora llega el momento de realizar el mismo análisis que se ha venido haciendo, pero con el otro método de variable de centralización móvil: media móvil de orden 25. Se ha efectuado un análisis de los valores de los caudales mínimos de las cuatro estaciones de aforo estudiadas por el método de la media móvil de orden 25 en función de la longitud del periodo seleccionada.

A continuación, se muestra la gráfica que contiene la evolución temporal de los caudales ecológicos en función de la duración de la serie (comenzando por el año más reciente) para las cuatro estaciones de aforo.

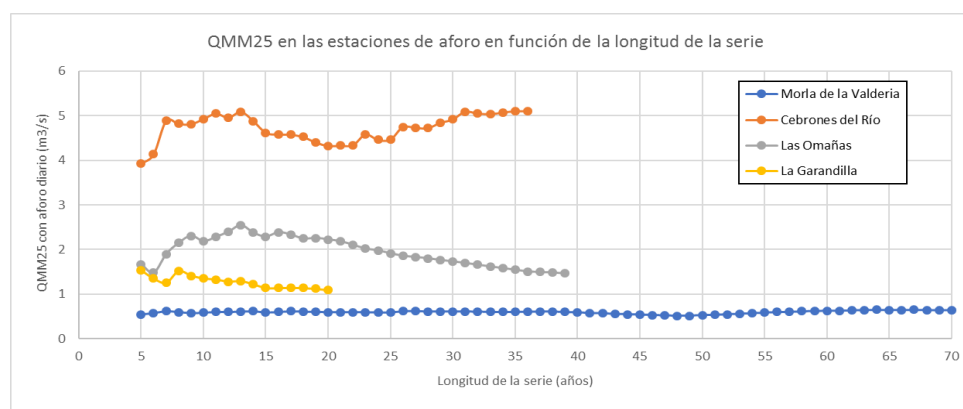


Figura 23. Evolución de los caudales ecológicos por el método de la media móvil de orden 25 en función de la duración de la serie (comenzando por el final)

Se percibe que tanto los valores como la distribución que toman los caudales ecológicos por el método de la media móvil de orden 25 son muy parecidos a los

calculados por el método del caudal básico de mantenimiento. La única diferencia que se puede apreciar es que los valores de los caudales ecológicos por el método de la media móvil de orden 25 son, aproximadamente una unidad, mayores a los obtenidos por el método del caudal básico de mantenimiento. Esta similitud advierte que posiblemente la longitud mínima de la serie, para obtener valores adecuados de los caudales ecológicos, sea igual a la propuesta para el método del caudal básico de mantenimiento. Para comprobarlo se sigue el mismo procedimiento, es decir, se procede a construir la gráfica que represente los valores $(QMM25/QMM25_{lim})$ respecto a la longitud de la serie.

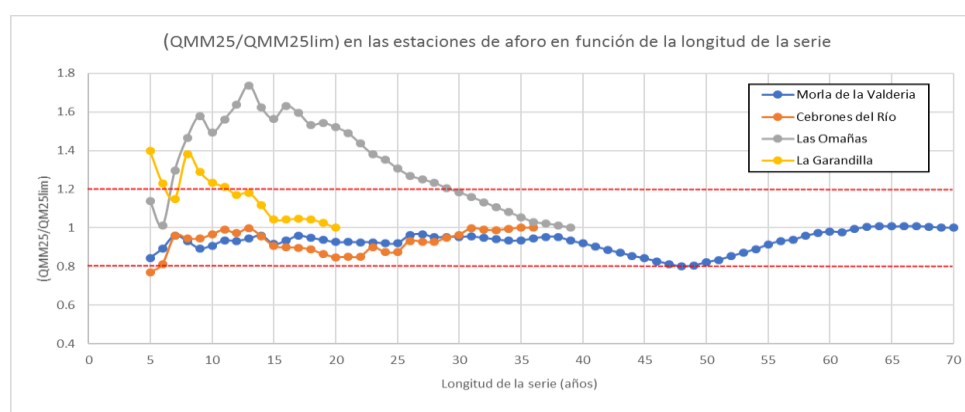


Figura 24. Evolución del valor de $(QMM25/QMM25_{lim})$ en función de la longitud de la serie

Se evidencia la similitud al gráfico obtenido con los valores calculados por el método de caudal básico de mantenimiento ya que se nota la misma estabilidad en las series de las estaciones EA 2060 en Cebrones del Río y EA 2089 en Morla de la Valdería. También se aprecia el claro descenso en los valores de los caudales ecológicos para las longitudes más largas en las estaciones Las Omañas y La Garandilla.

Se ha propuesto como longitud mínima de la serie un periodo de 30 años ya que a partir de esta duración se obtienen valores de los caudales ecológicos muy cercanos a los calculados con la totalidad de la serie.

Se ha tomado como criterio de selección un periodo que contenga como máximo un error del 40% respecto al valor del caudal ecológico obtenido con la totalidad de la serie disponible $(QMM25_{lim})$. Es decir, uno que asegure que los valores $(QMM25/QMM25_{lim})$ no se encuentren fuera del rango de 0.80 y 1.20 en el gráfico anterior.

6. DESAGREGACIÓN DE LAS SERIES MENSUALES

Como se ha dicho, el propósito de este trabajo es determinar los caudales mínimos de los ríos, dentro de la zona de estudio, partiendo de las series hidrológicas del modelo SIMPA. Aunque algunos métodos hidrológicos pueden basarse en datos mensuales, la gran mayoría necesita de datos de caudales naturales diarios, siendo por tanto necesaria la desagregación de los datos mensuales a diarios (CHDUERO 2015).

Por lo tanto, es necesario realizar una desagregación de los datos mensuales que ofrece SIMPA a una escala diaria. Ahora ya sabiendo que se tiene que realizar la desagregación la siguiente cuestión es elegir cual distribución aplicar. Existen muchas distribuciones que pueden tomar las desagregaciones, como, por ejemplo: exponencial, lineal, logarítmica, polinómica, potencial, constante, etc. Además en hidrología han sido muy utilizadas las desagregaciones estocásticas que tienen como resultado series sintéticas que buscan imitar el comportamiento hidrológico histórico con una justificación estadística. En donde existen dos enfoques típicos, el paramétrico: que imponen una linealidad o distribución a partir de datos históricos; y el no paramétrico: el cual puede capturar la dependencia del estado, la no linealidad y la multimodalidad dentro de los conjuntos de datos históricos.

La elección del tipo de reparto a utilizar se ha efectuado con la ayuda de los caudales medios diarios procedentes de las estaciones de aforo en régimen natural dentro del área de estudio. El criterio que se elige para la selección del tipo de reparto a utilizar es escoger aquella distribución que brinde resultados de los caudales ecológicos muy parecidos a los obtenidos con los datos diarios originales.

Se han propuesto dos métodos de reparto (lineal y constante) para efectuar la desagregación a escala diaria partiendo de las medias mensuales de las estaciones de aforo.

En el reparto constante se considera que el caudal medio diario que circula por el río es igual al valor promedio diario que se registró en el mes. En otras palabras, este se obtiene de sumar los caudales medios diarios de un mes entero para después dividir esta cantidad entre la totalidad de los días del mes y finalmente este valor de caudal medio se le asigna a cada uno de los días de ese mes.

Por otro lado, el reparto lineal supone una disminución o crecimiento (ya sea el caso) gradual y lineal de los caudales medios diarios. Para la determinación de los valores diarios se realizó una interpolación lineal partiendo de los valores medios del mes colocados en la mitad del mes. Por ejemplo, para calcular los caudales medios de los días del 17 de diciembre al 15 de enero inclusive, se realizó una interpolación lineal asignando únicamente los valores del día medio de cada mes (16 de diciembre y 16 de enero) y así se consiguió determinar los caudales medios para esos 30 días comprendidos en ese periodo.

Por lo tanto la diferencia entre estos dos métodos de repartición radica en que con el método constante se obtiene el mismo valor de caudal para todos los días de un mismo mes, mientras que con una desagregación lineal se consiguen diferentes valores para cada día del mes. El procedimiento que se ha seguido para calcular los caudales medios diarios a través de la desagregación lineal y constante origina que en los días medios de cada mes coincidan los valores asignados para ambos métodos.

Cabe señalar que la desagregación de las series mensuales en el plan hidrológico se realiza aplicando una serie de patrones de distribución diarios correspondiente a la estación de control en régimen natural (o casi) situada en las proximidades. De esta forma, las series mensuales se multiplican por el correspondiente coeficiente adimensional diario, con lo cual, las series resultantes tienen exactamente el mismo patrón temporal que la serie de la cual se obtuvieron dichos coeficientes. Es decir, ambas distribuciones estadísticas tienen el mismo parámetro de forma aunque el de escala será diferente, pero la autocorrelación temporal será idéntica (CHDUERO 2015).

A continuación se representa los caudales medios diarios de la estación de aforo EA 2076 Las Omañas para el año hidrológico 1998-99 con el fin de ilustrar los valores y el comportamiento que se consiguen aplicando las desagregaciones a escala diaria con los dos métodos utilizados.

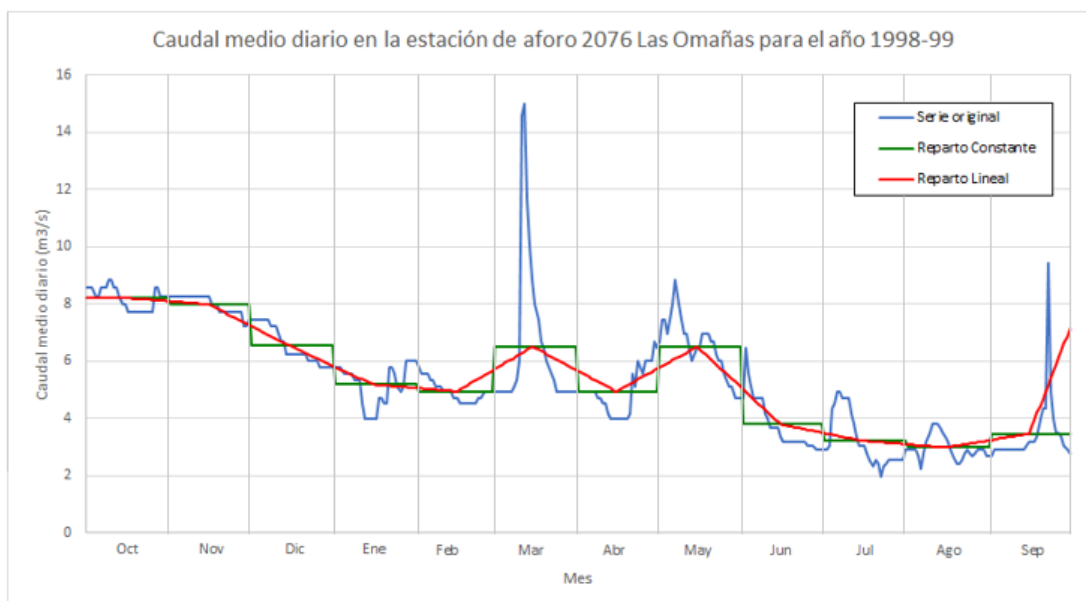


Figura 25. Caudales medios diarios en la estación de aforo 2076 Las Omañas para el año hidrológico 1998-99 para la serie original y las series desagregadas por una repartición constante y lineal

Al ya haber realizado las desagregaciones se han calculado los caudales ecológicos para diferentes longitudes de serie. Al igual que en el análisis de la longitud de la serie, se han calculado los caudales ecológicos para diferentes duraciones partiendo de los últimos 5 años consecutivos y añadiendo un año más a cada periodo.

Finalmente se ha realizado una comparación entre los caudales ecológicos obtenidos con los datos diarios originales y los estimados a partir de la media mensual. Dicha comparación se efectuó por medio de un gráfico de dispersión en la cual se busca el reparto que se ajuste de una mejor manera a los caudales obtenidos con los datos diarios reales. Esta desagregación y su consecuente comparación se realizó con el fin de elegir el mejor método de reparto diario para aplicarlo a los datos mensuales de las series hidrológicas.

6.1 Gráficos comparativos de caudales ecológicos: datos diarios originales vs estimados (reparto)

6.1.1 Media móvil de orden 25

Se ha realizado la comparación entre los caudales ecológicos calculados a partir de los datos diarios observados en las estaciones de aforo y los estimados a partir de la media mensual. Los repartos diarios propuestos para la desagregación son

uno lineal y uno constante. A continuación, se representan los gráficos de dispersión que contienen la nube de puntos en la que se comparan los valores de caudales ecológicos para los métodos de variables de centralización móviles. Se comienza presentando los ejemplos correspondientes a la serie de la EA 2083 La Garandilla por el método de la media móvil de orden 25. En el Anexo 7 se presentan con detalle los resultados obtenidos de todas las series analizadas.

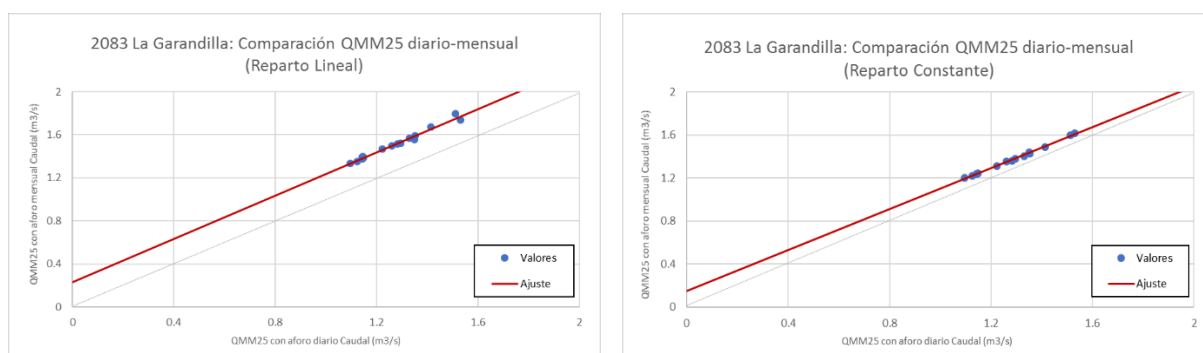


Figura 26. Gráficos de comparación del caudal QMM25 en la estación de aforo La Garandilla entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)

En los gráficos anteriores se detecta que tanto con el reparto lineal como con el reparto constante los caudales ecológicos, calculados por el método de la media móvil de orden 25 para la estación de aforo La Garandilla, se asemejan mucho a aquellos caudales ecológicos obtenidos con los datos diarios reales. Lo anterior indica que la elección de los tipos de distribuciones a comparar fue acertada, pero falta hacer el mismo análisis para las demás estaciones de aforo y los demás métodos hidrológicos de cálculo de caudales ecológicos para poder seleccionar entre las dos distribuciones aquel reparto que brinde mejores resultados.

6.1.2 Caudal básico de mantenimiento

A continuación, se representan los gráficos de dispersión que contienen la nube de puntos en la que se comparan los valores de caudales ecológicos calculados por el método del caudal básico de mantenimiento correspondientes a la serie de la EA 2076 Las Omañas. En el Anexo 8 se presentan con detalle los resultados obtenidos de todas las series analizadas.

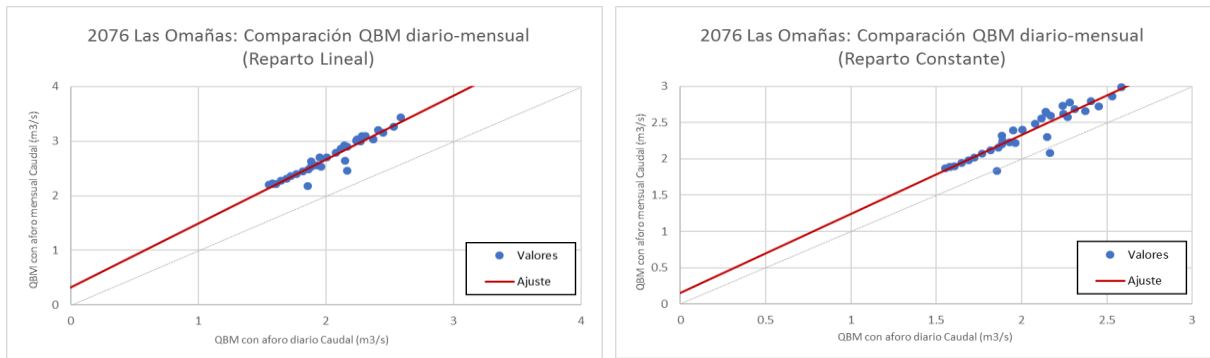


Figura 27. Gráficos de comparación del caudal QBM en la estación de aforo Las Omañas entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)

Se observa una mejor correlación de los caudales ecológicos obtenidos por una distribución constante con aquellos caudales calculados con los datos diarios originales ya que los valores con este reparto son más cercanos a los conseguidos con la serie de datos diarios reales.

Se puede comprobar esta mejor correlación de los caudales ecológicos obtenidos por un reparto constante al percibir que los caudales calculados con una distribución constante son, en promedio, $0.32 \text{ m}^3/\text{s}$ mayores que los obtenidos con los datos diarios reales. Mientras que por otra parte los resultantes con una distribución lineal son, en promedio, $0.67 \text{ m}^3/\text{s}$ mayores que los caudales ecológicos originales.

6.1.3 Percentiles de clasificación mensual

A continuación, se deben realizar las mismas comparaciones, pero con los caudales ecológicos obtenidos por los métodos de percentiles de la curva de caudales clasificados. Se comienza mostrando los resultados de los caudales ecológicos por el método de cuantiles a escala mensual. Se representan los gráficos de dispersión de los valores de caudales ecológicos calculados por los métodos Q85M, Q90M y Q95M correspondientes a la serie de la EA 2089 Morla de la Valdería, representando cada mes con un color diferente. En el Anexo 9 se presentan con detalle los resultados obtenidos de todas las series analizadas.

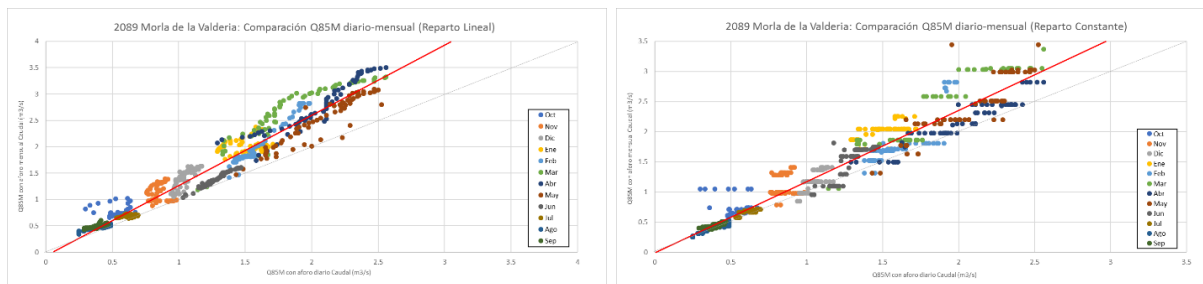


Figura 28. Gráficos de comparación del caudal Q85M en la estación de aforo Morla de la Valdería entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)

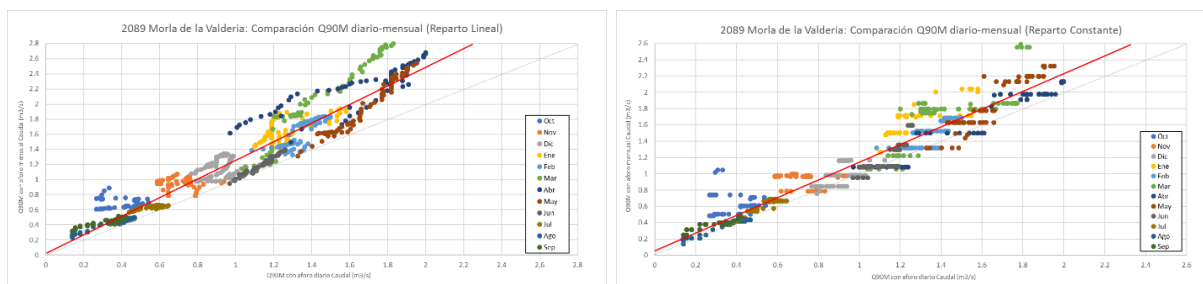


Figura 29. Gráficos de comparación del caudal Q90M en la estación de aforo Morla de la Valdería entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)

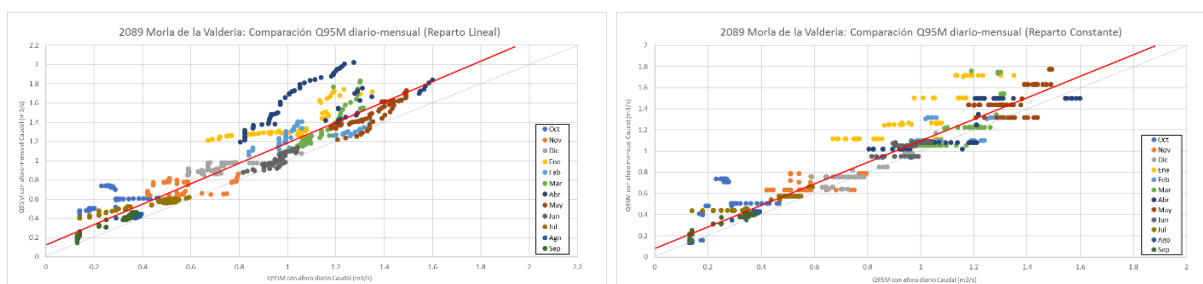


Figura 30. Gráficos de comparación del caudal Q95M en la estación de aforo Morla de la Valdería entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)

Se puede decir que tanto con el reparto lineal como con el reparto constante los caudales ecológicos se asemejan mucho a aquellos caudales ecológicos obtenidos con los datos diarios reales. La línea de ajuste (línea roja) muestra la tendencia que toman los valores de caudales ecológicos calculados con ambas series. Al ser esta línea paralela y pasar por encima de la línea de simetría (línea gris) ilustra que los caudales ecológicos obtenidos con las estimaciones a partir de la media mensual toman valores superiores a aquellos calculados con la serie diaria original.

A simple vista se aprecia que ambas distribuciones tienen un buen comportamiento en comparación con los caudales ecológicos obtenidos con los datos diarios reales. Como el propósito de este apartado es elegir entre uno de estos

dos repartos se tendrá que hacer uso de los datos arrojados por el ajuste empleado. Al final se seleccionará aquella distribución que se ajuste a un modelo de regresión lineal que esté lo más próxima a la diagonal principal, que la pendiente sea próxima a 1 y la ordenada en el origen próxima a 0, buscando también una buena bondad del ajuste con un coeficiente de correlación alto. Más adelante se observará, en el resumen de los resultados de la comparación de los caudales ecológicos, que se obtiene un mejor ajuste para los caudales ecológicos calculados por el método de cuantiles a escala mensual con un reparto constante.

6.1.4 Percentiles de clasificación por periodos

Ya habiendo analizado los caudales ecológicos por el método de cuantiles a escala mensual, únicamente falta comparar los propios por una clasificación por periodos. Como ya ha sido mencionado, se distingue el periodo seco, compuesto por los meses de estiaje (julio, agosto y septiembre) y el periodo húmedo, compuesto por el resto de los meses.

Se muestran los resultados de los caudales ecológicos por el método de cuantiles por periodos. Se representan los gráficos de dispersión de los valores de caudales ecológicos calculados por los métodos Q85P, Q90P y Q95P correspondientes a la serie de la EA 2076 Las Omañas, representando cada periodo con un color diferente. En el Anexo 10 se presentan con detalle los resultados obtenidos de todas las series analizadas.

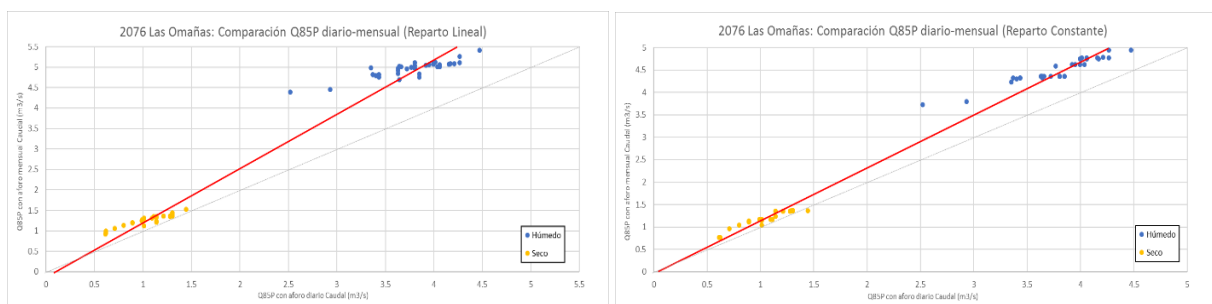


Figura 31. Gráficos de comparación del caudal Q85P en la estación de aforo Las Omañas entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)

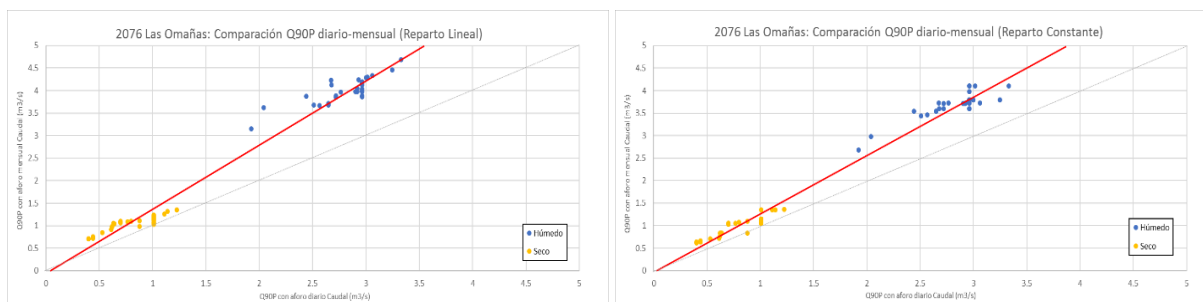


Figura 32. Gráficos de comparación del caudal Q90P en la estación de aforo Las Omañas entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)

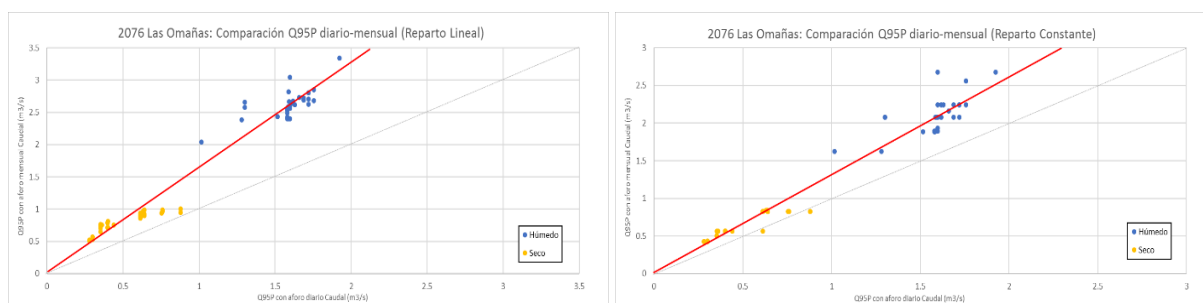


Figura 33. Gráficos de comparación del caudal Q95P en la estación de aforo Las Omañas entre series observadas diarias y las estimadas a partir de la media mensual por medio de un reparto lineal (izquierda) y un reparto constante (derecha)

En las nubes de puntos anteriores se observa un comportamiento similar para ambas distribuciones en donde las líneas de ajuste cruzan por la ordenada en el origen muy próximas a 0 y se van abriendo ligeramente hacia arriba indicando que las pendientes de las regresiones son mayores a la unidad.

Se observa que los resultados de los caudales ecológicos del periodo seco, calculados a partir de la media mensual por los dos repartos diarios empleados, presentan valores más parecidos a los caudales ecológicos reales que los del periodo húmedo. Lo anterior se puede constatar viendo que los puntos amarillos (periodo seco) se encuentran muy próximos a la diagonal principal, situación que no ocurre con los puntos azules (periodo húmedo) ya que estos se alejan más de la línea de simetría.

Otra situación a destacar es que para los valores de los gráficos de reparto constante los puntos se encuentran más cercanos a la diagonal principal en comparación a los puntos de los gráficos de reparto lineal. Se ven incluso puntos del reparto constante que coinciden con la diagonal principal, indicando que para esos puntos el caudal ecológico obtenido con los datos de la distribución constante y el caudal ecológico calculado con los datos diarios reales son los mismos. La cualidad antes mencionada indica que la mejor distribución que se puede tomar para hacer

un reparto diario partiendo de la media mensual de caudales es la de un reparto constante, lo que se podrá comprobar más adelante viendo que con dicho reparto se obtiene una mejor correlación y valores de las pendientes del ajuste más próximas a la unidad.

6.2 Resultados obtenidos

A continuación, se presentan las tablas que resumen los resultados obtenidos en la comparación de los caudales ecológicos calculados a partir de los datos diarios originales y los estimados de la media mensual. Se presentan los valores característicos de la regresión lineal tanto para la distribución constante como la lineal. Se comienza por los ajustes de los caudales ecológicos calculados por los métodos de variables de centralización móviles.

Tabla 8. Resultados del ajuste de caudal ecológico por métodos de media móvil a partir de series observadas diarias y mensuales (Reparto lineal)

Método	QBM			QMM25		
	R2	m	q0	R2	m	q0
2060 Cebrones del Río	0.15	0.48	4.46	0.78	1.15	-0.07
2076 Las Omañas	0.90	1.17	0.33	1.00	1.02	0.25
2083 La Garandilla	0.69	1.02	1.08	0.98	1.01	0.23
2089 Morla de la Valderia	0.49	0.53	0.62	0.87	1.04	0.09

Tabla 9. Resultados del ajuste de caudal ecológico por métodos de media móvil a partir de series observadas diarias y mensuales (Reparto constante)

Método	QBM			QMM25		
	R2	m	q0	R2	m	q0
2060 Cebrones del Río	0.26	0.61	3.44	0.88	1.09	0.00
2076 Omañas	0.87	1.09	0.15	1.00	1.02	0.10
2083 La Garandilla	0.81	0.77	0.76	1.00	0.95	0.15
2089 Morla de la Valderia	0.37	0.37	0.54	0.78	0.97	0.09

El método hidrológico para el cálculo de caudales ecológicos que obtiene mejores ajustes es el método de la media móvil de orden 25. Este método, para todas las estaciones y por las dos distribuciones estudiadas (lineal y constante), obtiene buenos valores como R^2 superiores a 0.78, pendientes en un rango de 0.95 a 1.15 y valores q_0 cercanos a cero.

Por otra parte, con el método del caudal básico de mantenimiento en algunas estaciones de aforo como EA 2089 Morla de la Valdería y EA 2060 Cebrones del Río se obtienen muy malos ajustes con coeficientes de correlación muy bajos de 0.49 y 0.15 respectivamente con un reparto lineal y de 0.37 y 0.26 respectivamente con un reparto constante, además de pendientes de los ajustes muy alejadas a la unidad y ordenadas al origen muy lejanas a cero. Sin embargo, para las otras dos estaciones de aforo, EA2083 La Garandilla y EA2076 Las Omañas, se obtienen resultados buenos sobre todo para esta última con valores del ajuste de $R^2=0.87$, $m=1.09$ y $q_0=0.15$ para el reparto constante.

El siguiente paso es determinar cuál reparto presenta mejores resultados. Como se ha señalado, para el método de la media móvil de orden 25 los ajustes son excelentes para ambos repartos propuestos, pero toca analizar con cual distribución se obtienen mejores ajustes.

En la tabla se observa que para las estaciones 2076 y 2083 con el reparto constante se obtuvieron valores de regresiones perfectos de $R_2 = 1$, pendientes cercanas a la unidad (1.02 y 0.95) y valores de q_0 de 0.10 y 0.15.

En lo referente a la estación de aforo EA 2060 el ajuste con el reparto constante fue mejor que con el reparto lineal al tener un R_2 de 0.88 (0.1 mayor al del reparto lineal), una pendiente de 1.09 y una ordenada al origen de cero.

El ajuste del QMM25 para la estación EA 2089 es muy similar tanto para el reparto lineal como el constante en donde ambos tienen el mismo valor de q_0 de 0.09, el valor de la pendiente se encuentra cercano a la unidad 1.04 para el reparto lineal y 0.97 para el constante y coeficientes de correlación de 0.87 y 0.78 para el reparto lineal y reparto constante, respectivamente.

Se llega a la conclusión de que con un reparto constante se obtienen muy buenos resultados de los caudales ecológicos por el método de la media móvil de orden 25.

Del método del caudal básico de mantenimiento se puede decir que con un reparto constante se obtienen mejores ajustes y valores más parecidos a los caudales ecológicos originales en las estaciones de aforo EA 2060 Cebrones del Río y EA 2076 Las Omañas en donde los valores de la pendiente son más cercanos a la

unidad y las ordenadas al origen más próximas a cero, respecto a los resultados del reparto lineal.

Sin embargo, para las estaciones restantes, en La Garandilla y Morla de la Valdería, parecen tener un mejor ajuste aquellas regresiones efectuadas a los valores calculados con los datos propios del reparto lineal. En consecuencia, viendo de momento únicamente los ajustes de los resultados de los caudales ecológicos calculados por los métodos de variables de centralización móviles (QBM y QMM25) se puede confirmar que el reparto constante es una buena distribución a aplicar para obtener buenos ajustes y resultados muy parecidos a los reales.

Seguidamente, se debe realizar el mismo análisis, pero con los caudales ecológicos obtenidos por los métodos de percentiles de la curva de caudales clasificados. Se comienza mostrando las tablas que resumen los resultados obtenidos en la comparación de los caudales ecológicos calculados a partir de los datos diarios originales y los estimados de la media mensual por el método de cuantiles a escala mensual. Se presentan los valores característicos de la regresión lineal tanto para la distribución constante como lineal.

Tabla 10. Resultado del ajuste de caudal ecológico por el método de cuantiles a escala mensual a partir de series observadas diarias y mensuales (Reparto lineal)

Método	Q95M			Q90M			Q85M		
	R2	m	q0	R2	m	q0	R2	m	q0
2060 Cebrones del Río	0.89	1.07	0.69	0.93	1.17	0.23	0.93	1.24	-0.07
2076 Las Omañas	0.88	1.15	0.51	0.88	1.09	0.57	0.90	1.10	0.41
2083 La Garandilla	0.97	1.14	0.32	0.98	1.12	0.32	0.98	1.11	0.25
2089 Morla de la Valderia	0.88	1.06	0.16	0.93	1.24	0.04	0.95	1.33	-0.04

Tabla 11. Resultado del ajuste de caudal ecológico por el método de cuantiles a escala mensual a partir de series observadas diarias y mensuales (Reparto constante)

Método	Q95M			Q90M			Q85M		
	R2	m	q0	R2	m	q0	R2	m	q0
2060 Cebrones del Río	0.87	1.01	0.61	0.89	1.15	0.08	0.89	1.18	0.01
2076 Las Omañas	0.87	1.09	0.34	0.92	1.04	0.37	0.92	1.06	0.20
2083 La Garandilla	0.97	1.16	0.19	0.98	1.09	0.25	0.97	1.08	0.19
2089 Morla de la Valderia	0.91	1.02	0.10	0.93	1.09	0.06	0.93	1.18	0.00

El ajuste de las regresiones para los caudales ecológicos por el método de cuantiles a escala mensual es muy bueno tanto para la distribución lineal como la constante, ya que se obtienen valores de R^2 superiores a 0.87, los cuales son más

que aceptables llegando a alcanzar valores que muestran una gran correlación con R^2 de 0.98. Además, las pendientes de los ajustes se aproximan mucho a la unidad.

A diferencia de lo ocurrido con los caudales ecológicos obtenidos por los métodos de variables de centralización móviles, que mostraban un notable mejor ajuste para el QMM25 sobre el QBM, los ajustes para los tres percentiles no muestran un claro ganador, siendo todos muy parecidos y con muy buenos resultados. Por ejemplo, las regresiones para Q85M tienen valores en promedio de R^2 de 0.93 mientras que para Q95M valores de R^2 de 0.91 lo cual haría pensar que los ajustes para Q85M son mejores. Sin embargo, con las pendientes de los ajustes la situación cambia ya que se obtienen mejores resultados para las regresiones de Q95M teniendo de media pendientes de 1.09 mientras que para Q85M se obtienen pendientes de 1.16 en promedio.

Ahora bien, lo que atañe en este capítulo es elegir un tipo de reparto diario por lo que el análisis que se debe hacer es comparar ambas distribuciones y seleccionar una que muestre mejores ajustes.

En el análisis de percentil por percentil se aprecia que para el percentil 85 tanto para el reparto lineal como el constante, de media, los valores de R^2 son muy similares de 0.94 y 0.93, respectivamente. La diferencia entre los ajustes de los caudales ecológicos para los diferentes repartos se encuentra primordialmente en los valores de las pendientes de ajuste en donde, de media, los valores de m son de 1.19 para la distribución lineal y 1.13 para la distribución constante. En éstos, se llegan a tener pendientes muy elevadas para un reparto lineal como por ejemplo la de 1.33 para el ajuste de la estación Morla de la Valdería.

Con el percentil 90 sucede algo similar ya que en este caso se tienen, de media, valores de R^2 idénticos de 0.93 pero valores de las pendientes de ajuste y ordenadas al origen diferentes. Las regresiones obtenidas de los caudales ecológicos calculados por el método de dicho percentil tienen pendientes de ajuste con valores en promedio de 1.16 para la distribución lineal y 1.09 para la distribución constante, mientras que los valores de las ordenadas al origen siguen el mismo comportamiento en donde, en promedio, son 0.10 mayores en magnitud las obtenidas con un reparto lineal.

Siguiendo este patrón lo mismo sucede con las regresiones por el método de Q95M, donde la correlación entre ambos repartos es casi igual, las pendientes de los ajustes del reparto constante son ligeramente más próximas a la unidad y las ordenadas al origen de la distribución constante son más cercanas a cero. En consecuencia, se puede afirmar que, para los caudales ecológicos por el método de cuantiles a escala mensual, el reparto que brinda un mejor ajuste y resultados más cercanos a los reales es el reparto constante.

A continuación, se presentan las tablas que resumen los resultados obtenidos en la comparación de los caudales ecológicos calculados a partir de los datos diarios originales y los estimados de la media mensual. Se presentan los valores característicos de la regresión lineal tanto para la distribución constante como lineal. Se muestran los ajustes de los caudales ecológicos calculados por el método de percentiles de la curva de caudales clasificados por periodos.

Tabla 12. Resultado del ajuste de caudal ecológico por el método de cuantiles por periodos a partir de series observadas diarias y mensuales (Reparto lineal)

Método	Q95P			Q90P			Q85P		
	R2	m	q0	R2	m	q0	R2	m	q0
2060 Cebrones del Río	0.94	1.33	-0.10	0.99	1.40	-0.70	0.99	1.38	-0.81
2076 Las Omañas	0.96	1.62	0.01	0.98	1.43	-0.08	0.98	1.32	-0.08
2083 La Garandilla	0.98	0.90	0.52	0.99	1.18	0.21	1.00	1.20	0.09
2089 Morla de la Valderia	0.97	1.28	0.03	0.96	1.29	0.02	0.99	1.38	-0.08

Tabla 13. Resultado del ajuste de caudal ecológico por el método de cuantiles por periodos a partir de series observadas diarias y mensuales (Reparto constante)

Método	Q95P			Q90P			Q85P		
	R2	m	q0	R2	m	q0	R2	m	q0
2060 Cebrones del Río	0.94	1.16	0.15	0.99	1.28	-0.49	0.99	1.28	-0.59
2076 Las Omañas	0.96	1.29	0.02	0.98	1.31	-0.05	0.99	1.19	-0.04
2083 La Garandilla	0.95	0.86	0.38	0.99	1.18	0.17	0.98	1.14	0.06
2089 Morla de la Valderia	0.98	1.18	0.00	0.97	1.20	0.00	0.99	1.31	-0.10

En las tablas lo primero que llama la atención son las altas correlaciones que alcanzan las regresiones, en donde todas se aproximan a la unidad evidenciando así que el ajuste es muy bueno y la dispersión en torno a los valores del ajuste es muy pequeña. Las pendientes de las regresiones son mayores a las obtenidas en la clasificación mensual lo que se puede explicar viendo que los valores de los caudales ecológicos que se alcanzaban con los repartos para el periodo húmedo

eran muy superiores a los calculados para el mismo periodo con los datos diarios originales, lo que provoca que la línea de tendencia tome una inclinación mayor y se vaya alejando de la diagonal principal.

En cuanto a cuál estación de aforo consigue mejores ajustes se podría decir que en EA 2083 La Garandilla se consigue muy buenos ajustes sobre todo para los métodos de cálculo de caudales ecológicos Q85P y Q90P en donde para ambas distribuciones se consiguen muy buenos valores de R^2 y las pendientes más próximas a la unidad.

Por otra parte, siguiendo la misma línea que en las regresiones de los caudales ecológicos por el método de cuantiles a escala mensual el reparto constante es con el que se consiguen mejores ajustes y resultados más parecidos a los reales.

6.3 Conclusiones

En resumen, se ha comprobado que de estos dos tipos de repartos diarios propuestos el que obtiene mejores ajustes y resultados es el que sigue una distribución constante. No cabe duda que la aplicación del reparto constante a los datos medios mensuales de caudales para la consecuente determinación de caudales ecológicos por los métodos hidrológicos empleados en este trabajo es la mejor para las estaciones de aforos estudiadas. Lo anterior, debido a que de los cuatro métodos hidrológicos usados en esta investigación los resultados fueron indudablemente favorables para tres de estos métodos.

Para el método del caudal básico de mantenimiento no se puede afirmar que la distribución constante sea mejor que la lineal, pero sí se puede decir que los caudales ecológicos obtenidos con los datos del reparto lineal (para cualquiera de los cuatro métodos hidrológicos) son mayores a los obtenidos con los datos diarios reales y también a aquellos calculados con los datos del reparto constante. Por ello se puede afirmar que aplicar un reparto lineal implicaría una sobreestimación de los caudales ecológicos, situación que ocurriría también con un reparto constante pero no de tal magnitud.

Como se ha mencionado anteriormente, para determinar los caudales ecológicos en su gran mayoría se utilizan métodos hidrológicos que necesitan datos de caudales naturales diarios. En consecuencia, resulta indispensable realizar la

desagregación de los datos mensuales a diarios. Entonces un aspecto a resaltar es que como se tiene que hacer dicha desagregación a todas las series mensuales de SIMPA resultaría beneficioso aplicar un reparto que brinde buenos resultados y sea fácil de emplear. Por ello, el hecho de que la distribución constante haya sido la que mejor se ajuste, resulta una buena noticia para que el manejo de los datos de SIMPA sea más fácil y se pueda determinar los caudales mínimos ecológicos de una manera más rápida.

7. COMPARACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS: SERIE-AFORO

7.1 Periodos y años coincidentes

Se ha realizado la comparación entre los caudales ecológicos calculados a partir de las observaciones diarias en las estaciones de aforo y a partir de la serie desagregada por simulación hidrológica. Lo primero que se realizó fue ver los periodos y años en los que se coincide con tener registros para las series de las estaciones de aforo y las series SIMPA. Previamente en el apartado *Análisis de la representatividad de las series* ya se había determinado que masa de agua, codificada en el Plan, coincidía con cada una de las estaciones de aforo estudiadas.

A continuación, se muestra una tabla que resume los periodos en los que se coinciden con tener registro para las estaciones de aforo y las masas de agua. Además de que se puede ver nuevamente la relación que tienen en los emplazamientos las masas de agua (SIMPA) con las estaciones de aforos.

Tabla 14. Periodos y años con registros de datos para ambas series: AFORO-SIMPA

Código SIMPA	Estación	Denominación	Inicio - fin	Años de coincidencia
48	2060	Cebrones del Río	1978 - 2005	28
64	2076	Las Omañas	1962 - 2000	39
64	2083	La Garandilla	1970 - 1989	20
172	2089	Morla de la Valdería	1944 - 2005	62

Las series de las estaciones de aforo EA 2076 y EA 2089 son las que resultan de gran utilidad porque tienen mayor número de años de lecturas en coincidencia con sus correspondientes series hidrológicas de las masas de agua 64 y 172, respectivamente. Mientras que por otra parte las series restantes de las estaciones de aforo EA 2060 y EA 2083 cuentan con menos años de coincidencia.

7.2 Metodología seguida

Como se ha dicho anteriormente las series hidrológicas dadas por el modelo SIMPA son de carácter mensual, por ello el siguiente paso a realizar es la desagregación de los datos mensuales a diarios por el método que brindó mejores resultados: reparto constante.

En el apartado de la determinación de la longitud del periodo para calcular los caudales ecológicos se concluyó que las duraciones mínimas para conseguir buenos resultados de estos caudales ambientales fueron de 26 años para los métodos de percentiles de la curva de caudales clasificados y de 30 años para los de variables de centralización móviles. Entonces teniendo estos resultados sería oportuno hacer uso de estas duraciones calculando todos los caudales ecológicos posibles con estas longitudes dentro de los periodos en los que se coincide con tener datos de series hidrológicas y de aforos.

Se obtuvieron los caudales ecológicos con duraciones de 26 años y 30 años consecutivos para los métodos de percentiles de la curva de caudales clasificados y los de variables de centralización móviles, respectivamente. Por el análisis que se desea practicar únicamente fueron utilizadas las series correspondientes a las estaciones EA 2076 Las Omañas y EA 2089 Morla de la Valdería, ya que estas cuentan con años suficientes de registro para obtener varios valores de caudales ecológicos con las duraciones ya mencionadas.

La metodología que se siguió fue tomar 26 años consecutivos dentro de las series, por ejemplo: del año hidrológico 1 al año hidrológico 26, el siguiente del año 2 al 27 y así sucesivamente para el caso de los caudales ecológicos por los métodos de percentiles. Mientras que para los métodos de variables de centralización móviles se tomaron 30 años consecutivos, por ejemplo: del año hidrológico 1 al año hidrológico 30, el siguiente del año 2 al 31, así sucesivamente hasta llegar al último año.

Al seguir esta metodología para los caudales ecológicos por los métodos de variables de centralización se obtuvieron un total de 10 y 33 valores para las series de las estaciones EA 2076 y EA 2089, respectivamente. Mientras que para los caudales ecológicos por los métodos de percentiles se obtuvieron un total de 14 y 37 valores para las series de las estaciones EA 2076 y EA 2089, respectivamente.

Con estos valores se han efectuado unos gráficos de dispersión que representan la nube de puntos en los que se comparan los valores de caudales mínimos ecológicos provenientes de la serie desagregada a escala diaria del modelo SIMPA y las series naturales obtenidas de las estaciones de aforo.

7.3 Comparación de caudales ecológicos por distintos métodos

7.3.1 Métodos de variables de centralización

A continuación, se exponen los gráficos de dispersión de los valores de caudales ecológicos por los métodos de variables de centralización (QMM25 y QBM) que comparan la serie simulada con la serie observada correspondiente a la serie de la EA 2089 Morla de la Valdería. En el Anexo 11 se presentan los gráficos para la estación de aforo Las Omañas.

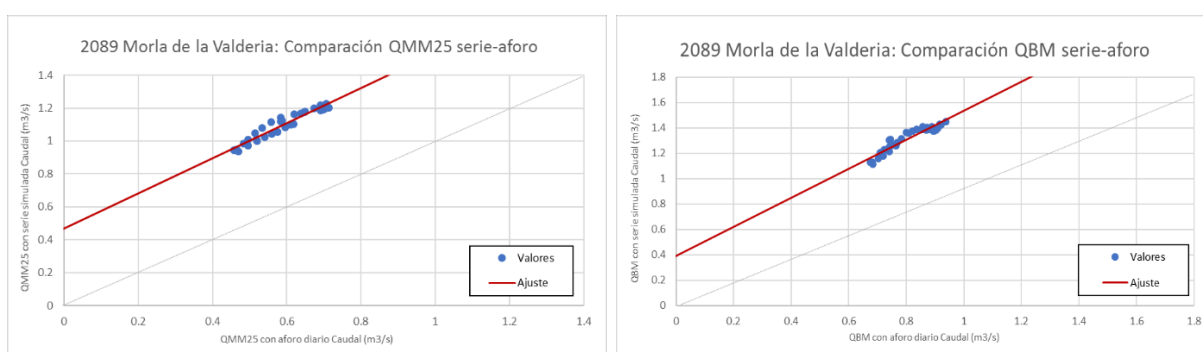


Figura 34. Gráficos de comparación de los caudales QMM25 (izquierda) y QBM (derecha) en la estación de aforo Morla de la Valdería entre series observadas y simuladas

En los gráficos se puede ver que existe una buena correlación entre los valores derivados de las estaciones de aforo y los simulados por SIMPA en donde el patrón de la regresión sigue una tendencia que se ajusta bien a una línea con pendiente próxima a la unidad. Además, se aprecia que dicha línea se encuentra paralelamente encima de la diagonal de simetría lo que indica que los valores del eje “y”, es decir los caudales ecológicos correspondientes a la serie simulada, son mayores que los caudales obtenidos con los datos diarios de aforo.

7.3.2 Método de percentiles a escala mensual

A continuación, se exponen los gráficos de dispersión de los valores de caudales ecológicos por los métodos de percentiles a escala mensual (Q85M, Q90M y Q95M) que comparan la serie simulada con la serie observada correspondiente a la serie de la EA 2089 Morla de la Valdería, representando cada mes con un color diferente. En el Anexo 12 se presentan los gráficos para la estación de aforo Las Omañas.

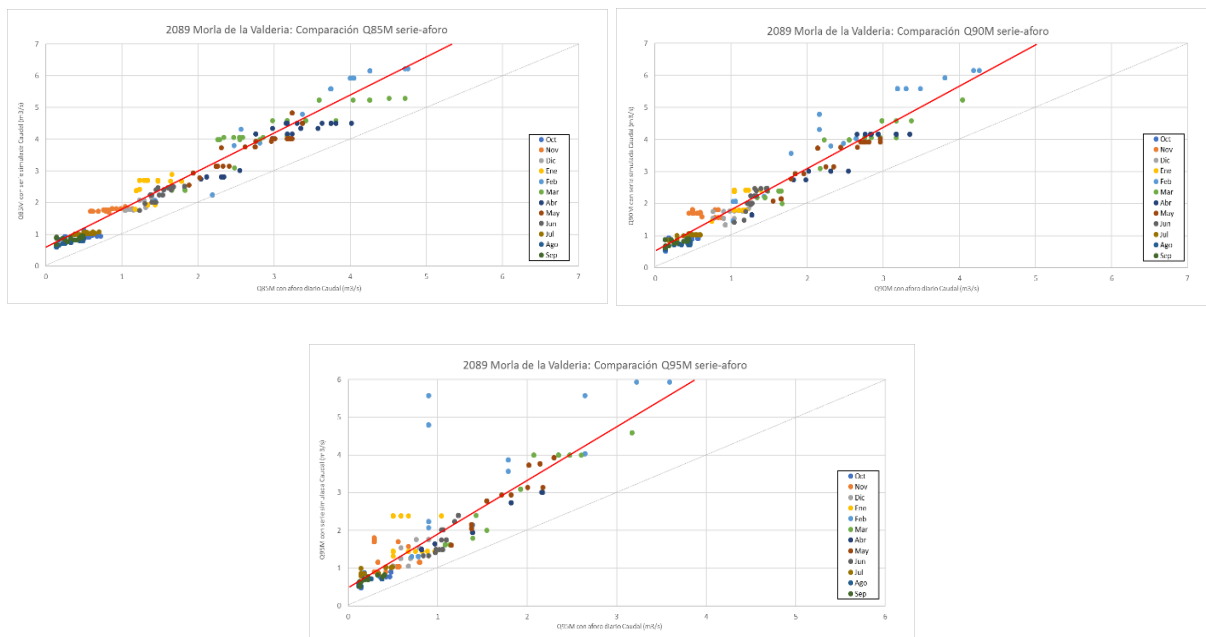


Figura 35. Gráficos de comparación de los caudales Q85M (izquierda), Q90M (derecha) y Q95M (abajo) en la estación de aforo Morla de la Valderia entre series observadas y simuladas

La nube de puntos del percentil 85 muestra una buena correlación con un patrón muy marcado que se representa por la línea de ajuste. La línea de tendencia pasa por encima de la diagonal principal y muestra una mayor inclinación. Esta inclinación puede explicarse por la superioridad en magnitud de los caudales ecológicos calculados a partir de la serie simulada respecto a los obtenidos con los datos de aforo.

Se puede apreciar muchos puntos que se encuentran por encima de la línea de tendencia haciendo que esta tome una mayor inclinación. Lo anterior se puede notar en varios pares de datos de los meses de noviembre, enero y febrero.

En el gráfico comparativo del Q90M se percibe una ligera disminución en la correlación con respecto a la del percentil 85, así como un aumento en la pendiente de ajuste, aunque sigue existiendo una buena semejanza en los resultados de los caudales ecológicos. Donde parece irse perdiendo la similitud entre los valores calculados con los datos aforados y los simulados es en los resultados del Q95M. En este gráfico se nota una gran dispersión de los puntos en donde además se divisa un aumento de la pendiente.

7.3.3 Método de percentiles por periodos

A continuación, se exponen los gráficos de dispersión de los valores de caudales ecológicos por el método de percentiles por periodos (Q85P, Q90P y Q95P) que comparan la serie simulada con la serie observada correspondiente a la serie de la EA 2089 Morla de la Valdería, representando cada periodo con un color diferente. En el Anexo 13 se presentan los gráficos para la estación de aforo Las Omañas.

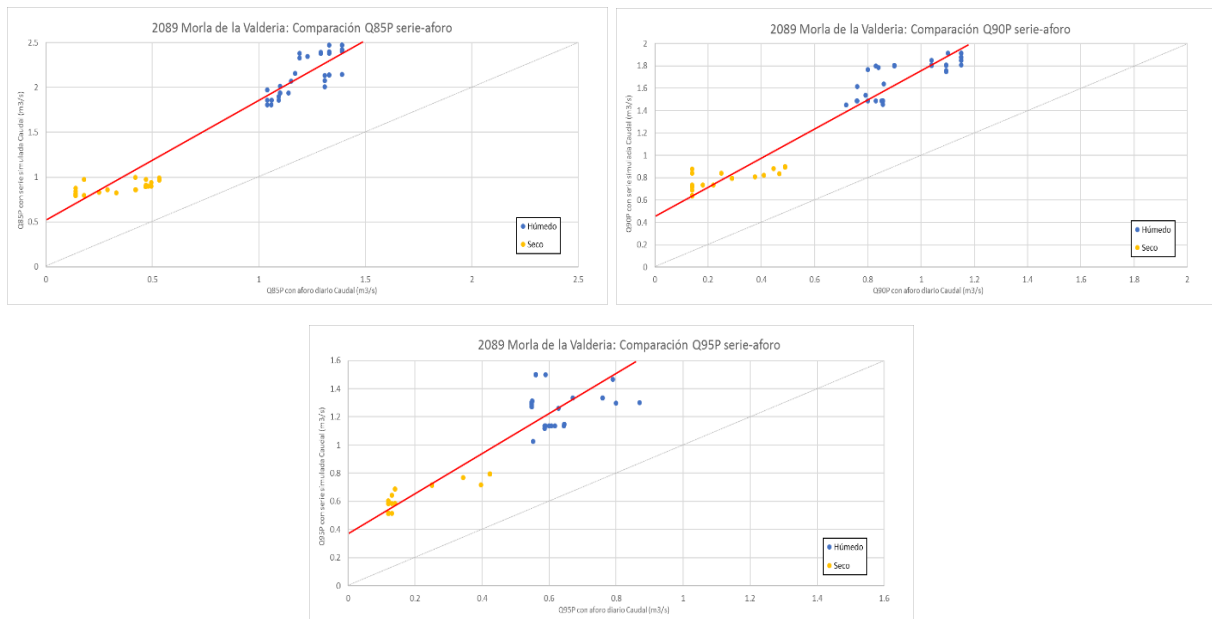


Figura 36. Gráficos de comparación de los caudales Q85P (izquierda), Q90P (derecha) y Q95P (abajo) en la estación de aforo Morla de la Valdería entre series observadas y simuladas

El comportamiento de estas nubes de puntos es similar al de por clasificación mensual en donde existe una buena correlación en el ajuste y las pendientes son mayores a la unidad.

Otra circunstancia que se aprecia es que se encuentra una mayor dispersión en los puntos del periodo húmedo, situación que coincide con los gráficos para la clasificación mensual en donde se veía que principalmente los meses húmedos eran los que tenían más disparidad.

7.4 Resultados obtenidos

A continuación, se presentan las tablas que resumen los resultados obtenidos en la comparación de los caudales ecológicos calculados a partir de las observaciones diarias en las estaciones de aforo y a partir de las series desagregadas por simulación hidrológica. Como ya ha sido mencionado, para obtener los caudales

ecológicos se toman duraciones de 26 años y 30 años consecutivos para los métodos de percentiles de la curva de caudales clasificados y los de variables de centralización móviles, respectivamente. Se representan los valores característicos de la regresión lineal efectuada para el análisis comparativo. Se comienza por los ajustes de los caudales ecológicos calculados por los métodos de variables de centralización móviles.

Tabla 15. Resultados del ajuste de caudal ecológico por métodos de media móvil a partir de series observadas (AFORO) y simuladas (SIMPA)

Método	QBM			QMM25		
Parámetro	R2	m	q0	R2	m	q0
2076 Las Omañas	0.86	-0.68	3.46	0.82	-0.77	3.27
2089 Morla de la Valderia	0.89	1.14	0.39	0.92	1.07	0.47

En el resumen de los ajustes por regresión lineal de los resultados de los caudales ecológicos de series observadas y series simuladas se detecta que para la estación EA 2089 Morla de la Valdería el ajuste es bueno para ambos métodos con R^2 superiores a 0.88 y pendientes muy próximas a la unidad. Como ya se había visto en los gráficos de dispersión el ajuste para el caudal ecológico por el método de la media móvil de orden 25 obtiene un mejor ajuste que el del caudal básico de mantenimiento.

Por otra parte, el ajuste para la estación EA 2076 Las Omañas es muy malo, incluso presentando pendientes negativas. Este pésimo ajuste se debe a la baja o nula correlación que presentan las series aforadas con las simuladas en algunos periodos.

Lo anterior, se puede comprobar en el apartado *Análisis de la representatividad de las series* en donde en los gráficos de secuencia temporal y de desviaciones acumuladas no se presenta un paralelismo entre dichas series, sobre todo en el periodo 1962-1969 pero también en los años 1979, 1982-1984 y 1991. A continuación, se muestra el gráfico de secuencia temporal de estas series para demostrar lo mencionado.

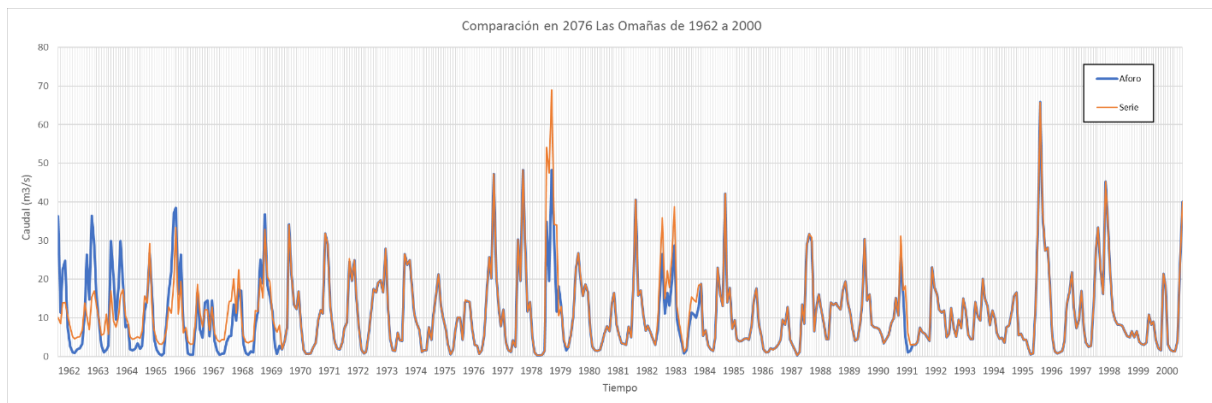


Figura 37. Gráfico de secuencia temporal en la estación Las Omañas

Se ha comprobado la baja representatividad de la serie simulada por la gran disparidad entre los resultados medios mensuales obtenidos con la serie simulada y la medida, pero hay que resaltar que el problema se acentúa en los datos diarios mínimos que son los que finalmente sirven para la determinación de los caudales ecológicos.

Esta circunstancia se considera normal. En primer lugar, debido a la dificultad intrínseca del proceso de modelación de caudales a partir de las precipitaciones, que obliga a la realización de numerosas simplificaciones. En segundo lugar, porque las series fueron obtenidas con un propósito específico: caracterización del régimen hidrológico para la evaluación de los recursos disponibles en el proceso de planificación hidrológica. Resulta lógico suponer que los criterios de ajuste empleados para la calibración del modelo otorgarán más importancia al ajuste de los valores altos de caudal y a los volúmenes totales anuales que al ajuste de los caudales mínimos de las series (Garrote, 2010).

Es relevante señalar que tanto el QMM25 y el QBM para una serie se obtienen como la media aritmética de los caudales ecológicos anuales obtenidos para cada año de estudio por ello en este caso al tener años con muy malas correlaciones se obtienen malos resultados y estos acarrearán estos pobres resultados.

A continuación, se presentan las tablas que resumen los resultados obtenidos en la comparación de los caudales ecológicos calculados a partir de las observaciones diarias en las estaciones de aforo y a partir de las series desagregadas por simulación hidrológica para los métodos de percentiles de la curva de caudales clasificados. Se representan los valores característicos de la regresión lineal

efectuada para el análisis comparativo. Se comienza por los ajustes de los caudales ecológicos por clasificación mensual.

Tabla 16. Resultados del ajuste de caudal ecológico por el método de cuantiles a escala mensual a partir de series observadas (AFORO) y simuladas (SIMPA)

Método	Q95M			Q90M			Q85M		
Parámetro	R2	m	q0	R2	m	q0	R2	m	q0
2076 Las Omañas	0.93	1.13	0.60	0.92	1.16	0.46	0.94	1.14	0.37
2089 Morla de la Valdería	0.76	1.39	0.53	0.94	1.29	0.51	0.96	1.21	0.50

Por el método de percentiles se aprecia que las comparaciones de las series para ambas estaciones de aforo brindan buenos ajustes con correlaciones deseadas.

A diferencia de los métodos de variables de centralización móviles los métodos de percentiles -recordando que en estos se selecciona como caudal ecológico aquel que resulta superado por un determinado porcentaje de los valores medios diarios- no se ven muy afectados si en la serie se presentan años o periodos con poca similitud. Lo anterior, debido a que estos métodos utilizan la totalidad de la serie para calcular el valor del caudal ecológico, situación que también realizan los métodos de variables de centralización móviles, pero de forma indirecta ya que primero obtienen el caudal ecológico para cada año (que se ven afectados por datos diarios consecutivos de 2 a 100 días para el QBM y de 25 días consecutivos para el QMM25) y después se realiza una media aritmética de estos valores.

Por la cualidad antes mencionada de la forma de cálculo de los métodos de variables de centralización móviles si en un periodo se obtiene unos valores con poca correlación el error en la determinación del caudal ecológico será mayor.

En la tabla se resume lo que ya se había visto en los gráficos de dispersión para el ajuste de la estación EA 2089 Morla de la Valdería en donde se obtienen buenas correlaciones y pendientes para el percentil 85. Lo mismo sucede con el percentil 90 pero sin ser mejores que las anteriores y por último para el percentil 95 se aprecia un descenso considerable del valor de R^2 debido a la gran dispersión que se observa en la nube de puntos.

Por otra parte, para la estación EA 2076 Las Omañas se obtienen valores más estables para los tres percentiles en los que el valor de R^2 ronda el 0.93 y para la pendiente de ajuste un valor de 1.14 de media.

A continuación, se presenta la tabla que resume los resultados obtenidos en la comparación de los caudales ecológicos calculados a partir de las observaciones diarias en las estaciones de aforo y a partir de las series desagregadas por simulación hidrológica para el método de percentiles de la curva de caudales clasificado por periodos. Se representan los valores característicos de la regresión lineal efectuada para el análisis comparativo.

Tabla 17. Resultados del ajuste de caudal ecológico por el método de cuantiles por periodos a partir de series observadas (AFORO) y simuladas (SIMPA)

Método	Q95P			Q90P			Q85P		
Parámetro	R2	m	q0	R2	m	q0	R2	m	q0
2076 Las Omañas	0.99	1.43	0.07	0.97	1.40	0.18	0.95	1.14	0.42
2089 Morla de la Valderia	0.85	1.40	0.39	0.95	1.27	0.47	0.95	1.32	0.52

En los ajustes de clasificación por periodos se distinguen unas buenas correlaciones que incluso son mejores a las propias de la clasificación mensual pero las pendientes de ajustes toman valores superiores alejándose más de la unidad y provocando así que la línea de ajuste no se asemeje a la diagonal principal, recordando que una correlación perfecta entre los valores sería que todos los puntos pasasen por la diagonal principal, lo que indicaría que los datos de caudales ecológicos obtenidos con las series observadas y simuladas serían idénticos.

Respecto a en cuál estación de aforos se obtienen mejores ajustes se podría decidir que en EA 2076 Las Omañas ya que para el percentil 85 se obtiene el mismo valor de R^2 que en la otra estación, pero los valores de la pendiente y la ordenada en el origen son mejores. En el percentil 90 los valores de R^2 y pendiente son mejores para la estación 2089 pero la ordenada al origen de Las Omañas se aproxima más a cero y finalmente para la comparación del Q95P se obtienen valores favorables de la correlación y la ordenada al origen de 0.99 y 0.07, respectivamente mostrando que los resultados alcanzados para la estación EA Morla de la Valdería son mejores.

7.5 Comparación de caudales ecológicos anuales: serie – aforo

Recapitulando, ya se cuenta con la comparación entre los caudales ecológicos calculados por los métodos de variables de centralización móviles a partir de las observaciones diarias en las estaciones de aforo y a partir de las series desagregadas por simulación hidrológica para periodos con duraciones de 30 años

consecutivos que se pudieron formar con las series estudiadas. Esta comparación únicamente se pudo realizar en las estaciones EA 2076 y EA 2089 que contaban con años de coincidencia de registros superiores a 30 años. Es decir que en las estaciones EA 2060 Cebrones del Río y EA 2083 La Garandilla no fue posible realizar dicho análisis por contar con 28 y 20 años, respectivamente de coincidencia de registros. Pero aún es posible efectuar un estudio comparativo entre los caudales ecológicos por los métodos de variables de centralización móviles a partir de las series aforadas y simuladas.

En el procedimiento de cálculo del caudal básico de mantenimiento y del caudal de la media móvil de orden 25 se obtienen unos caudales ecológicos para cada año de estudio. Al aprovechar esta condición es posible determinar los caudales anuales para las series observadas de las estaciones de aforo y las series simuladas de las masas de agua. En donde contando ya con los caudales ecológicos anuales es ahora posible realizar un análisis comparativo en aquellas estaciones en las que antes no era posible (EA 2060 y EA 2083), así como también en aquellas en las que ya se había hecho una comparación (EA 2076 y EA 2089) pero de caudales ecológicos con duraciones de 30 años consecutivos.

Se ha realizado la comparación entre los caudales ecológicos anuales calculados a partir de las observaciones diarias en las estaciones de aforo y a partir de la serie desagregada por simulación hidrológica. En donde se comparan únicamente los valores de caudales ecológicos pertenecientes a los años en que coincide haber registro para las series observadas de las estaciones de aforo y las series simuladas de las masas de agua.

Por lo tanto, se cuenta con un total de pares de datos (con series aforadas y simuladas) de 28, 20 y 62 para las estaciones EA 2060, EA 2083 y EA 2089, respectivamente. Mientras que en la estación Las Omañas se había visto desde la comparación anterior y con ayuda del gráfico de secuencia temporal que en los primeros años de la serie existía una muy mala correlación, sobre todo en el periodo de 1962-1969, por lo que se ha decidido hacer un análisis únicamente con los últimos datos de la serie (1980-2000), comparando así un total de 21 datos de caudales ecológicos anuales.

A continuación, se exponen los gráficos de dispersión de los valores anuales de caudales ecológicos por los métodos de variables de centralización (QMM25 y QBM) que comparan la serie simulada con la serie observada correspondiente a la serie de la EA 2076 Las Omañas. En el Anexo 14 se presentan con detalle los resultados obtenidos para las series restantes.

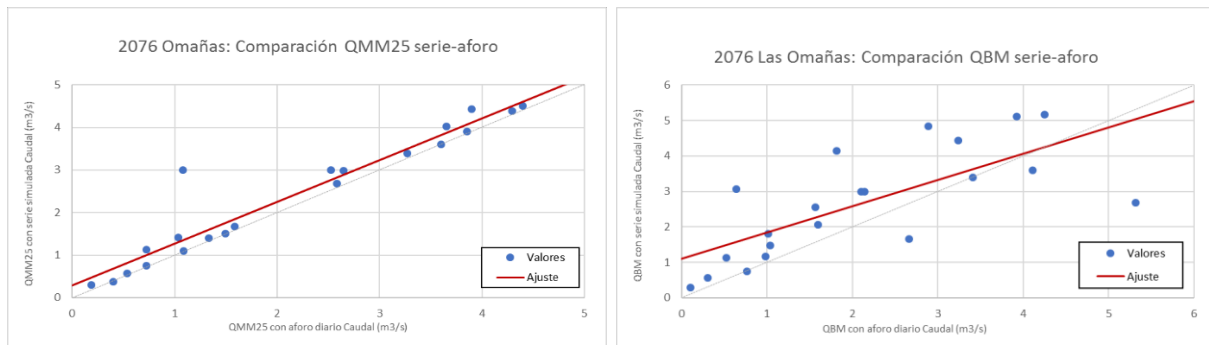


Figura 38. Gráficos de comparación de los caudales anuales de QMM25 (izquierda) y QBM (derecha) en la estación de aforo Las Omañas entre series observadas y simuladas

Los resultados para los caudales ecológicos determinados por el método de la media móvil de orden 25 muestran un mejor ajuste que los del caudal básico de mantenimiento.

Como se había supuesto efectivamente se obtienen mejores ajustes al utilizar únicamente los últimos años de las series que son los que consiguen mejores correlaciones y muestran una mejor representatividad. Sin embargo, con el método del caudal básico de mantenimiento los resultados son muy dispares, pero ya se consigue una pendiente positiva que muestra un mínimo grado de relación entre los valores.

Finalmente se resumen los resultados de las comparaciones entre los caudales ecológicos anuales por los métodos de variables de centralización móviles de las observaciones diarias en las estaciones de aforo y las series desagregadas por simulación hidrológica. En la tabla resumen se representan los valores característicos de la regresión lineal efectuada para el análisis comparativo.

Tabla 18. Resultados del ajuste de los caudales ecológicos anuales por métodos de media móvil a partir de series observadas (AFORO) y simuladas (SIMPA)

Método	QBM			QMM25		
Parámetro	R2	m	q0	R2	m	q0
2060 Cebrones del Río	0.16	0.60	10.73	0.18	0.46	8.81
2076 Las Omañas	0.53	0.74	1.01	0.92	0.98	0.29
2083 La Garandilla	0.37	0.76	1.14	0.44	0.78	0.66
2089 Morla de la Valderia	0.64	1.02	0.50	0.83	1.17	0.37

Los resultados son muy malos sobre todo para las estaciones 2060 y 2083 en donde se tienen coeficientes de correlación muy bajos siendo todos inferiores a 0.50, las pendientes de los ajustes tienen valores alejados de la unidad y ordenadas al origen con resultados pésimos como los obtenidos en Cebrones del Río de 10.73 y 8.81 para el ajuste del QBM y QMM25, respectivamente.

Para las restantes estaciones se obtienen buenos resultados en donde resaltan los ajustes conseguidos para el caudal ecológico calculado por el método de la media móvil de orden 25, como por ejemplo para Las Omañas se obtuvo un valor de R^2 de 0.92, una pendiente de 0.98 y un q_0 de 0.29 demostrando un muy buen ajuste.

8. CAUDALES MÍNIMOS ECOLÓGICOS: RESUMEN DE RESULTADOS

Se presenta la recopilación de los resultados obtenidos en el cálculo de caudales ecológicos para todas las series analizadas. En las tablas siguientes se presenta un resumen de los resultados más destacados, tanto a partir de las series originales registradas en las estaciones de aforo como a partir de las series hidrológicas simuladas.

En cada tabla figuran los valores de los caudales ecológicos obtenidos en el cálculo por los métodos del caudal básico de mantenimiento, la media móvil de 25 días y el método de cuantiles por periodos, para cuantiles de 85%, 90% y 95% de probabilidad de superación. Se presentan en primer lugar los resultados obtenidos considerando la totalidad de la serie disponible.

8.1 Caudales ecológicos considerando toda la serie disponible

Tabla 19. Caudales ecológicos (m³/s) calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo considerando toda la serie disponible

Denominación	QBM	MM25	Cuantil 85		Cuantil 90		Cuantil 95	
			Húm.	Seco	Húm.	Seco	Húm.	Seco
2060 Cebrones del Rio	3.72	5.09	7.29	3.55	6.02	3.05	4.59	2.45
2076 Omañas	1.55	1.46	3.37	0.62	2.51	0.44	1.60	0.30
2083 La Garandilla	0.91	1.10	2.85	0.70	1.95	0.56	1.47	0.14
2089 Morla de la Valderia	0.79	0.64	1.19	0.46	0.95	0.33	0.67	0.14

Tabla 20. Caudales ecológicos (m³/s) calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA considerando toda la serie disponible

Denominación	QBM	MM25	Cuantil 85		Cuantil 90		Cuantil 95	
			Húm.	Seco	Húm.	Seco	Húm.	Seco
48	17.08	15.90	23.77	11.72	20.35	10.58	16.59	9.32
64	4.31	4.06	6.18	1.53	4.94	1.20	3.71	0.77
172	1.34	1.16	1.98	0.89	1.61	0.80	1.26	0.64

Si se comparan los valores de caudales ecológicos se observa que en todos los casos los calculados a partir de las series simuladas son mayores que a los derivados de las series aforadas en las estaciones.

Esta sobreestimación de los caudales ecológicos respecto a los calculados a partir de las series diarias aforadas se debe principalmente a tres motivos.

En primer lugar, a que como se ha visto en el *análisis de la representatividad de las series* los caudales dados por el modelo SIMPA tienden a ser superiores a los registrados en las estaciones de aforo, sobre todo en los caudales mínimos, por la importancia que le otorga el modelo al ajuste de los valores altos de caudal y a los volúmenes totales anuales para la evaluación de los recursos disponibles en el proceso de planificación hidrológica.

En segundo lugar, a que al utilizar una desagregación diaria con reparto constante se obtienen valores mayores de caudales ecológicos que los que se logran con los datos diarios reales, como se pudo comprobar en el apartado de la comparación de caudales ecológicos calculados con los datos diarios originales y los estimados a partir del reparto.

En tercer lugar, a que las series de SIMPA cuentan con datos desde el año hidrológico 1940/41 mientras que las series de las estaciones de aforo empiezan más tarde 1977/78, 1961/62, 1969/70 y 1941/42 para las estaciones EA 2060, EA 2076, EA 2083 y EA 2089, respectivamente. Esta situación causa que al tener las series de SIMPA datos desde 1940/41 cuenten con registros en años más húmedos como se puede comprobar en el *Inventario de recursos hídricos del Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero* en donde se percibe que las aportaciones medias en la serie larga (1940/41 – 2005/06) son superiores a las propias de la serie corta (1980/81 – 2005/06) lo que indica que las aportaciones medias son superiores en el periodo de 1940/41 a 1980/81 respecto al de 1980/81 a 2005/06. Esto provoca que los caudales sean superiores para las series de SIMPA y finalmente se obtengan valores mayores en los caudales ecológicos.

8.2 Caudales ecológicos considerando la serie desde 1980-81

A continuación, se presentan los resultados obtenidos considerando únicamente la serie a partir del año hidrológico 1980/81.

Tabla 21. Caudales ecológicos (m³/s) calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo considerando la serie desde 1980-81

Denominación	QBM	MM25	Cuantil 85		Cuantil 90		Cuantil 95	
			Húm.	Seco	Húm.	Seco	Húm.	Seco
2060 Cebrones del Río	3.62	5.11	7.43	3.50	6.30	2.88	4.99	2.16
2076 Las Omañas	2.17	2.23	4.06	1.30	2.96	1.01	1.72	0.63
2089 Morla de la Valdería	0.71	0.61	1.08	0.50	0.84	0.47	0.64	0.40

Tabla 22. Caudales ecológicos (m³/s) calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA considerando la serie desde 1980-81

Denominación	QBM	MM25	Cuantil 85		Cuantil 90		Cuantil 95	
			Húm.	Seco	Húm.	Seco	Húm.	Seco
48	12.73	11.22	19.67	9.71	17.58	9.32	15.18	8.87
64	2.71	2.46	4.75	1.36	4.06	1.13	2.89	0.83
172	1.25	1.07	1.80	0.90	1.45	0.83	1.15	0.72

No se presentaron valores de caudales ecológicos para la estación EA 2083 La Garandilla por contar con registros hasta el año hidrológico 1988/89 por lo que la serie desde 1980/81 sería solo de 9 años, situación que incumpliría lo establecido en la Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre (BOE de 22 de septiembre), en donde la Instrucción de Planificación Hidrológica especifica la metodología a aplicar para la determinación del régimen de caudales mínimos por métodos hidrológicos, expresando lo siguiente : *Estos criterios se aplicarán sobre una serie hidrológica representativa de al menos 20 años, preferentemente consecutivos, que presente una alternancia equilibrada entre años secos y húmedos (Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre).*

Para las series de las estaciones EA 2060 Cebrones del Río y EA 2089 Morla de la Valdería se tomaron los valores de la denominada serie corta (1980/81 – 2005/06) en donde se puede ver que los resultados de los caudales mínimos ecológicos obtenidos son muy similares, para todos los métodos, a los conseguidos con la totalidad de la serie disponible.

Por otra parte, en la estación EA 2076 Las Omañas no se alcanzó a tener registros suficientes para llegar a la serie corta, donde únicamente se obtuvieron registros del año hidrológico 1980/81 al 1999/2000 cumpliendo por la mínima el llegar a tener los 20 años de registros que ordena la Instrucción. En esta última estación los resultados de los caudales mínimos ecológicos fueron superiores para la serie con datos desde 1980-81 que los calculados con la totalidad de la serie disponible (1961/62 – 1999/2000).

Por otra parte, las series simuladas mediante el modelo SIMPA sí llegan a formar la denominada serie corta por lo que es posible comparar los resultados de los caudales ecológicos que se obtienen con la serie larga y corta.

Se consiguen valores menores de los caudales ecológicos tanto por los métodos de variables de centralización móviles (QBM y QMM25) como por el método de cuantiles por periodos para la serie corta. Para este último método de cálculo de caudal ecológico se ve que no existe mucha diferencia en los valores propios del periodo seco para las series largas y cortas. Mientras que para el periodo húmedo toman valores más diferentes dependiendo de si se calculan con la serie larga o corta.

La masa de agua que sufre menos cambio en sus valores de caudales ecológicos calculados mediante la serie larga o corta es la masa 172 del Río Eria. En esta se obtienen valores muy similares, por ejemplo, de 1.34 m³/s de caudal básico de mantenimiento para la serie larga y de 1.25 m³/s para la serie corta. El caudal ecológico por el método de la media móvil de 25 días que se alcanza es de 1.16 m³/s y 1.07 m³/s con la serie larga y corta, respectivamente. Por otro lado los caudales ecológicos por el método de cuantiles por periodos obtienen valores superiores en los periodos húmedos para la serie larga mientras que en la serie corta se obtienen valores superiores para los periodos secos.

Se ha visto ya los caudales ecológicos resultantes para las estaciones de aforo con los datos diarios observados y las masas de agua con las series simuladas tanto para toda la serie disponible como con la serie desde 1980-81 para todos los métodos hidrológicos usados en este trabajo, salvo el método de percentiles de la curva de caudales por una clasificación mensual.

8.3 Caudales ecológicos por el método de percentiles de la curva de caudales por una clasificación mensual

A continuación, se muestran las tablas resumen con los valores mensuales del caudal ecológico Q85M, Q90M y Q95M para las estaciones de aforo y masas de agua del presente trabajo. Se exponen en primer lugar las correspondientes a las estaciones de aforo considerando la totalidad de la serie disponible.

Tabla 23. Caudales ecológicos (m³/s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2060 Cebrones del Río considerando toda la serie disponible

Método	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
85 M	4.31	6.85	8.71	10.06	12.00	12.70	9.37	7.57	4.76	3.90	3.45	3.30
90 M	3.71	5.71	8.31	9.18	9.82	10.30	7.72	6.35	4.06	3.40	3.05	2.78
95 M	3.30	4.20	7.72	8.04	7.97	5.78	6.22	5.27	3.26	2.80	2.36	2.36

Tabla 24. Caudales ecológicos (m³/s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2076 Las Omañas considerando toda la serie disponible

Método	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
85 M	1.20	2.12	3.60	4.80	6.01	7.70	7.40	5.58	2.92	0.93	0.40	0.62
90 M	0.89	1.58	2.96	3.92	4.93	6.34	6.72	4.54	2.26	0.75	0.30	0.50
95 M	0.71	1.01	2.30	3.10	4.47	4.47	5.27	3.50	1.69	0.44	0.22	0.37

Tabla 25. Caudales ecológicos (m³/s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2083 La Garandilla considerando toda la serie disponible

Método	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
85 M	1.11	1.52	2.73	3.49	7.02	8.44	7.50	5.00	2.85	1.69	0.35	0.70
90 M	0.92	1.36	2.21	2.98	5.56	7.75	7.18	4.57	2.48	1.25	0.07	0.63
95 M	0.63	1.14	1.69	2.55	4.89	6.95	6.74	3.87	2.09	0.70	0.00	0.42

Tabla 26. Caudales ecológicos (m³/s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2089 Morla de la Valdería considerando toda la serie disponible

Método	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
85 M	0.55	0.84	1.12	1.60	1.79	2.05	2.28	2.14	1.33	0.59	0.38	0.40
90 M	0.47	0.76	0.95	1.27	1.44	1.55	1.82	1.67	1.15	0.50	0.22	0.25
95 M	0.18	0.54	0.68	0.97	1.06	1.23	1.21	1.29	0.95	0.33	0.13	0.14

Se observa que los meses con los caudales ecológicos más altos son los de diciembre, enero, febrero, marzo y abril mientras que los que presentan los valores mínimos son los del periodo seco en agosto y septiembre.

Como es de esperarse los valores más altos son los correspondientes al percentil 85% y van disminuyendo conforme sube el porcentaje de superación de los valores de la serie. Es decir, los caudales ecológicos calculados para el percentil 90% son menores que los del percentil 85% y a su vez los calculados para el percentil 95% resultan menores a los del percentil 90%.

A continuación, se exponen las tablas correspondientes a las masas de agua con series simuladas por SIMPA considerando la totalidad de la serie disponible.

Tabla 27. Caudales ecológicos (m³/s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA en la masa de agua 48 Río Órbigo considerando toda la serie disponible

Método	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
85 M	12.98	19.44	26.24	27.59	29.82	36.70	30.08	27.45	20.55	13.43	10.27	10.89
90 M	11.95	17.86	22.46	24.70	28.60	34.02	28.26	26.37	15.90	12.15	9.49	10.19
95 M	11.43	16.59	19.05	22.22	20.47	30.54	25.51	23.28	15.47	11.76	8.87	9.06

Tabla 28. Caudales ecológicos (m³/s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA en la masa de agua 64 Río Omañas considerando toda la serie disponible

Método	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
85 M	2.19	4.43	6.58	7.82	9.35	10.02	8.11	6.72	4.36	2.75	1.24	1.38
90 M	1.77	3.73	5.98	7.54	6.91	8.19	7.51	6.18	3.79	1.73	0.83	1.17
95 M	1.41	2.53	4.10	5.19	5.05	6.51	6.80	5.32	2.98	1.36	0.68	1.05

Tabla 29. Caudales ecológicos (m³/s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA en la masa de agua 172 Río Eria considerando toda la serie disponible

Método	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
85 M	0.96	1.77	1.79	2.70	3.42	3.99	3.74	3.14	2.01	1.04	0.74	0.89
90 M	0.92	1.60	1.54	2.38	2.07	2.39	2.81	2.55	1.75	1.02	0.66	0.77
95 M	0.78	1.14	1.26	1.80	1.45	1.79	1.65	2.05	1.41	0.83	0.60	0.64

Los cambios en los valores de los caudales ecológicos en los meses del periodo seco (julio, agosto y septiembre) para diferentes percentiles son menores ya que son muy parecidos para los tres percentiles donde esta situación sucede más en las masas de agua con código 48 y 172.

A continuación, se exponen las tablas correspondientes a las estaciones de aforo considerando la serie desde el año hidrológico 1980-81.

Tabla 30. Caudales ecológicos (m³/s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2060 Cebrones del Río considerando la serie desde 1980-81

Método	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
85 M	4.78	7.64	9.21	12.66	12.97	13.00	8.89	7.19	4.62	3.88	3.30	3.34
90 M	4.09	6.84	8.37	10.08	10.47	10.40	7.30	6.30	3.98	3.17	2.80	2.62
95 M	3.48	5.71	7.86	8.63	8.37	6.56	5.47	5.37	2.96	2.35	2.05	2.16

Tabla 31. Caudales ecológicos (m³/s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2076 Las Omañas considerando la serie desde 1980-81

Método	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
85 M	1.42	3.37	4.90	5.72	4.93	5.34	6.63	5.42	2.96	1.60	1.30	1.01
90 M	1.28	2.55	3.56	4.72	4.54	4.47	6.00	4.47	2.04	1.21	1.01	0.69
95 M	0.88	1.13	2.96	3.16	3.88	3.00	4.89	3.00	1.11	1.02	0.54	0.56

Tabla 32. Caudales ecológicos (m³/s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de los datos diarios medidos en la estación de aforo 2089 Morla de la Valdería considerando la serie desde 1980-81

Método	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
85 M	0.61	0.80	1.14	1.30	1.31	1.61	2.11	1.86	1.28	0.61	0.49	0.49
90 M	0.55	0.60	0.90	1.17	0.99	1.34	1.18	1.65	1.16	0.54	0.45	0.43
95 M	0.48	0.56	0.68	0.97	0.74	1.08	0.82	1.34	0.97	0.47	0.38	0.40

Los resultados para las estaciones de aforo considerando la serie desde 1980-81 son muy similares a los obtenidos con la totalidad de la serie. También se ve que los valores en la mayoría de los meses llegan a ser superiores con la serie más corta (desde 1980-81).

A continuación, se exponen las tablas correspondientes a las masas de agua con series simuladas por SIMPA considerando la serie desde el año hidrológico 1980-81.

Tabla 33. Caudales ecológicos (m³/s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA en la masa de agua 48 Río Órbigo considerando la serie desde 1980-81

Método	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
85 M	11.95	17.86	22.46	23.67	20.47	31.38	25.51	24.67	15.72	12.14	9.46	9.07
90 M	11.43	17.59	18.75	22.22	18.59	30.54	25.37	21.96	15.63	11.26	9.32	9.06
95 M	9.46	15.86	17.98	20.13	18.45	19.12	20.25	20.62	15.18	10.58	8.87	8.20

Tabla 34. Caudales ecológicos (m³/s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA en la masa de agua 64 Río Omañas considerando la serie desde 1980-81

Método	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
85 M	1.77	4.43	5.98	5.90	5.05	6.51	7.28	5.32	2.98	1.70	1.24	1.15
90 M	1.67	3.73	4.36	5.19	4.95	6.51	5.90	4.91	2.89	1.36	1.11	1.13
95 M	1.41	3.43	4.10	4.33	4.94	4.10	5.53	4.28	1.89	1.10	0.83	1.05

Tabla 35. Caudales ecológicos (m³/s) por el método de percentiles con clasificación mensual calculados a partir de las series simuladas mediante el modelo SIMPA en la masa de agua 172 Río Eria considerando la serie desde 1980-81

Método	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
85 M	0.96	1.70	1.79	1.94	2.04	2.39	2.81	2.55	1.98	1.03	0.80	0.89
90 M	0.92	1.60	1.33	1.80	1.45	2.19	1.65	2.15	1.49	1.03	0.72	0.82
95 M	0.90	1.04	1.26	1.45	1.30	1.61	1.49	2.05	1.41	1.02	0.72	0.77

Los caudales ecológicos conseguidos con la serie corta son inferiores a los logrados con la serie larga por el método de percentiles con clasificación mensual para las masas de agua estudiadas en el trabajo. Se ve que esta situación es

diferente a los resultados obtenidos para las estaciones de aforo con los datos diarios reales en donde los caudales ecológicos con la serie desde 1980-81 brindaban datos ligeramente superiores a los logrados con la totalidad de la serie.

9. ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE CUMPLIMIENTO DE LOS CAUDALES ECOLÓGICOS

Se ha comprobado que los métodos hidrológicos de cálculo de caudales ecológicos usados en este trabajo y previstos en la Instrucción de Planificación brindan resultados muy dispersos, por ello es necesario realizar un análisis que permita seleccionar el método más apropiado y fijar sus criterios de cálculo.

Uno de los factores determinantes es la frecuencia con la que la serie en régimen natural incumple los umbrales de caudales ecológicos que resultan en el cálculo (Garrote, 2010) donde la normativa española, precisa que el incumplimiento de los caudales ambientales debe ser considerado una situación excepcional.

En la Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre (BOE de 22 de septiembre), la Instrucción de Planificación Hidrológica en el apartado 3.3 Prioridad y compatibilidad de usos establece que el plan hidrológico contendrá los criterios de prioridad y de compatibilidad de usos que deben aplicarse en los distintos territorios de la demarcación hidrográfica. En relación con tales criterios, y para toda la demarcación hidrográfica, se establecerán por sistemas de explotación los órdenes de preferencia entre los distintos usos y aprovechamientos.

Los caudales ecológicos o demandas ambientales no tendrán el carácter de uso, debiendo considerarse como una restricción que se impone con carácter general a los sistemas de explotación. En todo caso, se aplicará también a los caudales medioambientales la regla sobre supremacía del uso para abastecimiento de poblaciones recogida en el TRLA (Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre).

Por lo tanto, los caudales ecológicos se deben cumplir en la medida de lo posible donde se consideran como una restricción que se impone a los sistemas de explotación. Debido a esta circunstancia, se espera que el incumplimiento de los caudales ecológicos se produzca únicamente en situaciones excepcionales, que no deben ser muy frecuentes. Resulta lógico que el procedimiento de determinación de los caudales ecológicos debe llevar a la obtención de unos valores que sean superados por la serie en régimen natural, en donde las situaciones en las que los caudales naturales sean inferiores a los caudales ecológicos sean las excepciones.

Por este motivo se busca realizar un análisis que sea capaz de medir el grado de incumplimiento de los caudales ecológicos en las series naturales. Un análisis que resuelve esta cuestión es el análisis de las garantías, los cuales son muy utilizados en los planes hidrológicos. Uno de estos análisis es el de la garantía volumétrica, definida como la fracción de la demanda total que se satisface durante el periodo de cálculo (CHDuero, 2015), siendo muy utilizada para la valoración de los usos consuntivos. De estas garantías se tienen criterios bien marcados por la IPH para la determinación de los niveles de garantía, sobre todo, para las demandas agrarias y urbanas.

Se ha visto anteriormente, que los planes hidrológicos no consideran a los caudales ecológicos como un uso, sino como una restricción al sistema de explotación. Por ello no es muy habitual medir sus garantías y también porque, estrictamente hablando, éstas deben ser siempre cumplidas en su totalidad. Sin embargo, la determinación de sus garantías es posible ya que se puede tratar a los caudales ecológicos como unas demandas ambientales, siendo más habituales y útiles las garantías en tiempo.

Por ello, se ha efectuado un análisis de las garantías en tiempo por años a escala diaria, que podría definirse como el porcentaje de días en el año que cumple con tener caudales naturales superiores a los ecológicos. Dicho análisis se ha efectuado para cada caudal ecológico conseguido por los diferentes métodos de cálculo.

9.1 Análisis del porcentaje de cumplimiento de los caudales ecológicos considerando toda la serie disponible

Se comienzan presentando los gráficos de las garantías que se obtienen en las estaciones de aforo con los caudales ecológicos calculados a partir de las series observadas con la totalidad de la serie. Como ilustración se presentan los gráficos correspondientes a las estaciones de aforos EA 2060 en Cebrones del Río y EA2083 La Garandilla. En el Anexo 15 se presentan con detalle los resultados obtenidos en las demás estaciones.

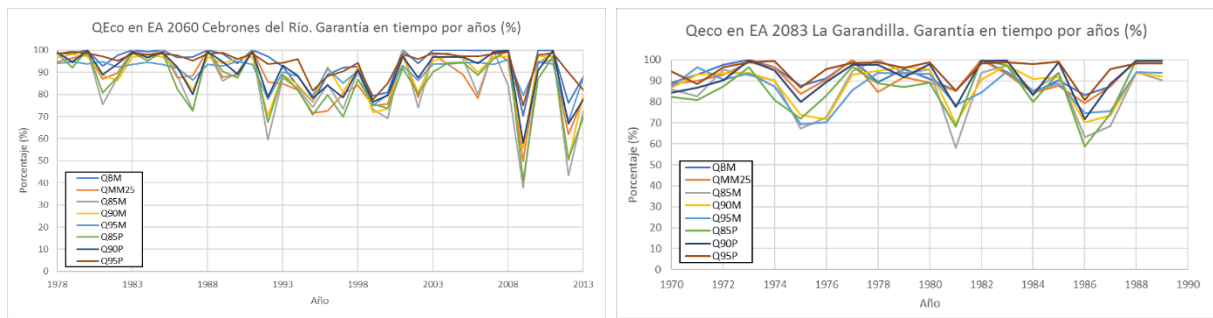


Figura 39. Gráficos anuales de garantía de los caudales ecológicos calculados para los datos diarios medidos en la estación de aforo Cebrones del Río (Izquierda) y La Garandilla (derecha)

En los gráficos se aprecia que hay incumplimientos en la práctica totalidad de los años de la serie analizada, llegando a ser superiores al 40% y 60% del tiempo en un año para las estaciones EA 2060 y EA 2083, respectivamente. Sin embargo, en general, se obtienen garantías mayores a 80%.

Los valores mínimos de cumplimiento de garantía, para ambas estaciones, son los determinados por el método del caudal Q85M. Las garantías más satisfactorias se obtienen para los métodos del caudal básico de mantenimiento (QBM) y el del cuantil 95 por periodos (Q95P).

Ahora para las mismas estaciones de aforo se efectuará un análisis de las garantías en tiempo por años a escala diaria, pero con los datos de caudales ecológicos obtenidos con las series simuladas por el modelo SIMPA desagregadas a escala diaria de los emplazamientos más cercanos a las estaciones de aforo usadas en el presente trabajo. Para la determinación de dichos caudales ecológicos hay que tener en cuenta que se deben calcular para el periodo de serie simulada que coincida con la misma duración, comienzo y fin de la serie natural. Lo anterior, debido a que el cumplimiento de los caudales ecológicos se determinará con base a la serie natural de la estación de aforo. Por ejemplo, para la estación EA 2060 (que cuenta con datos de 1977/88 – 2012/13) se determinó el caudal ecológico con la serie simulada en 48 Río Órbigo (que cuenta con datos de 1940/41 – 2005/06) con el periodo de 1977/88 – 2005/06, para finalmente calcular las garantías en la serie natural con el mismo periodo de análisis.

Se muestran los gráficos de las garantías que se obtienen en las estaciones de aforo con los caudales ecológicos calculados a partir de series simuladas contando con el periodo máximo posible de coincidencia con la serie natural. Como ilustración se presentan los gráficos correspondientes a las estaciones de aforos EA 2060 en

Cebrones del Río y EA2083 La Garandilla. En el Anexo 16 se presentan con detalle los resultados obtenidos en las demás estaciones.

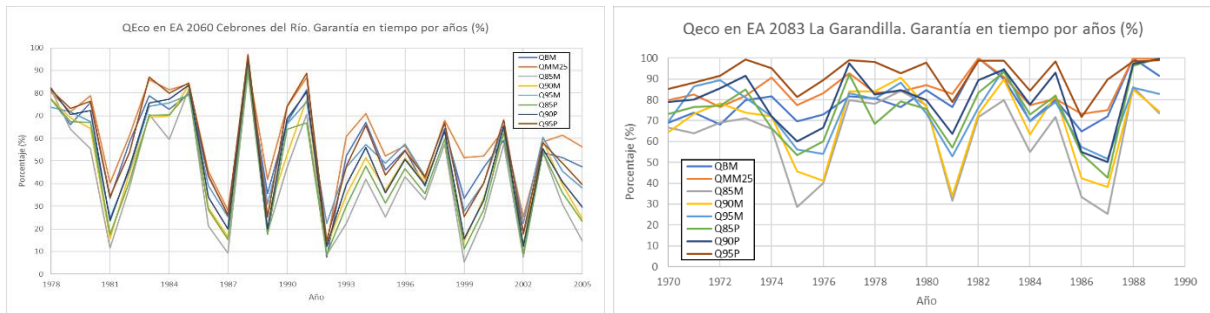


Figura 40. Gráficos anuales de garantía de los caudales ecológicos calculados por series simuladas mediante el modelo SIMPA en la estación de aforo Cebrones del Río (Izquierda) y La Garandilla (derecha)

Los porcentajes de cumplimiento en Cebrones del Río son pésimos, con valores llegando incluso a 10%, con incumplimientos en la totalidad de los años de la serie analizada y con unas garantías de media de 50%. Este resultado es congruente con lo que se ha visto a lo largo del trabajo en el que se advirtió, en el *análisis de la representatividad de las series*, que existe una gran diferencia entre las series de la estación de aforo EA 2060 Cebrones del Río y la propia de la masa de agua con código 48 en el Río Órbigo.

La situación anterior resulta extraña ya que en el mismo Plan Hidrológico del Duero se usa la serie de la estación EA 2060 para comparar los caudales ecológicos calculados para la masa de agua 48, justificando que dicha estación de aforo se encuentra a 18.46 km del final de la masa de agua.

Otro aspecto que sustenta las bajas garantías alcanzadas es que, en el estudio de la comparación de los caudales ecológicos, obtenidos por las series simuladas y las observadas, se vio que dichos caudales para la estación EA 2060 y la masa de agua 48 conseguían valores muy diferentes. Lo anterior, se veía reflejado en ajustes muy pobres entre dichos valores dando regresiones muy dispersas y con baja correlación.

Por otra parte, las garantías en EA 2083 La Garandilla presentan mejores resultados en donde casi en la totalidad de los años son superiores al 70%. El gráfico presenta unos tres ciclos muy marcados con bajos valores de porcentajes de cumplimiento. En términos generales se podría decir que, viniendo los caudales ecológicos de una serie simulada, se obtienen buenos valores de garantías.

Como resumen, se presentan las tablas con las garantías en tiempo obtenidas para todas las estaciones de aforo analizadas para todos los años disponibles.

Tabla 36. Resultados de garantía (%) en tiempo del caudal ecológico considerando todos los años disponibles para las series diarias observadas

Serie	QBM	QMM25	Q85M	Q90M	Q95M	Q85P	Q90P	Q95P
EA 2060 Cebrones del Río	94.03	87.21	85.09	88.35	89.71	85.06	89.94	94.32
EA 2076 Las Omañas	86.36	86.79	85.45	88.15	87.61	85.19	90.61	94.66
EA 2083 La Garandilla	92.84	91.25	85.82	87.70	86.62	85.89	91.48	95.30
EA 2089 Morla de la Valderia	83.37	88.48	85.16	87.58	88.04	85.07	90.40	95.05

Tabla 37. Resultados de garantía (%) en tiempo del caudal ecológico considerando todos los años en coincidencia disponibles para las series simuladas mediante el modelo SIMPA

Serie	QBM	QMM25	Q85M	Q90M	Q95M	Q85P	Q90P	Q95P
EA 2060 Cebrones del Río	54.52	60.21	40.90	47.40	53.12	44.96	50.00	55.73
EA 2076 Las Omañas	77.90	79.28	74.32	79.52	82.72	74.00	79.92	88.27
EA 2083 La Garandilla	79.21	85.01	62.68	68.40	74.22	74.48	79.99	91.81
EA 2089 Morla de la Valderia	67.57	73.23	62.25	70.90	78.16	66.42	72.38	81.13

Las garantías para las estaciones de aforo calculadas con los caudales ecológicos obtenidos con la totalidad de las series diarias observadas son las que presentan mejores resultados, en donde se ve que las garantías más altas son las correspondientes a las obtenidas para los métodos de cuantiles por periodos Q95P y Q90P y para el método del caudal básico de mantenimiento. Además, se aprecia que las garantías para estas estaciones rondan de media los 88 y 89%, que se puede traducir, por término medio, en que el 11% del tiempo el sistema se halla en situación de excepcionalidad, al encontrarse por debajo de los caudales ecológicos.

En contraste las garantías calculadas con los caudales ecológicos derivados de las series simuladas presentan valores muy bajos, especialmente en Cebrones del Río donde se tiene un valor de garantía media del 51%. Las demás series presentan valores por encima de 70%, como en La Garandilla o en Las Omañas que cuentan con garantías medias de 77 y 79.5%, respectivamente. En estas series se sigue cumpliendo que las mejores garantías se obtienen para un caudal ecológico de Q95P. Lo que cambia, respecto a las primeras series, es que en esta se consiguen mejores resultados para las garantías calculadas con el caudal ecológico de la media móvil de orden 25, situación que en las primeras series era con el caudal básico de mantenimiento.

9.2 Análisis del porcentaje de cumplimiento de los caudales ecológicos considerando la serie desde 1980-81

De tal forma, ya se ha determinado las garantías considerando la totalidad de las series disponibles. Ahora falta analizarlas, al igual que se hizo en la comparación de caudales ecológicos, considerando la serie desde 1980-81. Se ha efectuado un análisis de las garantías que se consiguen en las estaciones de aforo con los caudales ecológicos calculados a partir de las series observadas desde 1980-81. Como ilustración se presentan los gráficos correspondientes a las estaciones de aforos EA 2076 en Las Omañas y EA 2089 en Morla de la Valdería. En el Anexo 17 se presenta con detalle el resultado de la estación restante.

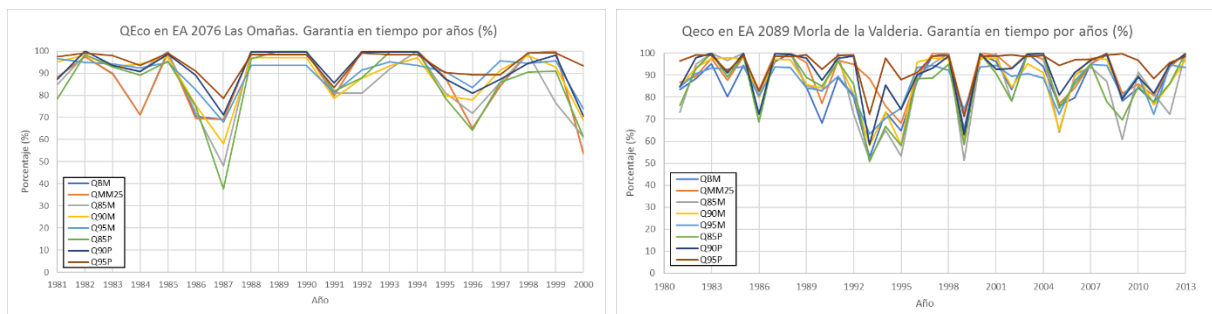


Figura 41. Gráficos anuales de garantía de los caudales ecológicos calculados para los datos diarios medidos en la estación de aforo Las Omañas (Izquierda) y Morla de la Valdería (derecha) desde 1980-81

En el gráfico de la estación de aforo Las Omañas se ve que en general se obtienen siempre garantías por encima del 80%, pero en el año hidrológico 1986/87 estas garantías descienden tomando valores incluso inferiores al 50% para los caudales ecológicos Q85M y Q85P. Por otro lado, en el gráfico de la estación Morla de la Valdería se presentan más oscilaciones, pero en general se mantienen por encima del 70% de cumplimiento.

En seguida se efectuará un análisis de las garantías en tiempo por años a escala diaria, pero con los datos de caudales ecológicos obtenidos con las series simuladas por el modelo SIMPA desagregadas a escala diaria de los emplazamientos más cercanos a las estaciones de aforo usadas. Al igual que como se ha hecho anteriormente, se tiene en cuenta que se deben calcular para el periodo de serie simulada que coincida con la misma duración, comienzo y fin de la serie natural. Se muestran los gráficos de las garantías que se obtienen en las estaciones de aforo con los caudales ecológicos calculados a partir de series simuladas contando con el periodo máximo posible de coincidencia con la serie natural desde 1980-81. Como

ilustración se presentan los gráficos correspondientes a las estaciones de aforo EA 2076 Las Omañas y EA 2089 Morla de la Valdería. En el Anexo 18 se presenta con detalle el resultado de la estación restante.

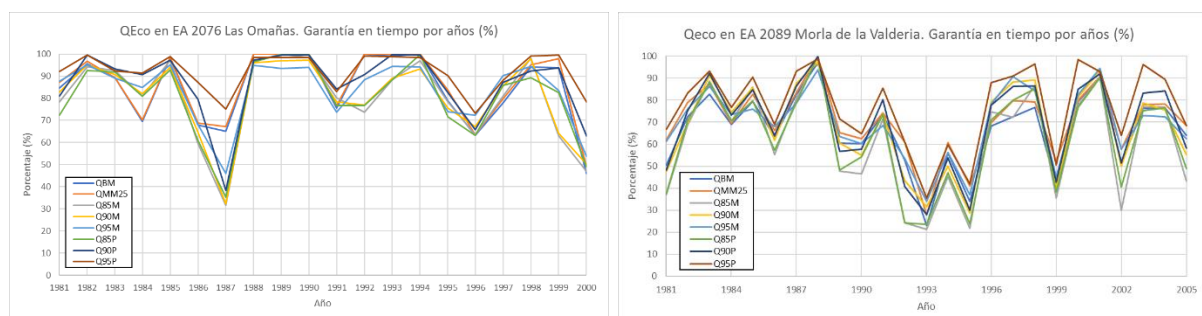


Figura 42. Gráficos anuales de garantía de los caudales ecológicos calculados por series simuladas mediante el modelo SIMPA en la estación de aforo Las Omañas (Izquierda) y Morla de la Valdería (derecha) desde 1980-81

El comportamiento en la estación de aforo Las Omañas es muy similar al que se obtuvo tomando los caudales ecológicos de la serie aforada, lo cual supone que los caudales ecológicos para las series (aforada y simulada) desde 1980/81 son muy parecidos. Esta condición se pudo comprobar en el apartado *Comparación de caudales ecológicos: serie-aforo* donde se vio que para el periodo 1980/81 – 1999/2000 se obtenían muy buenos ajustes entre los caudales ecológicos, principalmente para los calculados por los métodos de percentiles de la curva de caudales clasificados y el método de la media móvil de orden 25.

En la estación Morla de la Valdería se tienen garantías muy malas que incluso en algunos años se acercan a valores del 20%. El gráfico obtiene un comportamiento con oscilaciones que hace que con mucha frecuencia se incumplan sobremanera los caudales mínimos.

Como resumen, se presentan las tablas con las garantías en tiempo obtenidas para las estaciones de aforo analizadas para las series a partir del año 1980-81.

Tabla 38. Resultados de garantía (%) en tiempo del caudal ecológico considerando la serie desde 1980-81 para los datos diarios observadas

Serie	QBM	QMM25	Q85M	Q90M	Q95M	Q85P	Q90P	Q95P
EA 2060 Cebrones del Río	93.57	86.52	85.04	88.20	89.70	85.00	89.97	94.29
EA 2076 Las Omañas	87.78	87.70	85.81	88.34	89.90	85.16	91.53	94.58
EA 2089 Morla de la Valderia	86.04	90.63	85.09	87.27	86.71	85.19	90.57	94.95

Tabla 39. Resultados de garantía (%) en tiempo del caudal ecológico considerando todos los años en coincidencia disponibles para las series simuladas mediante el modelo SIMPA desde 1980-81

Serie	QBM	QMM25	Q85M	Q90M	Q95M	Q85P	Q90P	Q95P
EA 2060 Cebrones del Río	52.47	57.99	39.18	44.22	50.88	41.90	46.99	52.94
EA 2076 Las Omañas	84.97	86.18	79.96	80.49	83.37	80.29	86.68	91.97
EA 2089 Morla de la Valderia	66.19	70.29	61.22	67.59	69.07	62.41	68.77	77.06

De los datos desde 1980-81 se aprecia que las series analizadas con los caudales ecológicos calculados a partir de datos diarios observados consiguen garantías aceptables, cumpliendo de media con el 89% de días al año.

Por otro lado, las obtenidas con los caudales ecológicos medidos a partir de datos simulados presentan valores más bajos, especialmente en EA 2060 Cebrones del Río. Sin embargo, con los caudales ecológicos derivados de la serie simulada en la masa de agua con código 64 Río Omañas se obtuvieron buenas garantías en la estación de aforo EA 2076 Las Omañas. Los porcentajes de cumplimiento obtuvieron de media un valor de 84.2%. Lo cual, viniendo de caudales ecológicos calculados con series simuladas, se considera como bueno.

No se expusieron las garantías para la estación EA 2083 debido a que como la estación sólo cuenta con datos de 1969/70 a 1988/89, haría que para la serie desde 1980/81 se contarán con únicamente 9 años de registros. La anterior situación haría que para las garantías con los datos aforados se analizarán únicamente 9 años, lo cual sería muy poco. El análisis con los caudales ecológicos calculados con los datos simulados implicaría que éstos se calcularían con sólo 9 años, situación que no es aconsejable ya que para que se empleen los criterios de cálculo de caudales ecológicos se deben aplicar a una serie hidrológica representativa de al menos 20 años (ORDEN ARM/2656/2008, DE 10 DE SEPTIEMBRE).

Por último, se ha de destacar que los mejores valores de garantías en las estaciones de aforo obtenidos con los caudales ecológicos calculados a partir de datos simulados son los de la estación de aforo EA 2076 en Las Omañas, donde tanto para la serie completa como para la serie desde 1980-81 se consiguieron

valores aceptables de las garantías, consiguiendo valores medios con la serie completa de 79.5% y de 84.2% con la serie desde 1980-81.

10. RESUMEN Y CONCLUSIONES

10.1 Resumen

En el trabajo se trazó como objetivo determinar el régimen de caudales mínimos, mediante la aplicación de métodos hidrológicos propuestos en la Instrucción de Planificación, en cauces del sistema de explotación del río Órbigo. Para la obtención de estos caudales mínimos ambientales lo ideal sería contar con series diarias de caudales en régimen natural con la mayor cantidad de años posible, siendo siempre necesario contar con al menos 20 años consecutivos. Sin embargo, muchos ríos de esta cuenca, y de la mayoría de las cuencas españolas, no se encuentran en régimen natural y/o no cuentan con registros de caudales naturales.

Por ello, lo primero que se tuvo que realizar en el estudio fue localizar aquellos cauces que se encuentran en régimen natural dentro del sistema de explotación y con un mínimo de 20 años de registro. A estas estaciones de aforo se les buscó los emplazamientos más próximos con series hidrológicas mensuales a partir de las precipitaciones con el modelo SIMPA. Lo anterior se hizo con la finalidad de realizar diversas comparaciones de los resultados de caudales ecológicos obtenidos a partir de las series aforadas y simuladas, y de esta manera ser capaz de visualizar los resultados logrados y proponer una metodología para conseguir determinar el régimen de caudales mínimos con los datos del modelo SIMPA. En este punto ya se tienen escogidas las estaciones de aforo y sus correspondientes masas de agua codificadas en el Plan Hidrológico del Duero.

El análisis de la representatividad de las series fue el primer estudio comparativo que se efectuó en donde se buscó examinar el parecido que tienen las series procedentes de los datos simulados con los aforados. De este análisis se dedujo que el mejor ajuste entre las series fue para las estaciones de aforo EA 2076 Las Omañas y EA 2089 Morla de la Valderia con las masas de agua 64 río Omañas y 172 río Eria, respectivamente.

En Las Omañas este buen ajuste se da a partir de 1970 hasta el año 2000 ya que en el comienzo del periodo de años coincidentes (1962-1969) se presenta un mayor error en la modelización al no mostrar un paralelismo entre las series.

La serie hidrológica en el río Eria consigue reproducir adecuadamente el comportamiento de la serie observada en EA 2089 Morla de la Valdería para todo el periodo de coincidencia consiguiendo buenas correlaciones entre las series.

La elección de la longitud del periodo fue el siguiente análisis que se efectuó. En éste se realizaron unos gráficos que mostraban los valores que tomaban los caudales ecológicos en función de la longitud del periodo seleccionado. En el análisis se vio que los caudales ecológicos que se obtienen para diferentes duraciones de serie tienden a converger a un cierto valor.

Al principio de los gráficos, en donde se tienen longitudes pequeñas, se mostraban las curvas con oscilaciones, pero mientras las longitudes crecían, las curvas se estabilizaban para finalmente llegar al caudal ecológico que se obtiene con la totalidad de la serie.

Para los métodos basados en los percentiles de la curva de caudales clasificados, se seleccionó como duración mínima de la serie un periodo de 26 años debido a que éste fue un valor en el cual se consiguieron caudales ecológicos muy parecidos a los calculados con la totalidad de la serie. A partir de estos 26 años de duración se nota una estabilidad en los valores de caudales ecológicos, especialmente para las estaciones EA 2060 Cebrones del Río y 2089 Morla de la Valderia. Por otra parte, esta convergencia de los datos de caudales ecológicos, para aquellos calculados por los métodos de variables de centralización móviles, se presentó al usar series de 30 o más años. Por lo tanto, estas fueron las duraciones mínimas elegidas para las cuales se obtendrían buenos resultados de los caudales ecológicos para las estaciones de aforo estudiadas.

Se propusieron dos métodos de repartición diaria a aplicar a los datos mensuales del modelo SIMPA. Con esto se cumple el requisito de trabajar con datos de caudales diarios que exigen los métodos hidrológicos para el cálculo de caudales ecológicos utilizados en el presente proyecto. Estas dos reparticiones fueron una lineal y otra constante.

La elección de la distribución empleada se efectuó por medio de una comparación de los caudales ecológicos obtenidos por las dos reparticiones en las estaciones de aforo en donde se realizó una desagregación a escala diaria partiendo

de las medias mensuales en cada estación de aforo. Paso seguido se obtuvieron los caudales ecológicos para diferentes duraciones y para cada tipo de reparto.

Se llevó a cabo una comparación entre los resultados de caudales ecológicos obtenidos con los repartos y los conseguidos con los datos diarios observados. En el análisis se pudo llegar a la conclusión que la mejor distribución del reparto es la constante debido a que con esta se lograron muy buenos ajustes de los datos de caudales ecológicos en comparación con los alcanzados con los datos diarios observados. Los ajustes para los valores obtenidos con el reparto constante fueron especialmente satisfactorios para los caudales ecológicos calculados por el método de la media móvil de orden 25 en donde para las estaciones EA 2076 y EA 2083 se consiguieron correlaciones perfectas, pendientes del ajuste muy próximas a la unidad y ordenadas al origen muy cercanas a cero.

En los caudales ecológicos obtenidos por los métodos de percentiles de la curva de caudales clasificados a escala mensual los ajustes tanto para el reparto lineal como el constante brindaron valores de R^2 muy similares. La diferencia entre los ajustes de los caudales ecológicos para los diferentes repartos se encontró primordialmente en los valores de las pendientes del ajuste en donde los calculados con el reparto constante consiguieron valores más cercanos a la unidad y por lo tanto estos fueron más parecidos a los reales.

Los caudales clasificados por periodos adquirieron altas correlaciones que se aproximaban a la unidad, con dispersiones muy pequeñas. Además, siguiendo la misma línea que las regresiones de los caudales ecológicos por el método de cuantiles a escala mensual, el reparto constante fue el que logró mejores ajustes con pendientes más próximas a la unidad y resultados más semejantes a los conseguidos con los datos diarios originales.

Se comprobó que el mejor tipo de reparto diario entre los dos propuestos fue el que sigue una distribución constante debido a que con éste se obtuvieron mejores ajustes y resultados. Además, se contempló que utilizando el reparto lineal se obtenían valores de los caudales ecológicos muy superiores a los conseguidos con los datos diarios observados, lo que implicaría que aplicar esta desagregación lineal supondría una sobreestimación de los caudales ecológicos. Un aspecto a resaltar es que como se tiene que hacer una desagregación a todas las series mensuales de

SIMPA resultó beneficioso que el reparto constante fuera el que brindó buenos resultados ya que es un método de distribución muy fácil de emplear.

A las series hidrológicas dadas por el modelo SIMPA se les aplicó la distribución del reparto constante para determinar los caudales ecológicos de las series simuladas. Se realizó una comparación de los valores de los caudales ecológicos obtenidos con la serie simulada y la serie aforada, en donde lo primero que se tuvo que realizar fue ver los periodos en los que se coincide en tener registros para las series de las estaciones de aforo y las series SIMPA.

Los resultados de los ajustes de las comparaciones fueron muy malos para las estaciones EA 2060 y EA 2083 en donde se tuvieron coeficientes de correlación muy bajos, pendientes de ajustes con valores muy alejados de la unidad y ordenadas al origen con resultados muy alejados de cero. Este mal ajuste se dio sobre todo para el caudal básico de mantenimiento, mientras que para el caudal ecológico calculado por el método de la media móvil de orden 25 se consiguieron buenos resultados en donde resaltan los ajustes logrados para las restantes estaciones, EA 2076 Las Omañas y EA 2089 Morla de la Valdería.

En el resumen de los resultados de los caudales mínimos ecológicos se vio que los valores para los calculados a partir de las series simuladas fueron mayores a los derivados de las series aforadas en las estaciones. Esta sobreestimación se debe principalmente a tres motivos. En primer lugar, a que como se vio en el *análisis de la representatividad de las series* los caudales dados por el modelo SIMPA tienden a ser superiores a los registrados en las estaciones de aforo, sobre todo en los caudales mínimos, por la importancia que le otorga el modelo al ajuste de los valores altos de caudal y a los volúmenes totales anuales para la evaluación de los recursos disponibles en el proceso de planificación hidrológica. En segundo lugar, a que al utilizar una desagregación diaria con reparto constante se obtienen valores mayores de caudales ecológicos que los que se logran con los datos diarios reales, como se pudo comprobar en el apartado de la comparación de caudales ecológicos calculados con los datos diarios originales y los estimados a partir del reparto. En tercer lugar, a que las series de SIMPA cuentan con datos desde el año hidrológico 1940/41 mientras que las series de las estaciones de aforo empiezan más tarde, en los años 1977/78, 1961/62, 1969/70 y 1941/42 para las estaciones EA 2060, EA

2076, EA 2083 y EA 2089, respectivamente. Esta situación causa que al tener las series de SIMPA datos desde 1940/41 cuenten con registros en años más húmedos, como se puede comprobar en el *Inventario de recursos hídricos del Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero* en donde se percibe que las aportaciones medias en la serie larga (1940/41 – 2005/06) son superiores a las propias de la serie corta (1980/81 – 2005/06) lo que indica que las aportaciones medias son superiores en el periodo de 1940/41 a 1980/81 respecto al de 1980/81 a 2005/06. Esto provoca que los caudales sean superiores para las series de SIMPA y finalmente se obtengan valores mayores en los caudales ecológicos.

En los resultados obtenidos considerando la serie a partir del año hidrológico 1980-81 se aprecia que los caudales ecológicos para las series de las estaciones EA 2060 y EA 2089 son muy similares, para todos los métodos, a los conseguidos con la totalidad de la serie disponible.

Para las series de las estaciones EA 2060 Cebrones del Río y EA 2089 Morla de la Valdería se utilizaron los valores de la denominada serie corta (1980/81 – 2005/06) en donde se pudo ver que los resultados de los caudales mínimos ecológicos obtenidos fueron muy similares, para todos los métodos, a los conseguidos con la totalidad de la serie disponible. Por otra parte, las series simuladas mediante el modelo SIMPA consiguen valores menores de los caudales ecológicos para la denominada serie corta.

Un punto a destacar es la gran similitud que se consiguió en los valores de caudales ecológicos, por todos los métodos, entre las series aforadas en la estación EA 2076 Las Omañas y las series simuladas en la masa de agua 64 Río Omañas considerando las series desde el año hidrológico 1980-81.

Finalmente se realizó un análisis de las garantías en tiempo de los caudales ecológicos obtenidos con las series aforadas y simuladas, para ver si en las series en régimen natural se cumplían los umbrales de dichos caudales. Además, este análisis resultó necesario para seleccionar el método más apropiado y fijar sus criterios de cálculo.

Se efectuó un análisis de las garantías en tiempo por años a escala diaria para los caudales ecológicos conseguidos por los diferentes métodos hidrológicos de cálculo utilizados en el trabajo.

Primero se midieron las garantías en las estaciones de aforo con los caudales ecológicos calculados a partir de las series observadas con la totalidad de la serie. Se obtuvieron buenos resultados en todas las estaciones de aforo, con una media del 89%, siendo la estación EA 2083 la que consiguió las más altas garantías. Los métodos de cálculo de caudales ecológicos que obtuvieron garantías más satisfactorias se lograron para el caudal básico de mantenimiento (QBM) y el del cuantil 95 por periodos (Q95P).

Lo siguiente fue que para las mismas estaciones de aforo se efectuó un análisis de las garantías, pero con los datos de caudales ecológicos obtenidos con las series simuladas por el modelo SIMPA en los emplazamientos más cercanos a las estaciones de aforo utilizadas en el trabajo. Los resultados que se consiguieron considerando todos los años de coincidencia disponibles fueron para todas las estaciones de aforo superiores al 70% de garantías, salvo a la estación EA 2060 en Cebrones del Río que arrojó unas garantías de media de 50% siendo por lo tanto pésimas. Estas bajas garantías son congruentes con lo que se ha visto a lo largo del trabajo en el que se advierte, en el *análisis de la representatividad de las series*, que existe una gran diferencia entre las series de la estación de aforo EA 2060 Cebrones del Río y la masa de agua con código 48 en el Río Órbigo. La estación de aforo Las Omañas fue la que contó con la garantía media más alta de 79.5%.

En estas series se siguió cumpliendo que las mejores garantías se obtuvieron para el caudal ecológico de Q95P. Lo que cambió, respecto a las primeras series, fue que las calculadas con los caudales ecológicos a partir de series simuladas consiguieron mejores resultados para las garantías logradas con el caudal ecológico de la media móvil de orden 25, situación que en las primeras series fue con el caudal básico de mantenimiento.

De las garantías que se consiguieron en las estaciones de aforo con los caudales ecológicos calculados a partir de las series observadas desde 1980-81 se puede mencionar que no sufrieron gran cambio respecto a las calculadas con la totalidad de la serie en donde se siguieron obteniendo garantías cercanas al 89%.

Donde sí se presentaron cambios fue en las garantías para las estaciones de aforo con los datos de caudales ecológicos calculados con las series simuladas considerando todos los años de coincidencia disponibles desde 1980-81. En éstas las medias de las garantías para las estaciones EA 2060 y EA 2089 disminuyeron de 50.9 a 48.3% y de 77 a 67.8% respectivamente, consiguiendo así mejores resultados considerando toda la serie disponible. Sin embargo, para la estación EA 2076 Las Omañas las garantías logradas con la serie desde 1980-81 mostraron mejores resultados que las alcanzadas con la totalidad de la serie. Dicha garantía obtuvo de media un valor de 84.2% lo cual, viniendo de caudales ecológicos calculados con series simuladas, se puede considerar como buena.

10.2 Conclusiones finales

Este estudio se elaboró para determinar los caudales mínimos ecológicos en cauces del sistema de explotación del Órbigo. En este se ve que aunque se siguió la metodología propuesta por la Instrucción de Planificación, los resultados obtienen valores muy dispares, por un método u otro o cambiando cualquier aspecto del procedimiento.

Lo anterior se puede apreciar en las diferencias que se consiguen en los caudales ecológicos dependiendo de con qué método hidrológico fue calculado, qué distribución de repartición fue utilizada para la desagregación de la serie, qué longitud de serie fue usada, etc.

Por esta condición tomaron importancia los diversos análisis que se efectuaron en el trabajo siendo todos primordiales, pero teniendo que resaltar dos de ellos. El primero es la comparación de los caudales ecológicos entre las series aforadas y las simuladas en donde se realiza un estudio directo entre los resultados conseguidos con una u otra serie, para ver el parecido que se obtiene al calcular los caudales ecológicos con las series simuladas de la masa de agua que previamente se seleccionó por estar situada en las proximidades de la estación de aforo. El segundo análisis es el de las garantías en el que se pretende determinar el grado de cumplimiento que se obtendría en la serie aforada en régimen natural al implantar el caudal ecológico obtenido con la serie simulada.

Una de las conclusiones que se pueden sacar de este trabajo es que las grandes diferencias que se obtuvieron en los valores de caudales ecológicos en la estación de aforo EA 2060 Cebrones del Río se debió en gran medida a la poca correlación que existe con la masa de agua 48 Río Órbigo en donde se pudo ver una baja representatividad de la serie hidrológica respecto a la serie aforada.

Otra circunstancia presente en el proyecto es que los caudales ecológicos calculados a partir de las series simuladas siempre fueron superiores a los derivados con las series aforadas. El reparto que mostró mejores ajustes entre los dos estudiados fue el reparto constante. Respecto a los métodos hidrológicos de cálculo de caudales ecológicos, el método QMM25 fue el que consiguió mejores ajustes para todas las series de los métodos de variables de centralización móviles.

Al analizar los resultados de las comparaciones de caudales ecológicos y las garantías obtenidas se puede determinar que los caudales mínimos ambientales que mejor se adaptan a las series naturales son los calculados a partir de las series simuladas en las masas de agua 64 Río Omañas y 172 Río Eria, en donde se ajustan a las series de las estaciones de aforo EA 2076 Las Omañas y EA 2089 Morla de la Valdería, respectivamente.

Por último, se concluye la importancia de realizar los diversos análisis empleados en el trabajo debido al amplio abanico de opciones que se proponen en la metodología de la Instrucción de Planificación. Asimismo, se debe tener presente que los resultados conseguidos con las series simuladas deben usarse como unos valores orientativos y si es posible apoyarlos con otro tipo de métodos como el hidrobiológico.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baeza D. & D. García de Jalón. (1999). "Cálculo de caudales de mantenimiento en ríos de la cuenca del Tajo a partir de variables climáticas y de sus cuencas". *Limnetica* 16: 69-84.

BIETZ, B., J. MARTIN, K. SCHIEFER & P. CAMPBELL (1985). "Instream flow needs for fish below hydropower facilities in Canadá: A management guide to assessment methods". Rapport n° 148G398. Association Canadienne de l'Electricité. 90 pp.

BOVEE, K.D. (1982): "A guide to stream habitat analysis using Instream Flow Incremental Methodology". Instream Flow Information Paper, 12 FWS/OBS-82/26, Cooperative Instream Flow Group, US Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services.

Caissie, D., & El-Jabi, N. (1995). Comparison and regionalization of hydrologically based instream flow techniques in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22(2), 235-246.

CEDEX (1996). *El Sistema Integrado de Modelización Precipitación Aportación, SIMPA*. Revista de Ingeniería Civil, n° 104, páginas 43-52. Ministerio de Fomento, 1996.

CHDuero. (2012). *Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero 2009-2015. Anejo 6. Asignación y reserva de recursos. Capítulo 7: Sistema de Explotación Órbigo*. Valladolid

CHDuero. (2015). *Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero 2015-2021. Anejo 4 Caudales ecológicos*. Valladolid

CHDuero. (2015). *Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero 2015-2021. Anejo 6 Asignación y reserva de recursos*. Valladolid

CHJ. (2007). *La Directiva Marco Europea del Agua. Una nueva perspectiva en política de aguas*.

DHCMA. (2015). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterránea Andaluzas. Anejo V. Caudales ecológicos.*

Díez-Hernández, J. M. (2005). Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográficas. *Ingeniería y Competitividad*, 7(2).

Estrela, T. y L. Quintas, (1996a) *A distributed hydrological model for water resources assessment in large basins.* Proceedings of 1st International Conference on Rivertech 96. IWRA. Vol 2, pp 861-868. Chicago, USA.

Estrela, T. y Quintas, L., (1996b) *El sistema integrado de modelización precipitación - aportación SIMPA.* Revista de Ingeniería Civil, nº 104, páginas 43-52. CEDEX - Ministerio de Fomento, 1996

Estrela, T. (2011). The EU WFD and the River Basin Management Plans in Spain. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management (Vol. 164, No. 8, pp. 397-404).

Estrela, T. (2013). *El régimen de caudales ecológicos en la Instrucción de Planificación Hidrológica.* Valencia: Confederación Hidrográfica del Júcar.

Garrote, L. (2010). *Determinación del Régimen de Caudales Mínimos en el Tramo Bolarque-Aranjuez del Río Tajo.* Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

GUSTARD, A., A. BULLOCK & J.M. DIXON. (1992). *Low flow estimation in the United Kingdom.* Report nº 108. Institute of Hydrology. Wallingford, UK.

KING, J.M., R.E. THARME & M.S. DE VILLIERS (2000): "Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block methodology". Freshwater Research Unit. University of Cape Town. WRC Report No: TT131/00. 339 pp.

MAPAMA. (2014). *Anuario de aforos 2013-2014.* España.

Naiman, R. J., Latterell, J. J., Pettit, N. E., & Olden, J. D. (2008). Flow variability and the biophysical vitality of river systems. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(9), 629-643.

Nelson, F. (1980). Evaluation of Four Instream Flow Methods Applied to Four Trout Rivers in Southwest Montana, Montana Dept. *Fish Wildlife and Parks Report (14-16-006-78-046)*.

NGPRP (1974). "Instream needs subgroup report. Work Group C-Water. Northern Great Plains Resource Program. US Fish & Wildlife Service. Office of Biological Service. Washington DC.

Orden ARM/2656/2008 de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. *Boletín Oficial del Estado*. España, 22 de septiembre de 2008, núm. 229, pp. 38472-38582.

PALAU, A (1994) Los mal llamados caudales ecológicos. Bases para una propuesta de cálculo. *OP 28(2)*: 84-85

PALAU, A., & J. ALCAZAR. (1996). The Basic Flow. An alternative approach to calculate minimum environmental instream flows. *Proceedings of 2nd International Symposium on Habitat Hydraulics*. Quebec (Canada). Vol., A: 547-558.

Palau A., J. Alcázar, C. Alcácer & J. Roi. (1998). "Metodología de cálculo de regímenes de caudales de mantenimiento". Informe técnico para el CEDEX. Ministerio de Medio Ambiente.

Palau, A., Sánchez, R., Rocaspana, R., Bardina, M., & Rebollo, I. (2002). Validación del Caudal Básico según el método QBM en el cálculo de caudales mínimos ambientales. *Validación hidrobiológica del método del Caudal Básico de Mantenimiento en el cálculo de caudales con fines ambientales*.

Palau, A. y Alcázar, J. (2010). The basic flow method for incorporating flow variability in environmental flows. *River Research and Applications*.

Polo, J. F., & Torres, J. M. H. (2009). El régimen de caudales mínimos en el nuevo ciclo de la planificación hidrológica. *Aspectos metodológicos y procesos de concertación social. Ingen Territ*, 85, 46-55.

Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, el

Reglamento de Planificación Hidrológica, aprobado por el Real Decreto 907/2007, de 6 de julio. *Boletín Oficial del Estado*. España, 9 de diciembre de 2016, núm. 314, pp. 91133-91175.

Reiser, D. W., Wesche, T. A., & Estes, C. (1989). Status of instream flow legislation and practices in North America. *Fisheries*, 14(2), 22-29.

Richter, B., Baumgartner, J., Wigington, R., & Braun, D. (1997). How much water does a river need?. *Freshwater biology*, 37(1), 231-249.

Ruiz, J.M., (1998). Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual distribuido de simulación continua integrado con un SIG. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Stalnaker, C. B., & Arnett, J. L. (1976). *Methodologies for the determination of stream resource flow requirements: an assessment* (No. 76/03). US Fish and Wildlife Service. Utah State University. Logan (Utah)

Tennant, D. L. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1(4), 6-10.

Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River research and applications*, 19(5-6), 397-441.

USFWS (1980): "Habitat evaluation procedures". Division of Ecological Services. USFWS-ESM102. Washington D.C. (USA).