



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Desarrollo de un modelo para la predicción de caudales y volúmenes de embalse en el trasvase Tajo-Segura empleando lógica difusa

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Mason de la Fuente, Simón

Tutor/a: Pulido Velázquez, Manuel Augusto

Cotutor/a: Macián Sorribes, Héctor

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Trabajo Fin de Máster

DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA PREDICCIÓN DE CAUDALES Y VOLÚMENES DE EMBALSE EN EL TRASVASE TAJO- SEGURA EMPLEANDO LÓGICA DIFUSA

Intensificación:

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURDOS HÍDRICOS

Autor:

SIMÓN MASON DE LA FUENTE

Tutor:

DR. MANUEL PULIDO VELÁZQUEZ

Cotutor/es:

DR. HÉCTOR MACIÁN SORRIBES

FEBRERO, 2023



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: Desarrollo de un modelo para la predicción de caudales y volúmenes de embalse en el trasvase Tajo-Segura empleando lógica difusa

Título del TFM en inglés: Development of a model to forecast releases and dammed volumes in the Tajo-Segura transfer using fuzzy logic

Título del TFM en Valenciano: Desenvolupament d' un model per a la predicció de cabals i volums d'embassament en el transvasament Tajo-Segura emprant lògica difusa

Alumno: SIMÓN MASON DE LA FUENTE

Tutor: DR. MANUEL PULIDO VELÁZQUEZ

Cotutor/es: DR. HÉCTOR MACIÁN SORRIBES

Director experimental:

Fecha de Lectura: ENERO, 2023

Resumen

En español (máximo 5000 caracteres)

Debido a su gran longitud y a su innegable contribución al desarrollo socioeconómico del sureste del país, el trasvase Tajo-Segura constituye una de las obras hidráulicas de mayor relevancia para España. El agua que la cabecera del río Tajo cede a la cuenca del Segura ha sido un elemento esencial para el crecimiento de la región durante los más de 40 años en los que el trasvase ha estado en funcionamiento. Sin embargo, durante este tiempo, su operación se ha enfrentado, y se sigue enfrentando, a polémicas y controversias entre diversas entidades pertenecientes a la cuenca cedente, a la cuenca receptora y a las comunidades autónomas asociadas. El encuentro de numerosos intereses políticos, económicos y ambientales ha generado permanente conflicto en la toma de decisiones. Ante esto, durante las últimas décadas se han instaurado normativas de explotación que dictaminan los máximos volúmenes trasvasables en relación con las condiciones concretas de disponibilidad de agua en la cuenca cedente, intentando así asegurar la sostenibilidad del recurso. No obstante, en la práctica, la transferencia final de caudales no solo obedece al estricto cumplimiento de los límites normados, sino que en la decisión intervienen también otros criterios no explícitamente fijados, por lo que se dificulta la obtención de predicciones fiables de volúmenes trasvasados.

Presentada esta problemática, se propone el desarrollo de modelos matemáticos capaces de predecir los volúmenes mensuales desembalsados, tanto a la cuenca del Segura (a través del trasvase) como a la del Tajo. Estos modelos utilizan como datos de entrada parámetros que caracterizan la disponibilidad hídrica de la región, y se calibran y validan empleando las decisiones que han sido tomadas históricamente. La elaboración de estos modelos se ha realizado mediante técnicas de lógica difusa, que no requieren,

necesariamente, el conocimiento de valores numéricos concretos para su ejecución, sino que incorporan expresiones del lenguaje cotidiano como “muy bajo” o “muy alto”, facilitando en gran medida el entendimiento y manipulación por parte de los usuarios y operadores.

Una vez definidos, estos modelos se emplearán para realizar predicciones de los caudales trasvasados y desembalsados hacia el Tajo, así como de volúmenes almacenados en los embalses de cabecera del Tajo mediante balance hídrico, comparándose sus resultados con los valores observados durante el período histórico, con el fin de establecer la fiabilidad de dichos sistemas y su potencial aplicación para la obtención de predicciones estacionales de caudales trasvasados, lo cual puede resultar de gran utilidad para la planificación de los productores de la región.

En valenciano (máximo 5000 caracteres)

A causa de la seva gran longitud i la seva innegable contribució al desenvolupament socioeconòmic del sud-est del país, el transvasament Tajo-Segura constitueix una de les obres hidràuliques de més rellevància per a Espanya. L'aigua que la capçalera del riu Tajo cedeix a la conca del Segura ha estat un element essencial per al creixement de la regió durant els més de 40 anys en què el transvasament ha estat en funcionament. Tot i això, durant aquest temps, la seva operació s'ha enfrontat, i se segueix enfrontant, a polèmiques i controvèrsies entre diverses entitats pertanyents a la conca cedent, a la conca receptora i a les comunitats autònomes associades. La trobada de nombrosos interessos polítics, econòmics i ambientals ha generat un conflicte permanent en la presa de decisions. Davant d'això, durant les darreres dècades s'han instaurat normatives d'explotació que dictaminen els màxims volums transvasables en relació amb les condicions concretes de disponibilitat d'aigua a la conca cedent, intentant així assegurar la sostenibilitat del recurs. Això no obstant, a la pràctica, la transferència final de cabals no només obeeix a l'estricta compliment dels límits normats, sinó que en la decisió intervenen també altres criteris no explícitament fixats, per la qual cosa es dificulta l'obtenció de prediccions fiables de volums transvasats.

Presentada aquesta problemàtica, es proposa el desenvolupament de models matemàtics capaços de predir els volums mensuals desembassats, tant a la conca del Segura (a través del transvasament) com a la del Tajo. Aquests models utilitzen com a dades d'entrada paràmetres que caracteritzen la disponibilitat hídrica de la regió, i es calibren i validen emprant les decisions que han estat preses històricament. L'elaboració d'aquests models s'ha realitzat mitjançant tècniques de lògica difusa, que no requereixen, necessàriament, el coneixement de valors numèrics concrets per a la seva execució, sinó que incorporen expressions del llenguatge quotidià com a “molt baix” o “molt alt”, facilitant en gran mesura l'enteniment i la manipulació per part dels usuaris i operadors.

Un cop definits, aquests models s'empraran per realitzar prediccions dels cabals transvasats i desembassats cap al Tajo, així com de volums emmagatzemats als embassaments de capçalera del Tajo mitjançant balanç hídric, comparant-se els seus resultats amb els valors observats durant el període històric, per tal d'establir la fiabilitat d'aquests sistemes i la seva aplicació potencial per a l'obtenció de prediccions estacionals de cabals transvasats, la qual cosa pot resultar de gran utilitat per a la planificació dels productors de la regió.

En inglés (máximo 5000 caracteres)

Due to its great length and its undeniable contribution to the socioeconomic development of the southeast of the country, the Tagus-Segura water transfer constitutes one of the most important hydraulic works for Spain. The water that the headwaters of the Tagus River transfer to the Segura basin has been an essential element for the growth of the region during the more than 40 years in which the transfer has been working. However, during this time, its operation has faced, and continues to face, polemics and controversies between various entities belonging to the ceding basin, the receiving basin and the associated autonomous communities. The meeting of numerous political, economic and environmental interests has generated permanent conflict in decision-making. Given this, in recent decades, exploitation regulations have been established that dictate the maximum volumes that can be transferred in relation to the specific conditions of water availability in the transferring basin, thus trying to ensure the sustainability of the resource. However, in practice, the final transfer of flows is not only due to strict compliance with the regulated limits, but other criteria that are not explicitly set also intervene in the decision, which makes it difficult to obtain reliable predictions of transferred volumes.

To address this issue, it is proposed the development of mathematical models capable of predicting the monthly volumes released, both to the Segura basin (through the transfer) and to the Tagus. These models use as input data parameters that characterize the water availability of the region, and are calibrated and validated using the decisions that have been made historically. The elaboration of these models has been carried out using fuzzy logic techniques, which do not necessarily require knowledge of specific numerical values for their execution, but instead incorporate expressions from everyday language such as "very low" or "very high", facilitating in great extent the understanding and manipulation by users and operators.

Once defined, these models will be used to make predictions of the flows transferred and discharged into the Tagus, as well as the volumes stored in the headwater reservoirs of the Tagus through water balance, comparing their results with the values observed during the historical period, in order to establish the reliability of these systems and their potential application to obtain seasonal predictions of transferred flows, which can be very useful for the planning of producers in the region.

Palabras clave español (máximo 5): lógica difusa, predicción de caudales, trasvase Tajo-Segura

Palabras clave valenciano (máximo 5): lògica difusa, predicció de cabals, transvasament Tajo-Segura

Palabras clave inglés (máximo 5): fuzzy logic, flow prediction, Tagus-Segura water transfer

Para mi Juanuchito saltarín.

Cada día que pasa queda uno menos para conocerte.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mis tutores, Manuel y Héctor, por darme la oportunidad de realizar este trabajo. Gracias por los consejos, la experiencia y la confianza que depositaron en mí.

Doy gracias también a mis padres y suegros, por apoyar este proyecto desde el primer día. Han sido un soporte fundamental en este tiempo lejos de casa.

Y agradezco, finalmente, a mi familia, Dani y Lucas, que no dudaron en acompañarme en este sueño. Gracias negrita por estar siempre para nosotros, firme ante todo. Gracias pollito por tus sonrisas, siempre dándome ánimo. Gracias amores, gracias por tanto. Ni pensar en haber hecho esto sin ustedes.

¡Moltes gràcies!

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XVIII
GLOSARIO	XIX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Contexto y motivación.....	1
1.2. Objetivos del trabajo	2
1.3. Propuesta general de metodología de trabajo	3
2. CASO DE ESTUDIO: TRASVASE TAJO-SEGURA.....	4
2.1. Orígenes del trasvase.....	4
2.2. Descripción general del sistema.....	5
2.3. Reglas de explotación	7
2.3.1. Comienzo de la explotación del ATS (desde 1980 hasta 1998)	10
2.3.2. Primera regla de explotación del ATS (desde 1998 hasta 2014)	10
2.3.3. Segunda regla de explotación del ATS (desde 2014 hasta 2021)	12
2.3.4. Tercera regla de explotación del ATS (desde 2021 hasta la fecha)	16
3. METODOLOGÍA	19
3.1. Fundamentos generales de la Lógica Difusa	19
3.2. Estado del arte: Lógica Difusa y su aplicación a la gestión de embalses.....	20
3.3. Definiciones y procedimientos matemáticos de la Lógica Difusa aplicada a la gestión de embalses	23
3.3.1. Números difusos y fuzzificación	23
3.3.2. Método de inferencia difusa	25
3.3.3. Correcciones y operaciones finales.....	30
3.4. Modelos propuestos para el caso de estudio	31
3.5. Definición de las variables de entrada y de salida.....	33
3.5.1. Variables para la modelación de volúmenes trasvasados al Segura	34
A) Variable de salida: Volumen trasvasado.....	34
B) Variable de entrada Nº1: Volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía ..	36
C) Variable de entrada Nº2: Aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía durante los últimos 12 meses.....	39

D)	Variable de entrada N°3: Volumen embalsado en los principales embalses de la cuenca del Segura	42
E)	Variable de entrada N°4: Mes en el que se realiza el trasvase	46
3.5.2.	Variables para la modelación de volúmenes desembalsados al Tajo	47
A)	Variable de salida: Volumen desembalsado	48
B)	Variable de entrada N°1: Volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía ..	51
C)	Variable de entrada N°2: Aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía durante los últimos 12 meses.....	53
D)	Variable de entrada N°3: Volumen embalsado en los principales embalses de la cuenca del Tajo	54
E)	Variable de entrada N°4: Mes en el que se realiza el desembalse	58
3.6.	Definición de los sistemas difusos	58
3.6.1.	Descripción de los modelos realizados	58
3.6.2.	Números difusos	58
A)	Volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía.....	59
B)	Aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía durante los últimos 12 meses	60
C)	Volumen embalsado en los principales embalses de la cuenca del Segura.....	61
D)	Volumen embalsado en los principales embalses de la cuenca del Tajo.....	62
3.6.3.	Reglas difusas	63
3.6.4.	Parámetros adicionales	63
3.6.5.	Restricciones adicionales	63
3.7.	Proceso de calibración – validación.....	64
3.7.1.	Relleno y corrección de salidas agrupadas	64
3.7.2.	Indicador de desempeño	67
3.7.3.	Procedimiento de validación cruzada K-Fold.....	68
3.7.4.	Análisis de sensibilidad.....	69
3.8.	Predicción de variables.....	70
3.8.1.	Procedimientos para la predicción de variables	71
A)	Aportaciones mensuales en Entrepeñas y Buendía.....	71
B)	Aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía durante los últimos 12 meses	72

C)	Volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía	73
D)	Volúmenes embalsados en los principales embalses de las cuencas del Segura y del Tajo	74
3.8.2.	Metodología para la estimación de la capacidad predictiva del modelo	75
4.	RESULTADOS	76
4.1.	Desempeño de los modelos de Lógica Difusa para las series históricas	76
4.1.1.	Modelación de volúmenes trasvasados al Segura	76
A)	Proceso y rendimiento de la calibración	76
B)	Valores medios mensuales	81
C)	Análisis de sensibilidad.....	83
4.1.2.	Modelación de volúmenes desembalsados al Tajo	87
A)	Proceso y rendimiento de la calibración	87
B)	Valores medios mensuales	91
C)	Análisis de sensibilidad.....	94
4.2.	Predicción de variables relacionadas con el Trasvase Tajo-Segura.....	98
4.2.1.	Predicción de aportaciones mensuales en la cabecera del Tajo.....	99
A)	Resultados generales.....	99
B)	Desempeño según el mes de inicio de la predicción	102
C)	Desempeño según el mes predicho	104
D)	Desempeño según la antelación con la que se realiza la predicción.....	105
4.2.2.	Predicción de aportaciones acumuladas en la cabecera del Tajo	107
A)	Resultados generales.....	107
B)	Desempeño según el mes de inicio de la predicción	110
C)	Desempeño según el mes predicho	112
D)	Desempeño según la antelación con la que se realiza la predicción.....	114
4.2.3.	Predicción de volúmenes embalsados en la cabecera del Tajo.....	116
A)	Resultados generales.....	116
B)	Desempeño según el mes de inicio de la predicción	119
C)	Desempeño según el mes predicho	121
D)	Desempeño según la antelación con la que se realiza la predicción.....	122
4.2.4.	Predicción de volúmenes trasvasados a la cuenca del Segura	124
A)	Resultados generales.....	125

B)	Desempeño según el mes de inicio de la predicción	128
C)	Desempeño según el mes predicho	131
D)	Desempeño según la antelación con la que se realiza la predicción.....	134
4.2.5.	Predicción de volúmenes desembalsados a la cuenca del Tajo.....	138
A)	Resultados generales.....	138
B)	Desempeño según el mes de inicio de la predicción	142
C)	Desempeño según el mes predicho	145
D)	Desempeño según la antelación con la que se realiza la predicción.....	148
5.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	152
5.1.	Síntesis y conclusiones	152
5.2.	Limitaciones y líneas de investigación futuras.....	157
6.	REFERENCIAS.....	160
	ANEXO A. Parámetros y resultados de modelación.....	ANEXOS - 1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Perfil en elevación del trazado del Acueducto Tajo-Segura.	6
Figura 2.2. Esquema en planta del Trasvase Tajo Segura	6
Figura 2.3. Evolución, entre 2013 y 2019, de los umbrales que delimitan los niveles 3 y 4 de la regla de explotación del trasvase	15
Figura 3.1. Ejemplo de números difusos triangulares homogéneos y equiespaciados	25
Figura 3.2. Esquema representativo de las sueltas simuladas por los modelos de trasvases al Segura y de desembalses al Tajo	32
Figura 3.3. Serie histórica de volúmenes mensuales trasvasados hacia la cuenca del Segura.....	35
Figura 3.4. Comparación entre trasvases observados y trasvases mensuales autorizados según la normativa	36
Figura 3.5. Serie histórica de volúmenes embalsado en Entrepeñas y Buendía	38
Figura 3.6. Contraste de series históricas de volúmenes embalsados en E+B frente a volúmenes trasvasados	38
Figura 3.7. Correlación entre las series de datos de volúmenes embalsados en E+B y de volúmenes trasvasados	39
Figura 3.8. Serie histórica de aportaciones mensuales en Entrepeñas y Buendía, mediante las cuales se calculan las aportaciones acumuladas en 12 meses	40
Figura 3.9. Serie histórica de aportaciones acumuladas en 12 meses en Entrepeñas y Buendía.....	41
Figura 3.10. Contraste de series históricas de aportaciones acumuladas en 12 meses en E+B frente a volúmenes trasvasados	41
Figura 3.11. Correlación entre las series de datos aportaciones acumuladas en 12 meses en E+B y de volúmenes trasvasados	42
Figura 3.12. Serie histórica de volúmenes embalsados en Talave, Camarillas, Fuensanta y Cenajo.....	43
Figura 3.13. Contraste de series históricas de volúmenes embalsados en TCFC frente a volúmenes trasvasados	44
Figura 3.14. Correlación entre las series históricas de volúmenes embalsados en TCFC frente a volúmenes trasvasados	45
Figura 3.15. Contraste de series históricas de volúmenes embalsados en TCFC frente a volúmenes embalsados en E+B.....	46
Figura 3.16. Comparación de volúmenes de salida de Bolarque y de entrada a Zorita	49

Figura 3.17. Correlación existente entre las salidas de Bolarque y las entradas de Zorita	50
Figura 3.18. Serie histórica de volúmenes mensuales desembalsados al río Tajo	50
Figura 3.19. Comparación entre desembalses observados y desembalses mensuales autorizados según la normativa	51
Figura 3.20. Contraste de series históricas de volúmenes embalsados en E+B frente a volúmenes desembalsados	52
Figura 3.21. Correlación entre las series históricas de volúmenes embalsados en E+B frente a volúmenes desembalsados	52
Figura 3.22. Contraste de series históricas de aportaciones acumuladas en 12 meses en E+B frente a volúmenes desembalsados	53
Figura 3.23. Correlación entre las series históricas de aportaciones acumuladas en 12 meses en E+B frente a volúmenes desembalsados	54
Figura 3.24. Serie histórica de volúmenes embalsados en Bolarque, Gabriel y Galán, Alcorlo, Atazar, Valmayor, Finisterre, Burguillo y San Juan	56
Figura 3.25. Contraste de series históricas de volúmenes embalsados en principales embalses de la cuenca del Tajo frente a volúmenes desembalsados	57
Figura 3.26. Correlación entre las series históricas de volúmenes embalsados en principales embalses de la cuenca del Tajo frente a volúmenes desembalsados	57
Figura 3.27. Números difusos asociados a la variable modificada de volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía	59
Figura 3.28. Números difusos asociados a la variable modificada de aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía durante los últimos 12 meses	60
Figura 3.29. Números difusos asociados a la variable modificada de volúmenes embalsados en Talave, Camarillas, Fuensanta y Cenajo	61
Figura 3.30. Números difusos asociados a la variable modificada de volúmenes embalsados en los principales embalses de la cuenca del Tajo	62
Figura 4.1. Trasvases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°1 (apartando el año 2014/15)	77
Figura 4.2. Trasvases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°2 (apartando el año 2015/16)	77
Figura 4.3. Trasvases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°3 (apartando el año 2016/17)	77
Figura 4.4. Trasvases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°4 (apartando el año 2017/18)	77
Figura 4.5. Trasvases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°5 (apartando el año 2018/19)	77

Figura 4.6. Trasvases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°6 (apartando el año 2019/20).....	77
Figura 4.7. Trasvases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°7 (apartando el año 2020/21).....	78
Figura 4.8. Trasvases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°8 (apartando el año 2021/22).....	78
Figura 4.9. Trasvases al Segura modelados según Calibración Definitiva.....	79
Figura 4.10. Trasvases al Segura modelados según Calibración Definitiva. Detalle del período en el que han estado en vigencia las últimas reglas de explotación.....	80
Figura 4.11. Trasvases medios mensuales	81
Figura 4.12. Errores medios mensuales de la modelación de trasvases al Segura con respecto a los trasvases medidos.....	82
Figura 4.13. Errores medios mensuales porcentuales de la modelación de trasvases al Segura con respecto a los trasvases medidos.....	83
Figura 4.14. Cambios en los resultados de la modelación de trasvases al Segura, debidos a modificaciones porcentuales en la serie de Volúmenes Embalsados en E+B	84
Figura 4.15. Cambios en los resultados de la modelación de trasvases al Segura, debidos a modificaciones porcentuales en la serie de Aportaciones Acumuladas en la cabecera del Tajo durante los últimos 12 meses	84
Figura 4.16. Cambios en los resultados de la modelación de trasvases al Segura, debidos a modificaciones porcentuales en la serie de Volúmenes Embalsados en los principales embalses de la cuenca del Segura.....	85
Figura 4.17. Sensibilidad media del modelo de trasvases al Segura en relación con las distintas variables de entrada	86
Figura 4.18. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°1 (apartando el año 2014/15)	87
Figura 4.19. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°2 (apartando el año 2015/16)	87
Figura 4.20. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°3 (apartando el año 2016/17)	88
Figura 4.21. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°4 (apartando el año 2017/18)	88
Figura 4.22. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°5 (apartando el año 2018/19)	88
Figura 4.23. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°6 (apartando el año 2019/20)	88

Figura 4.24. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°7 (apartando el año 2020/21)	88
Figura 4.25. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°8 (apartando el año 2021/22)	88
Figura 4.26. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Definitiva	90
Figura 4.27. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Definitiva. Detalle del último año hidrológico	91
Figura 4.28. Desembalses medios mensuales.....	92
Figura 4.29. Errores medios mensuales de la modelación de desembalses al Tajo con respecto a los trasvases medidos.....	93
Figura 4.30. Errores medios mensuales porcentuales de la modelación de desembalses al Tajo con respecto a los trasvases medidos	94
Figura 4.31. Cambios en los resultados de la modelación de desembalses al Tajo, debidos a modificaciones porcentuales en la serie de Volúmenes Embalsados en E+B.....	95
Figura 4.32. Cambios en los resultados de la modelación de desembalses al Tajo, debidos a modificaciones porcentuales en la serie de Aportaciones Acumuladas en la cabecera del Tajo durante los últimos 12 meses	95
Figura 4.33. Cambios en los resultados de la modelación de desembalses al Tajo, debidos a modificaciones porcentuales en la serie de Volúmenes Embalsados en los principales embalses de la cuenca del Tajo.....	96
Figura 4.34. Sensibilidad media del modelo de desembalses al Tajo en relación con las distintas variables de entrada	97
Figura 4.35. Predicciones de Aportaciones Mensuales	100
Figura 4.36. Predicciones medias mensuales de Aportaciones Mensuales, según el mes en el que comienza la predicción.....	101
Figura 4.37. Predicción media mensual de Aportaciones Mensuales, según el mes predicho	102
Figura 4.38. Errores medios mensuales de las predicciones de aportaciones con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.....	103
Figura 4.39. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de aportaciones con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.....	103
Figura 4.40. Error medio mensual de las predicciones de aportaciones con respecto a los datos medidos, según el mes predicho.....	104
Figura 4.41. Error medio mensual porcentual de las predicciones de aportaciones con respecto a los datos medidos, según el mes predicho	105

Figura 4.42. Error medio mensual de las predicciones de aportaciones con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción	106
Figura 4.43. Error medio mensual porcentual de las predicciones de aportaciones con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción	106
Figura 4.44. Predicción de Aportaciones Acumuladas en los últimos 12 meses	108
Figura 4.45. Predicciones medias mensuales de Aportaciones Acumuladas en los últimos 12 meses, según el mes en el que comienza la predicción.....	109
Figura 4.46. Predicción media mensual de Aportaciones Acumuladas en los últimos 12 meses, según el mes predicho	110
Figura 4.47. Errores medios mensuales de las predicciones de aportaciones acumuladas con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción	111
Figura 4.48. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de aportaciones acumuladas con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción	111
Figura 4.49. Error medio mensual de las predicciones de aportaciones acumuladas con respecto a los datos medidos, según el mes predicho	112
Figura 4.50. Error medio mensual porcentual de las predicciones de aportaciones acumuladas con respecto a los datos medidos, según el mes predicho	113
Figura 4.51. Error medio mensual de las predicciones de aportaciones acumuladas con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.....	114
Figura 4.52. Error medio mensual porcentual de las predicciones de aportaciones acumuladas con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción	115
Figura 4.53. Predicciones de Volúmenes Embalsados en Entrepeñas y Buendía.....	117
Figura 4.54. Predicciones medias mensuales de Volúmenes Embalsados en Entrepeñas y Buendía, según el mes en el que comienza la predicción.....	118
Figura 4.55. Predicción media mensual de Volúmenes Embalsados en Entrepeñas y Buendía, según el mes predicho	119
Figura 4.56. Errores medios mensuales de las predicciones de volúmenes embalsados en E+B con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.....	120
Figura 4.57. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de volúmenes embalsados en E+B con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción	120

Figura 4.58. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes embalsados en E+B con respecto a los datos medidos, según el mes predicho	121
Figura 4.59. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes embalsados en E+B con respecto a los datos medidos, según el mes predicho	122
Figura 4.60. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes embalsados en E+B con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.....	123
Figura 4.61. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes embalsados en E+B con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción	123
Figura 4.62. Predicciones de Volúmenes Trasvasados a la cuenca del Segura. Comparación con respecto a valores medidos	125
Figura 4.63. Predicciones de Volúmenes Trasvasados a la cuenca del Segura. Comparación con respecto a valores modelados	126
Figura 4.64. Predicciones medias mensuales de Volúmenes Trasvasados a la cuenca del Segura, según el mes en el que comienza la predicción. Comparación con respecto a valores medidos y modelados.....	127
Figura 4.65. Predicción media mensual de Volúmenes Trasvasados a la cuenca del Segura, según el mes predicho. Comparación con respecto a valores medidos y modelados.....	128
Figura 4.66. Errores medios mensuales de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción. 129	129
Figura 4.67. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.....	129
Figura 4.68. Errores medios mensuales de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos modelados, según el mes en el que comienza la predicción.....	130
Figura 4.69. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos modelados, según el mes en el que comienza la predicción.....	131
Figura 4.70. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos medidos, según el mes predicho	132
Figura 4.71. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos medidos, según el mes predicho.....	132
Figura 4.72. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos modelados, según el mes predicho	133

Figura 4.73. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos modelados, según el mes predicho	134
Figura 4.74. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.....	135
Figura 4.75. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción	136
Figura 4.76. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos modelados, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.....	137
Figura 4.77. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos modelados, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.....	137
Figura 4.78. Predicciones de Volúmenes Desembalsados a la cuenca del Tajo. Comparación con respecto a valores medidos	139
Figura 4.79. Predicciones de Volúmenes Desembalsados a la cuenca del Tajo. Comparación con respecto a valores modelados	139
Figura 4.80. Predicciones medias mensuales de Volúmenes Desembalsados a la cuenca del Tajo, según el mes en el que comienza la predicción. Comparación con respecto a valores medidos y modelados.....	140
Figura 4.81. Predicción media mensual de Volúmenes Desembalsados a la cuenca del Tajo, según el mes predicho. Comparación con respecto a valores medidos y modelados .	141
Figura 4.82. Errores medios mensuales de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción .	142
Figura 4.83. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.....	143
Figura 4.84. Errores medios mensuales de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos modelados, según el mes en el que comienza la predicción.....	144
Figura 4.85. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos modelados, según el mes en el que comienza la predicción.....	144
Figura 4.86. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos medidos, según el mes predicho.....	145

Figura 4.87. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos medidos, según el mes predicho	146
Figura 4.88. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos modelados, según el mes predicho.....	147
Figura 4.89. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos modelados, según el mes predicho	147
Figura 4.90. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.....	149
Figura 4.91. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción	149
Figura 4.92. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos modelados, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.....	150
Figura 4.93. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos modelados, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.....	151

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Volúmenes límite embalsados en Entrepeñas y Buendía, medidos en hectómetros cúbicos, por debajo de los cuales se establecen condiciones hidrológicas excepcionales	9
Tabla 2.2. Niveles de explotación según la Regla de Explotación de 1997	11
Tabla 2.3. Volúmenes límite embalsados en Entrepeñas y Buendía, medidos en hectómetros cúbicos, por debajo de los cuales se establecen condiciones hidrológicas excepcionales	13
Tabla 2.4. Niveles de explotación según la Regla de Explotación de 2014	14
Tabla 2.5. Desembalses de referencia hacia la cuenca del Tajo, medidos en hectómetros cúbicos	16
Tabla 2.6. Niveles de explotación según la Regla de Explotación de 2021	17
Tabla 3.1. Parámetros para la predicción de aportaciones en Entrepeñas y Buendía	72
Tabla 3.2. Evaporaciones mensuales esperables en Entrepeñas y Buendía, en [hm ³], según las existencias a comienzos de mes	73
Tabla 4.1. Desempeño de Calibraciones Preliminares en Modelo de Trasvases al Segura	78
Tabla 4.2. Desempeño del Modelo de Trasvases al Segura para distintos períodos de relevancia	81
Tabla 4.3. Desempeño de Calibraciones Preliminares en Modelo de Desembalses al Tajo	89
Tabla 4.4. Desempeño del Modelo de Desembalses al Tajo para distintos períodos de relevancia	91
Tabla A.1. Reglas difusas para la modelación de sueltas	ANEXOS - 1
Tabla A.2. Salidas agrupadas resultantes, en [hm ³], para la modelación de trasvases al Segura	ANEXOS - 11
Tabla A.3. Salidas agrupadas resultantes, en [hm ³], para la modelación de desembalses al Tajo	ANEXOS - 21

GLOSARIO

Año hidrológico:	el correspondido entre el 1 de octubre y el 30 de septiembre del año calendario siguiente.
Apo. Acum.:	Aportaciones Acumuladas.
ATS:	Acueducto Tajo-Segura.
CCEATS:	Comisión Central de Explotación del Acueducto Tajo-Segura.
CEDEX:	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
E+B:	Embalses de funcionamiento conjunto Entrepeñas y Buendía.
MITECO:	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
NS:	Nash-Sutcliffe.
SAIH:	Sistema Automático de Información Hidrográfica.
TCFC:	Embalses de Talave, Camarillas, Fuensanta y Cenajo.
w_k :	Peso de la regla difusa k , que determina su grado de influencia en los resultados de un modelo de lógica difusa.
ε_1 :	Umbral bajo el cual se considera no significativo el grado de pertenencia de una variable difusa a una categoría.
μ_{xi} :	Grado de pertenencia de una variable x con respecto a un número difuso i .
12M:	12 meses.
[cm]:	centímetros.
[hm ³]:	hectómetros cúbicos.
[hm ³ /mes]:	hectómetros cúbicos por mes.
[m ³ /s]:	metros cúbicos por segundo.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto y motivación

Desde que comenzó su operación, a finales de la década de 1970, el Trasvase Tajo-Segura es considerado una de las obras hidráulicas de mayor relevancia para España. Su implementación tiene como objetivo la derivación de una porción de las aguas almacenadas en la cabecera del río Tajo hasta el cauce del río Mundo en la cuenca del Segura; permitiendo, desde allí, su aprovechamiento por parte de los agricultores de dicha cuenca, a la vez que sirve como apoyo al suministro urbano de ciertas localidades. De esta forma, durante los más de 40 años en los que el trasvase ha estado en funcionamiento, el recurso aportado a la cuenca semiárida del Segura ha contribuido innegablemente a su desarrollo agrícola y, en consecuencia, a su crecimiento socioeconómico (Morote Seguido et al., 2017).

A pesar de los beneficios que la operación del trasvase genera, el encuentro de los diversos intereses políticos, económicos y ambientales por los que velan las distintas entidades representantes de la cuenca cedente y de la cuenca receptora, además de otros pertenecientes a las comunidades autónomas afectadas, ha generado un permanente conflicto en la toma de decisiones (Villarroya Gil, 2006). Claramente, no resulta sencilla la tarea de satisfacer íntegramente un conjunto de usos y demandas en ambas cuencas que, muchas veces, se contraponen mutuamente. Ante esta problemática, y con la intención de establecer reglas de operación concretas y justificadas que velen por el uso racional y sostenible del recurso, se han instaurado distintas normativas de explotación para, a lo largo de la vida del acueducto, definir los límites máximos trasvasables en función de las condiciones concretas de disponibilidad de agua en la cuenca cedente. Dichas reglas, sin embargo, han debido ser actualizadas en múltiples ocasiones. Los cambios evidenciados en las condiciones hidrológicas de la zona, concretamente la reducción de aportaciones; el aumento de las demandas de riego, en ocasiones impulsado por la sensación de seguridad que entrega el mismo trasvase; y el aumento generalizado de los requerimientos ambientales, han motivado la incorporación de modificaciones que, en varias ocasiones, han precisado o reestablecido los límites previamente definidos.

En la práctica, empero, el volumen mensual que finalmente es transferido de una cuenca a otra no obedece solo al estricto cumplimiento de los límites normados, que sólo se refieren a los máximos permitidos. Por el contrario, la decisión de cuánta agua trasvasar corresponde a una conjunción entre estos límites y otros criterios no explícitamente fijados, que pueden ser, por ejemplo, la estacionalidad o la disponibilidad hídrica en la cuenca receptora; y cuya ponderación evoluciona de acuerdo con la situación particular en la que se encuentren. Esta discrecionalidad provoca que sea complejo predecir los volúmenes que efectivamente serán trasvasados durante un periodo concreto.

Frente a estas dificultades, una definición sistemática de reglas de operación que permitan establecer los volúmenes trasvasados a través del acueducto Tajo-Segura durante los próximos meses, puede redundar en un beneficio en la gestión del mismo, ya que no solo se mejora la información disponible, sino que se incorpora, explícitamente, una previsión de las operaciones futuras. Sin embargo, la complejidad previamente descrita convierte la definición de estas reglas en un desafío. En comparación con métodos matemáticos tradicionales, la utilización de técnicas de inteligencia artificial para la generación de estas reglas, como las que considera la Lógica Difusa, permite la integración de las distintas variables que influyen en el proceso de toma de decisiones, aun sin tener un conocimiento explícito de éstas, facilitando en gran medida su reproducción y modelación, y permitiendo, gracias a esto, su predicción a futuro.

1.2. Objetivos del trabajo

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar una reproducción fiable, a escala mensual, de los volúmenes embalsados en la cabecera del río Tajo, junto con los caudales desembalsados hacia la misma cuenca y los caudales trasvasados hacia la cuenca del Segura, en función de variables concretas, objetivas y fáciles de estimar.

El modelo resultante es capaz de predecir los caudales trasvasados a la cuenca del Segura durante los meses venideros. Gracias a esto, la predicción generada puede resultar de gran utilidad para la gestión del sistema a meses vista y para la planificación de los productores de

la región, ya que permite ampliar el conocimiento sobre la disponibilidad hídrica futura y, por lo tanto, hacer un uso más eficiente del recurso.

1.3. Propuesta general de metodología de trabajo

Para la formulación del modelo predictivo se propone la utilización de técnicas de inteligencia artificial, y en particular, de Lógica Difusa, ya que ésta permite definir reglas concretas de operación a partir de la integración de las distintas variables que influyen en la toma de decisiones, sean estas conocidas o no. Dichas reglas son capaces de ajustarse a las decisiones que han sido tomadas históricamente por los gestores, pero también permiten la incorporación del conocimiento que pudiesen aportar distintos expertos en el área. Además, las reglas obtenidas mediante Lógica Difusa tienen la ventaja de no requerir, necesariamente, el conocimiento de los valores numéricos exactos que adquieren las variables de entrada para la correcta ejecución del modelo, sino que incorporan expresiones del lenguaje cotidiano como “muy bajo” o “muy alto”, lo que facilita en gran medida el entendimiento y uso de la herramienta por parte de los interesados.

En primera instancia, se plantea la formulación de dos modelos matemáticos independientes. El primero de ellos tiene por objetivo reproducir los trasvases realizados a la cuenca del Segura, mientras que el segundo estima las sueltas realizadas al Tajo; cada uno en función de variables que caracterizan la disponibilidad hídrica del sistema implicado. Dichos modelos son calibrados y validados utilizando técnicas de validación cruzada y, posteriormente, se realiza su integración para el cálculo de los volúmenes embalsados en la cabecera del Tajo por medio de un balance hídrico.

Por último, la predicción de caudales y volúmenes se lleva a cabo incorporando el procedimiento para la predicción de aportaciones a la cabecera del Tajo establecido en las reglas oficiales de explotación del Trasvase Tajo-Segura. Con el fin de verificar la fiabilidad de los resultados y su potencial aplicación para la obtención de predicciones estacionales de los caudales trasvasados, los resultados obtenidos son, finalmente, comparados con los observados durante el período histórico empleando índices de bondad de predicciones.

2. CASO DE ESTUDIO: TRASVASE TAJO-SEGURA

2.1. Orígenes del trasvase

La primera mención sobre una posible transferencia de aguas desde la cuenca del Tajo hacia la cuenca del Segura, propuesta con la idea de hacer frente al “desequilibrio hidrográfico” observado en la Península Ibérica, se registra en el Plan Nacional de Obras Hidráulicas de 1933 (Lorenzo Pardo, 1933). Sin embargo, el altísimo costo de las obras necesarias para su implementación, que incluían la construcción de los vastos embalses de Entrepeñas y Buendía en la cabecera del Tajo, hacían que, por esas fechas, la realización del proyecto fuera económicamente inviable (Gallego Bernard & Sánchez Pérez, 2006).

Años más tarde, a mediados de la década de 1950, los embalses que conforman el llamado “pretrasvase”, Entrepeñas y Buendía, fueron finalmente construidos. Si bien su objetivo original era el de proveer regulación para futuros regadíos locales y para la producción de energía hidroeléctrica, el hecho de que estos embalses estuviesen ya construidos mejoraba considerablemente los resultados de una posible evaluación económica, ya que con esto se reducían, de manera significativa, los costos de inversión requeridos para la implementación del mega proyecto (Gallego Bernard & Sánchez Pérez, 2006). Bajo este escenario, en 1967 se termina publicando el Anteproyecto General del Aprovechamiento Conjunto de los Recursos Hidráulicos del Centro y Sureste de España, Complejo Tajo-Segura, donde se dictaminan las bases para la cimentación y operación del futuro trasvase, justificando el proyecto en la existencia de recursos “excedentes” que podrían ser traspasados desde la cuenca del Tajo a la cuenca del Segura sin mayores afecciones a la cuenca cedente (Martín Mendiluce & Pliego Gutiérrez, 1967).

Finalmente, las obras del Trasvase Tajo-Segura fueron autorizadas en 1968 y su construcción se extendió hasta 1979, cuando comenzó la fase de pruebas y llegaron a la cuenca del Segura las primeras aguas provenientes del río Tajo. Tras dos años de pruebas, y cuarenta y ocho en total desde su concepción, en 1981 comienza definitivamente la puesta en marcha del

Acueducto Tajo-Segura, el cual, a pesar de las dificultades, ha permanecido en operación de forma prácticamente ininterrumpida hasta el día de hoy (Payán Villarrubia, 2018).

2.2. Descripción general del sistema

El Acueducto Tajo-Segura trasvasa, hacia la cuenca del río Segura, una parte de las aguas que han sido previamente reguladas en la cabecera del río Tajo. La derivación comienza en el embalse de Bolarque, que recibe las aguas almacenadas en los embalses de Entrepeñas y Buendía, cuya regulación es gestionada de manera conjunta, existiendo incluso un canal que conecta ambos. Desde allí el caudal a trasvasar es bombeado hacia el embalse de La Bujeda, sorteando un desnivel de 275 metros, para luego transportarse gravitacionalmente, a lo largo de un trayecto de 93 kilómetros que incluye tramos de canal, acueductos y túneles, hasta el embalse de Alarcón, que actúa como elemento de tránsito en la cuenca del Júcar. Aguas abajo de Alarcón, el caudal trasvasado es conducido a través de un segundo tramo gravitacional, de aproximadamente 134 kilómetros de longitud, que en su tramo final salva la divisoria Júcar-Segura mediante el túnel de Talave, de 32 kilómetros de largo y profundidades comprendidas entre 200 y 300 metros. Finalmente, las aguas transferidas son depositadas en el embalse de Talave, en el río Mundo (afluente del Segura), para luego ser reguladas y distribuidas a los distintos usuarios por medio de las instalaciones del “postrasvase” en la cuenca del Segura (Confederación Hidrográfica del Segura, s. f.). El perfil en elevación del trazado del trasvase es presentado en la Figura 2.1, mientras que en la Figura 2.2 se muestra un esquema de su ubicación en planta.

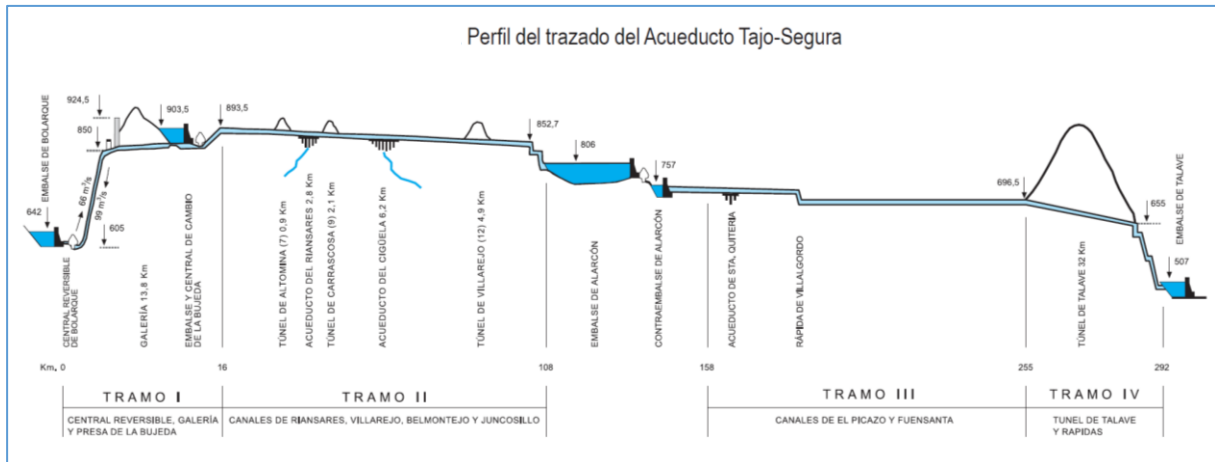


Figura 2.1. Perfil en elevación del trazado del Acueducto Tajo-Segura (Confederación Hidrográfica del Segura, s. f.).



Figura 2.2. Esquema en planta del Trasvase Tajo Segura (Morales Gil et al., 2005).

2.3.Reglas de explotación

Desde el comienzo de su operación, las reglas de explotación del Trasvase Tajo-Segura se han fundamentado sobre los textos legales que identifican los principales objetivos de su funcionamiento. De esta manera, a lo largo de los más de 40 años que el trasvase lleva en operación, la evolución de sus reglas de explotación ha estado marcada por la publicación de distintas leyes y decretos que han definido o modificado las disposiciones de su funcionamiento.

Los primeros criterios de explotación del trasvase fueron especificados en la Ley 21/1971, donde, en conformidad con el anteproyecto publicado en 1967, se autorizó la transferencia de caudales regulados excedentes del río Tajo hacia la cuenca del Segura, hasta un máximo anual de 600 [hm³]. También se especificaba que, realizadas las obras de regulación requeridas para satisfacer correctamente las necesidades de la cuenca del Tajo, dicho límite podría ser ampliado, durante una segunda fase, a 1000 [hm³] anuales. Sin embargo, dado que las aportaciones medias a los embalses de cabecera han disminuido enormemente desde que se puso en marcha el trasvase (Payán Villarrubia, 2018), hasta el día de hoy no han podido ser satisfechas las condiciones necesarias para implementar dicha ampliación.

Poco antes del comienzo de la operación del trasvase, el Real Decreto 1982/1978 dispuso que la gestión técnica de su explotación, desde la toma en el río Tajo hasta el desagüe en el embalse de Talave, quedaría a cargo de la Confederación Hidrográfica del Tajo, mientras que, para la supervisión del régimen de explotación y la coordinación de las Confederaciones Hidrográficas interesadas, debía constituirse la Comisión Central de Explotación del Acueducto Tajo-Segura (en adelante CCEATS). Más tarde, en el Real Decreto 2530/1985, se precisaron y ampliaron las atribuciones de esta comisión, otorgándosele, en circunstancias hidrológicas normales, la facultad de decidir sobre los volúmenes y caudales trasvasables, previo informe de las Confederaciones Hidrográficas afectadas. Durante circunstancias hidrológicas excepcionales, las cuales no quedaban definidas de forma explícita, la comisión procedería a elevar su propuesta al Consejo de Ministros, siendo ellos los encargados de definir, finalmente, el caudal trasvasable.

Como última disposición antes del comienzo de la explotación del acueducto, en la Ley 52/1980 se hizo hincapié en que, mediante la regulación adecuada, las aguas que se trasvasasen a la cuenca del Segura debían ser, en todo momento, excedentarias en la cuenca del Tajo, es decir, que el volumen transferible no superaría, en ningún caso, al volumen que restase luego de ser satisfechas todas las necesidades hídricas de la cuenca cedente. La misma ley dictaminó que el futuro Plan Hidrológico de la cuenca del Tajo sería el responsable de identificar los usos existentes y potenciales de esta cuenca y, por lo tanto, de determinar la magnitud de los excedentes. Mientras no se publicara dicho Plan Hidrológico, debía constituirse una comisión, con representantes del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, del Ministerio de Agricultura y de los Entes autonómicos afectados, que determinaría los caudales precisos requeridos por la cuenca cedente. Sin perjuicio de lo anterior, y a modo de garantía para la cuenca del Tajo, en la ley se especificó que antes de su confluencia con el río Jarama, en Aranjuez, el caudal del río Tajo no debía ser inferior a 6 [m³/s].

La operación del trasvase comenzaría con las disposiciones previamente descritas y la normativa a la que se ajustaba su explotación se mantendría prácticamente inalterada durante los siguientes 18 años. Esta etapa culminaría con la publicación del Real Decreto 1664/1998, mediante el cual se aprobaron los primeros Planes Hidrológicos de cuenca, entre ellos el de la cuenca del Tajo. En este Plan Hidrológico se especificaron, entre otras, cuatro disposiciones relevantes para la gestión del Trasvase Tajo-Segura:

- Se identificaron los usos consuntivos anuales de la cuenca del Tajo, correspondientes a 370 [hm³], por lo que los desembalses realizados hacia dicha cuenca no debiesen ser inferiores a ese valor.
- Se estableció la existencia de agua excedentaria en la cuenca del Tajo únicamente cuando las reservas conjuntas embalsadas en Entrepeñas y Buendía superen los 240 [hm³], por lo que, en caso de que el volumen embalsado en la cabecera del Tajo fuese menor que dicho valor, no podría efectuarse trasvase alguno.

- Se especificó que la programación de los volúmenes trasvasables, sin exceder el máximo anual establecido, quedaría a cuenta del usuario de las aguas trasvasadas, por lo que los beneficiarios del recurso tendrían la facultad de decidir cuándo serán efectivamente trasvasados los volúmenes previamente autorizados.
- Se definieron, finalmente, las condiciones hidrológicas excepcionales por las que, según el Real Decreto 2530/1985, la CCEATS debía elevar su propuesta de caudal trasvasable al Consejo de Ministros. Según lo publicado, estas condiciones hidrológicas excepcionales se alcanzarían cuando el volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía no logre superar los umbrales dispuestos en la Tabla 2.1 (Confederación Hidrográfica del Tajo, 1999):

Tabla 2.1. Volúmenes límite embalsados en Entrepeñas y Buendía, medidos en hectómetros cúbicos, por debajo de los cuales se establecen condiciones hidrológicas excepcionales (Confederación Hidrográfica del Tajo, 1999).

oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep
456	467	476	493	495	496	504	541	564	554	514	472

De manera complementaria y tomando en consideración las disposiciones establecidas en el Plan Hidrológico de la cuenca del Tajo, la CCEATS desarrolló en 1997 el documento “Una regla de explotación para la programación de trasvases del acueducto Tajo-Segura”, donde adoptó, aunque solo con carácter interno y orientativo, las que serían las primeras reglas de explotación propiamente definidas para el Trasvase Tajo-Segura (de Lucas Sepúlveda, 2019). En estas reglas se establecían cuatro niveles de explotación, para los cuales se especificaban distintos volúmenes mensuales trasvasables, cada uno en función de las existencias conjuntas embalsadas en Entrepeñas y Buendía al primer día de cada mes, como también de las aportaciones acumuladas en dichos embalses durante los doce meses anteriores. Si bien las magnitudes de los volúmenes trasvasables y de los umbrales que definían cada nivel de explotación fueron actualizadas en 2014 y en 2021, la estructura general de las reglas diseñadas por la CCEATS en 1997 se ha mantenido invariable hasta el día de hoy.

A continuación, se presenta una síntesis de las disposiciones específicas con las que se ha llevado a cabo la explotación del Trasvase Tajo-Segura a lo largo de su vida útil, desde su puesta en marcha hasta el presente:

2.3.1. Comienzo de la explotación del ATS (desde 1980 hasta 1998)

Durante este período, a falta de reglas específicas para su explotación, el trasvase se gestiona considerando las disposiciones generales vigentes en ese momento:

- En cada año hidrológico es posible trasvasar un máximo de 600 [hm³] desde la cuenca del río Tajo hasta la cuenca del río Segura.
- Bajo circunstancias hidrológicas normales, es la CCEATS la que define el volumen mensual trasvasable. Por el contrario, en caso de presentarse condiciones hidrológicas excepcionales, las cuales no se especifican en la normativa, la CCEATS debe elevar su propuesta al Consejo de Ministros, para que ellos definan, finalmente, el volumen mensual trasvasable.
- Los desembalses hacia el río Tajo deben garantizar un caudal mínimo de 6 [m³/s] en el mismo río antes de su confluencia con el río Jarama, en su paso por Aranjuez.

2.3.2. Primera regla de explotación del ATS (desde 1998 hasta 2014)

A partir de 1998, el trasvase se gestiona considerando la regla de explotación diseñada por la CCEATS, la cual se fundamenta en las disposiciones establecidas en el Plan Hidrológico de la cuenca del Tajo. Sin embargo, estas reglas no poseen carácter de ley, por lo que su aplicación no es estricta y solo constituyen un apoyo interno y orientativo a la toma de decisiones por parte de la CCEATS. Teniendo esto en consideración, las disposiciones con las que se gestiona el trasvase durante el período descrito son las siguientes:

- En cada año hidrológico es posible trasvasar un máximo de 600 [hm³] desde la cuenca del río Tajo hasta la cuenca del río Segura (se mantiene la disposición del período anterior).
- Se establece una regla de explotación en la que se determinan cuatro niveles de volumen mensual trasvasable, en función de la disponibilidad hídrica de la cuenca cedente a comienzos del mes. Los criterios de dicha regla se describen en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2. Niveles de explotación según la Regla de Explotación de 1997 (CEDEX, 2020).

Nivel	Condiciones	Volumen trasvasable [hm ³ /mes]
1	Existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía iguales o mayores que 1500 [hm³] o aportaciones conjuntas entrantes a estos embalses en los últimos doce meses iguales o mayores que 1000 [hm³] .	68
2	Existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía inferiores a 1500 [hm³] , sin llegar a los volúmenes previstos en Nivel 3, y aportaciones conjuntas registradas en los últimos doce meses inferiores a 1000 [hm³] .	38
3	Condiciones hidrológicas excepcionales. Existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía inferiores, a comienzos de mes, a los valores mostrados en la Tabla 2.1 , sin llegar a los volúmenes previstos en Nivel 4.	Máximo 23
4	Existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía inferiores a 240 [hm³] .	0

Al cumplirse las condiciones para la determinación de los niveles 1, 2 o 4, el volumen trasvasable del mes correspondiente queda definido automáticamente según la regla. En caso de identificarse condiciones hidrológicas excepcionales, es decir, condiciones que determinan el nivel 3, la CCEATS debe elevar al Consejo de Ministros una propuesta de volumen trasvasable comprendido entre 0 [hm³] y 23 [hm³]. Cabe destacar que, a excepción del volumen trasvasable en nivel 4, cuya regla de explotación está especificada en el Plan Hidrológico, el resto de los volúmenes

descritos en la tabla son meramente orientativos, por lo que, en la práctica, su aplicación no resulta obligatoria.

- Bajo circunstancias hidrológicas normales, es la CCEATS la que define el volumen mensual trasvasable. Por el contrario, en caso de presentarse condiciones hidrológicas excepcionales, la CCEATS debe elevar su propuesta al Consejo de Ministros, para que ellos definan, finalmente, el volumen mensual trasvasable (se mantiene la disposición del período anterior, con la salvedad de que, en este caso, se han definido explícitamente los criterios para la determinación de condiciones hidrológicas excepcionales).
- La normativa establece que son los usuarios de las aguas trasvasadas los que proponen la programación de los volúmenes trasvasables, es decir, que ellos son los que determinan cuándo se transferirán los volúmenes previamente autorizados. Esto implica que, durante algunos meses, el volumen realmente trasvasado será mayor que el volumen trasvasable autorizado para el respectivo mes, ya que existe la posibilidad de postergar la transferencia de volúmenes que hayan quedado pendientes de trasvasar durante los meses previos.
- Los desembalses hacia el río Tajo deben garantizar un caudal mínimo de 6 [m³/s] en el mismo río antes de su confluencia con el río Jarama, en su paso por Aranjuez (se mantiene la disposición del período anterior). A esta regla se incorpora la obligación de asegurar un desembalse anual mínimo de 370 [hm³] hacia la misma cuenca.

2.3.3. Segunda regla de explotación del ATS (desde 2014 hasta 2021)

A fines de 2013, la Ley 21/2013 modifica la naturaleza jurídica de las reglas de explotación del trasvase diseñadas por la CCEATS en 1997, otorgándoles carácter de ley, por lo que, desde ese momento, su aplicación pasa a ser obligatoria.

Durante el año siguiente, se publica el Real Decreto 773/2014, un documento legal, de estricto cumplimiento, que, manteniendo la estructura de las reglas de explotación previamente vigentes, incorpora modificaciones a los umbrales y volúmenes trasvasables, a la vez que establece nuevas disposiciones que norman los desembalses realizados hacia la cuenca del Tajo. Incorporando estas modificaciones y nuevas normativas, además de las disposiciones indicadas en la Ley 21/2013, las reglas de explotación vigentes durante este período establecen lo siguiente:

- En cada año hidrológico es posible trasvasar un máximo de 600 [hm³] desde la cuenca del río Tajo hasta la cuenca del río Segura (se mantiene la disposición del período anterior).
- Se aumentan los umbrales que establecen la presencia de condiciones hidrológicas excepcionales. Se considera que existen estas condiciones si el volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía no logra superar los volúmenes dispuestos en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3. Volúmenes límite embalsados en Entrepeñas y Buendía, medidos en hectómetros cúbicos, por debajo de los cuales se establecen condiciones hidrológicas excepcionales (Real Decreto 773/2014, 2014).

oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep
613	609	605	602	597	591	586	645	673	688	661	631

- Se modifican los umbrales que delimitan cada uno de los niveles definidos en la regla de explotación original, a la vez que se reducen algunos de los volúmenes trasvasables asociados a dichos niveles. Los criterios que establece la nueva regla de explotación se describen en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4. Niveles de explotación según la Regla de Explotación de 2014 (Real Decreto 773/2014, 2014).

Nivel	Condiciones	Volumen trasvasable [hm ³ /mes]
1	Existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía iguales o mayores que 1300 [hm³] o aportaciones conjuntas entrantes a estos embalses en los últimos doce meses iguales o mayores que 1200 [hm³] .	60
2	Existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía inferiores a 1300 [hm³] , sin llegar a los volúmenes previstos en Nivel 3, y aportaciones conjuntas registradas en los últimos doce meses inferiores a 1200 [hm³] .	38
3	Condiciones hidrológicas excepcionales. Existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía inferiores, a comienzos de mes, a los valores mostrados en la Tabla 2.3 , sin llegar a los volúmenes previstos en Nivel 4.	Máximo 20
4	Existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía inferiores a 400 [hm³] .	0

De igual manera que ocurre durante el período anterior, en caso de cumplirse las condiciones para la determinación de los niveles 1, 2 o 4, el volumen trasvasable queda definido automáticamente según lo que indica la regla, debiendo éste ser autorizado por la CCEATS. Por el contrario, en caso de identificarse condiciones hidrológicas excepcionales, la CCEATS debe elevar, durante este período, su propuesta de volumen trasvasable, comprendido entre 0 [hm³] y 20 [hm³], al Ministro que tenga atribuidas las competencias en materia de agua, para que éste defina, finalmente, el volumen mensual trasvasable.

En general, los cambios aplicados a la regla de explotación entran en vigor el 1 de octubre de 2014, al comenzar el año hidrológico siguiente a la publicación del Real Decreto 773/2014. Sin embargo, la Ley 21/2013 establece que, tanto el nivel de referencia que especifica los excedentes trasvasables (el cual determina el umbral entre los niveles 3 y 4 de aplicación de la regla), como la curva de volúmenes que define la situación de condiciones hidrológicas excepcionales (que determina el umbral entre

los niveles 2 y 3 de aplicación de la regla), deberán aumentarse de manera escalonada en el tiempo, estableciéndose un régimen transitorio y anualmente homogéneo para su incremento, de modo que los valores definitivos, presentados en la Tabla 2.4, resulten completamente implementados en enero de 2018. La curva que representa dicho aumento, considerando lo dispuesto en la ley, corresponde a la presentada en la Figura 2.3:

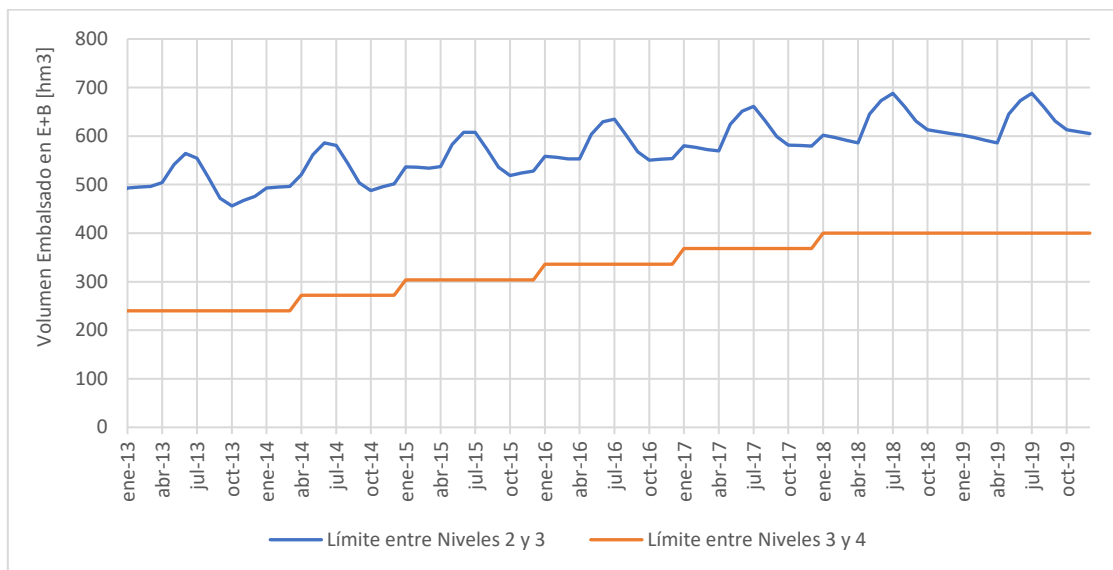


Figura 2.3. Evolución, entre 2013 y 2019, de los umbrales que delimitan los niveles 3 y 4 de la regla de explotación del trasvase.

- La normativa establece que son los usuarios de las aguas trasvasadas los que proponen la programación de los volúmenes trasvasables, es decir, que ellos son los que determinan cuándo se transferirán los volúmenes previamente autorizados. Esto implica que, durante algunos meses, el volumen realmente trasvasado será mayor que el volumen trasvasable autorizado para el respectivo mes, ya que existe la posibilidad de postergar la transferencia de volúmenes que hayan quedado pendientes de trasvasar durante los meses previos (se mantiene la disposición del período anterior). Se especifica, además, que “Los recursos cuyo trasvase haya sido ya autorizado podrán ser utilizados por sus usuarios a lo largo del año hidrológico, hasta el final del mismo.” (Ley 21/2013, 2013), por lo que no se podrán postergar para el año hidrológico siguiente, los trasvases autorizados durante el año en curso.

- En relación con las sueltas hacia el río Tajo, la normativa especifica los volúmenes mensuales que se deben desembalsar desde la presa de Bolarque para satisfacer las necesidades ambientales y socioeconómicas de la cuenca cedente. En consecuencia, las sueltas mensuales que se realicen hacia el río Tajo no pueden superar en más de un 25%, durante escenarios de operación normal, a los desembalses de referencia presentados en la Tabla 2.5. Además, sin considerar el caudal que se vierta por aliviaderos de emergencia, se establece un volumen máximo anual de desembalse igual a 365 [hm³].

Tabla 2.5. Desembalses de referencia hacia la cuenca del Tajo, medidos en hectómetros cúbicos (Real Decreto 773/2014, 2014).

oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep
25	18	19	19	18	23	23	31	42	60	51	36

2.3.4. Tercera regla de explotación del ATS (desde 2021 hasta la fecha)

Desde la entrada en vigor de las reglas de explotación correspondientes al período anterior, la frecuencia de situaciones hidrológicas excepcionales y de ausencia de recursos trasvasables resultaron ser muy superiores a las esperadas, a la vez que, durante el mismo período, las aportaciones a la cabecera del Tajo experimentaron un notable descenso. Ante esto, con el objetivo de dotar de mayor estabilidad a los suministros, minimizando la presentación de situaciones excepcionales, en 2021 se publica una actualización de las normas de explotación del Trasvase Tajo-Segura (Real Decreto 638/2021, 2021).

El Real Decreto 638/2021 propone únicamente dos cambios sobre la normativa vigente hasta aquel momento. El primero consiste en reducir el volumen trasvasable en nivel 2 de 38 [hm³] a 27 [hm³], mientras que el segundo radica en aumentar el umbral de aportaciones acumuladas que determina el límite entre los niveles 1 y 2 de 1200 [hm³] a 1400 [hm³]. Tomando en cuenta estas modificaciones, las disposiciones que rigen la explotación del Trasvase Tajo-Segura desde agosto de 2021 hasta la fecha de hoy, son las siguientes:

- En cada año hidrológico es posible trasvasar un máximo de 600 [hm³] desde la cuenca del río Tajo hasta la cuenca del río Segura (se mantiene la disposición del período anterior).
- Los umbrales que establecen la presencia de condiciones hidrológicas excepcionales no sufren modificaciones con respecto al período anterior. Por lo tanto, se considera que existen dichas condiciones en caso de que el volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía no logre superar los volúmenes dispuestos en la Tabla 2.3, presentada en el apartado anterior.
- Como se ha mencionado, durante este período se reduce el volumen trasvasable en nivel 2 y se aumenta el umbral de aportaciones acumuladas que determina el límite entre los niveles 1 y 2. Dichas modificaciones se incorporan en la Tabla 2.6:

Tabla 2.6. Niveles de explotación según la Regla de Explotación de 2021 (Real Decreto 638/2021, 2021).

Nivel	Condiciones	Volumen trasvasable [hm ³ /mes]
1	Existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía iguales o mayores que 1300 [hm³] o aportaciones conjuntas entrantes a estos embalses en los últimos doce meses iguales o mayores que 1400 [hm³] .	60
2	Existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía inferiores a 1300 [hm³] , sin llegar a los volúmenes previstos en Nivel 3, y aportaciones conjuntas registradas en los últimos doce meses inferiores a 1400 [hm³] .	27
3	Condiciones hidrológicas excepcionales. Existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía inferiores, a comienzos de mes, a los valores mostrados en la Tabla 2.3 , sin llegar a los volúmenes previstos en Nivel 4.	Máximo 20
4	Existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía inferiores a 400 [hm³] .	0

De igual manera que ocurre durante el período anterior, en caso de cumplirse las condiciones para la determinación de los niveles 1, 2 o 4, el volumen trasvasable queda definido automáticamente según lo que indica la regla, debiendo éste ser autorizado por la CCEATS. Por el contrario, en caso de identificarse condiciones hidrológicas excepcionales, la CCEATS debe elevar, durante este período, su propuesta de volumen trasvasable, comprendido entre 0 [hm³] y 20 [hm³], al Ministro que tenga atribuidas las competencias en materia de agua, para que éste defina, finalmente, el volumen mensual trasvasable.

- No se modifica la normativa que establece que los usuarios de las aguas trasvasadas son los que proponen la programación de los volúmenes trasvasables, por lo que las disposiciones referentes a este tema se mantienen invariables con respecto a lo establecido durante el período anterior. “Los recursos cuyo trasvase haya sido ya autorizado podrán ser utilizados por sus usuarios a lo largo del año hidrológico, hasta el final del mismo.” (Ley 21/2013, 2013).
- Tampoco se consideran modificaciones sobre la normativa referente a los desembalses que se realicen hacia el río Tajo. Por lo tanto, las sueltas mensuales que se ejecuten hacia la cuenca cedente no pueden superar en más de un 25%, durante escenarios de operación normal, a los desembalses de referencia presentados en la Tabla 2.5, dispuesta en el apartado anterior. De igual forma, se mantiene constante el volumen máximo anual desembalsable, por lo que las sueltas acumuladas durante cada año hidrológico no pueden superar los 365 [hm³].

3. METODOLOGÍA

3.1. Fundamentos generales de la Lógica Difusa

La lógica difusa hace referencia a estructuras o reglas lógicas del tipo “si ocurre X y ocurre Y, entonces ocurre Z”, donde las variables participantes no pertenecen a conjuntos determinados según la teoría clásica, sino que están definidas dentro de lo que se conoce como conjuntos difusos (Mamdani, 1974). Estos conjuntos tienen la particularidad de poseer fronteras flexibles, lo que permite definir grados de pertenencia parcial de los elementos al propio conjunto, relajando las limitaciones estrictas de “pertenencia” o “no pertenencia” que caracterizan a los conjuntos tradicionales (Zadeh, 1965). Esta cualidad es la que hace posible una de las características más llamativas de los sistemas desarrollados bajo esta metodología: la capacidad de expresar matemáticamente conceptos lingüísticos, como “muy frío” o “demasiado rápido”, que incorporan en su definición cierto grado de incertidumbre. Lo anterior, sumado a que para la formulación de las sentencias lógicas que componen el sistema difuso no resulta necesario tener un conocimiento acabado de la función mediante la cual se relacionan las distintas variables que lo componen, deriva en la capacidad que tienen estos sistemas de adaptarse fácilmente a la estructura del pensamiento humano, el cual realiza operaciones y evalúa resultados en función de múltiples variables, normalmente definidas en términos imprecisos, y aun así es capaz de generar soluciones válidas y efectivas.

A diferencia de los sistemas desarrollados por medio de la teoría clásica, los elaborados sobre la base de la lógica difusa no tienen como principal objetivo la maximización de la precisión en la reproducción de la realidad, sino que intentan conseguir aproximaciones intuitivas y flexibles, capaces de incorporar y asumir la incertidumbre presente en las distintas variables (Macián Sorribes, 2012). Debido a esto, los sistemas difusos se vuelven, en cierta medida, tolerantes a la incorporación de datos inexactos y, por lo tanto, permiten adaptarse a situaciones de escasez o ausencia de datos, o falta de precisión en los mismos.

Sobre la conceptualización de los sistemas difusos, resulta importante destacar que ésta es estructurada y matemáticamente simple, sencilla de entender y de modificar, por lo que las

sentencias que lo componen son adaptables, sin la necesidad de grandes modificaciones, a condiciones distintas a la que se usaron en su formulación inicial. Por este mismo motivo, los sistemas desarrollados por medio de la lógica difusa permiten la incorporación de la experiencia de expertos en la formulación de los resultados (Macián Sorribes, 2012) de forma simple y concreta.

3.2. Estado del arte: Lógica Difusa y su aplicación a la gestión de embalses

La gestión de los recursos hídricos ha sufrido, durante el último tiempo, un importante impacto producto de las alteraciones que el cambio climático y los cambios en los usos del suelo han generado sobre las variables hidrológicas. Es así, que la formulación de nuevos enfoques capaces de incorporar las presentes condiciones de incertidumbre, como hace la lógica difusa, resulta esencial para la superación de esta problemática (Simonovic, 2009).

Con el objetivo de mejorar el nivel de aceptación hacia los modelos matemáticos por parte de los operadores de embalses, reduciendo su complejidad y haciéndolos más comprensibles, Campbell (1993) desarrolló uno de los primeros modelos para la gestión de embalses basado en la teoría de los conjuntos difusos; donde, a partir de datos generados por un modelo de optimización matemática, simuló la operación de un embalse para la generación de energía hidroeléctrica mediante la formulación de reglas de operación definidas por medio de la lógica difusa.

Posteriormente, Russell y Campbell (1996) perfeccionaron un método de inferencia difusa aplicado a la gestión de embalses que, a partir de datos históricos o resultados de algoritmos matemáticos de optimización, permitía establecer la relación existente entre entradas y salidas de un sistema, determinando, a partir de estas, las reglas difusas que lo gobiernan. Para ello, los autores describieron secuencialmente el proceso y lo aplicaron a un embalse hidroeléctrico en el río Powell (Vancouver, Canadá). Shrestha et al. (1996), por su parte, realizaron un estudio similar, aunque desde otro punto de vista basado fundamentalmente en datos históricos. Los autores especificaron, también, un método de inferencia difusa, pero con un enfoque matemático distinto al desarrollado por Russell y Campbell (1996) y aplicado

a un embalse multiobjetivo (generación hidroeléctrica, demandas industriales y de riego, control de avenidas, criterios ambientales, necesidades recreativas y regulación), el lago Tenkiller (Oklahoma, Estados Unidos).

Fontane et al. (1997) propusieron un modelo de gestión aplicado al embalse Great Mountain en el río Cache la Poudre (Colorado, Estados Unidos), en el que los números difusos y las condiciones de operación se estimaron a partir de encuestas aplicadas a los responsables de la toma de decisiones, mientras que los resultados para la determinación de las reglas difusas fueron obtenidos mediante la aplicación de programación dinámica difusa con un enfoque estocástico implícito. Posteriormente, Panigrahi y Mujumdar (2000) consideraron el caso de estudio del embalse Malaprabha (Karnataka, India), donde reemplazan el conocimiento de expertos por los resultados de un modelo estacionario, derivado de programación dinámica adaptada al sistema lógico difuso, pero con un enfoque estocástico explícito. Al año siguiente, Tilmant et al. (2001) también desarrollaron un modelo cuyos resultados fueron optimizados a partir de un algoritmo de programación dinámica difusa con enfoque estocástico explícito, con el que determinaron las reglas para la operación del embalse Mansour Eddahbi (Marruecos).

Dubrovin et al. (2002) construyeron un modelo basado en reglas difusas para la operación de embalses en tiempo real, considerando como caso de estudio el embalse regulador del lago Päijänne (Finlandia). En vez de considerar valores absolutos, los autores incorporaron valores relativos a la temporada del año en la definición de las variables del modelo, a la vez que comparan una nueva metodología, basada en sólidos fundamentos matemáticos y denominada *total fuzzy similarity* o “equivalencia difusa total”, con una de las más extendidas, la desarrollada a partir de la metodología de Takagi y Sugeno (1985), obteniéndose resultados similares en ambos casos.

Más adelante, Ramani Bai y Rom Tamjis (2007) utilizaron la metodología de lógica difusa de Mamdani para simular la gestión histórica de la presa Chenderoh (Perak, Malasia), considerando como datos de entrada al modelo el volumen almacenado en la presa, las aportaciones y el período temporal en la que se realizan las mediciones; y como datos de

salida las sueltas del embalse. Nourzad et al. (2009), en cambio, desarrollaron un modelo para la optimización de las sueltas de la presa Dez (Irán), que consideraba, en vez del período temporal, las demandas aguas abajo del embalse, mientras que utilizaba el método de optimización “búsqueda tabú”, en combinación con la lógica difusa, para la estimación de las sueltas.

Macián Sorribes (2012) propuso la aplicación de la lógica difusa en tres casos de estudio, correspondientes a la gestión de embalses ubicados en los ríos Sorbe, Esla y Mijares (España), respectivamente. Para los dos primeros se simuló la gestión histórica, mientras que, para el último, se reprodujo la gestión definida por un algoritmo matemático, obteniéndose resultados satisfactorios en todos los casos.

Durante el año siguiente, Cavallo et al. (2013) elaboraron un “sistema difuso automatizado de decisión y control” (AFDCS por sus siglas en inglés) con el que simularon tanto las sueltas del embalse Pozzillo (Sicilia, Italia) como la regulación de su compuerta. El modelo integrado desarrollado fue capaz de identificar condiciones de operación ordinarias y de sequía, presentando buenos desempeños en la reducción de las consecuencias producidas por escenarios de sequía y en el control de la compuerta de la presa.

Ahmadianfar et al. (2017) transformaron en números difusos los umbrales que determinaban los distintos niveles de la regla de operación con la que se gestionaban las sueltas en un sistema de múltiples embalses en Zohre (Irán). Al incluir zonas de transición entre los niveles de operación, junto con cambios graduales en el racionamiento, se mejoró entre un 10% y un 27% el rendimiento del sistema en escenarios de escasez hídrica a largo plazo.

Finalmente, con el objetivo de incorporar la experiencia de los operadores de las presas en la elaboración de las reglas de gestión, Rajendra et al. (2020) desarrollaron un modelo basado en la formulación de reglas difusas para la simulación de la gestión histórica del embalse Chandoli, en el río Warana (Maharashtra, India), en el cual se definieron números difusos para las aportaciones, volúmenes embalsados, demandas y sueltas. Los resultados obtenidos evidencian la capacidad del sistema difuso para el cumplimiento de los objetivos de gestión,

incorporando el conocimiento de expertos y simplificando su comprensión por parte de los operadores.

3.3. Definiciones y procedimientos matemáticos de la Lógica Difusa aplicada a la gestión de embalses

Las definiciones y procedimientos matemáticos descritos a continuación, y a partir de los cuales se desarrolla el presente estudio, se sustentan en la Teoría de los Conjuntos Difusos elaborada por Zadeh (1965), su aplicación en la modelación de sistemas mediante Lógica Difusa formulada por Takagi y Sugeno (1985) y las posteriores adaptaciones que Russell y Campbell (1996) incorporaron para su aplicación específica en la gestión de embalses.

3.3.1. *Números difusos y fuzzificación*

El elemento clave que diferencia a la lógica difusa de la lógica convencional corresponde a la capacidad que poseen las variables difusas de pertenecer en parte a una categoría y en parte a otra, con un cierto grado de pertenencia o “membresía” asociada a cada una de ellas. Este grado de pertenencia se describe numéricamente por medio de la asignación de valores entre 0 y 1, donde el 0 indica que la variable no pertenece a una categoría, el 1 indica que pertenece completamente a ella (al igual que en la lógica tradicional o cartesiana) y valores entre 0 y 1 indican diferentes grados de pertenencia parcial. Estos grados de pertenencia parcial quedan definidos por funciones matemáticas denominadas funciones de pertenencia, las cuales pueden adoptar distintas formas según los requerimientos específicos del problema a resolver. Sin embargo, en caso de cumplir con ciertas condiciones, estas funciones pasan a denominarse números difusos. En este caso de estudio, por ser los más empleados en aplicaciones prácticas, además de los más simples en su formulación, se considera el uso de números difusos lineales, equiespaciados y con forma triangular simétrica y homogénea (Russell & Campbell, 1996).

Para definir correctamente una variable en términos difusos, resulta necesario precisar tantos números difusos como categorías se consideren en su clasificación. La metodología propuesta

por Russel y Campbell (1996) propone que, si se han definido c categorías, el dominio de la variable debe dividirse en $c-1$ intervalos iguales. Luego, los vértices de cada número difuso quedan definidos por tres límites consecutivos de dichos intervalos, o dos en caso de los números difusos de los extremos, siendo el del centro el correspondiente a un grado de pertenencia total, mientras que los de los extremos representan una pertenencia nula, de forma que las categorías contiguas se superponen parcialmente (Macián Sorribes, 2012).

A modo de ejemplo, en la Figura 3.1 se presenta la conceptualización de los números difusos asociados a la variable temperatura ambiental, cuyo dominio queda definido en el rango $[-5, 45]$ grados centígrados y cuya clasificación se especifica en 5 categorías, que abarcan desde “Muy Frío” hasta “Muy Caluroso”. La variable se clasifica en $c=5$ categorías, por lo que, según el procedimiento descrito, su dominio debe dividirse en $c-1=4$ intervalos iguales, correspondientes a $[-5, 7.5]$, $[7.5, 20]$, $[20, 32.5]$ y $[32.5, 45]$, respectivamente. Luego, los números difusos triangulares, que se especifican en función de sus vértices, quedan definidos a partir de los límites consecutivos de dichos intervalos. De esta manera, el número difuso “Muy Frío” queda determinado por los vértices $[-5, -5, 7.5]$; el “Frío” queda determinado por los vértices $[-5, 7.5, 20]$; el “Templado” queda determinado por los vértices $[7.5, 20, 32.5]$; el “Caluroso” queda determinado por los vértices $[20, 32.5, 45]$; y, finalmente, el “Muy Caluroso” queda determinado por los vértices $[32.5, 45, 45]$. Así, cada categoría queda superpuesta con las contiguas, estableciéndose las zonas de pertenencia parcial que caracterizan a las variables difusas.

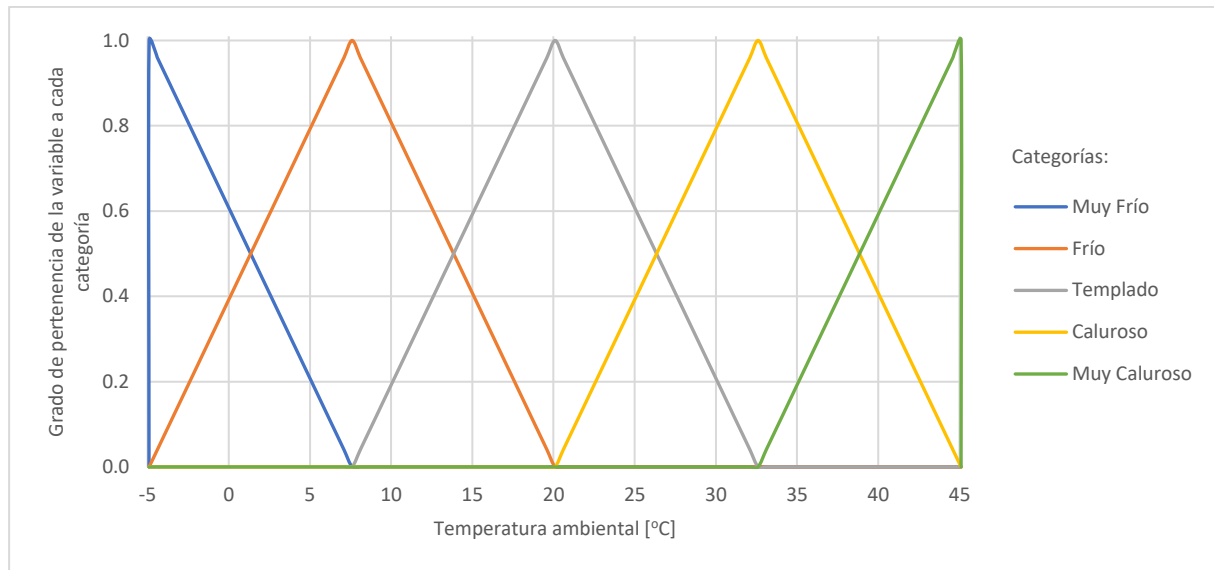


Figura 3.1. Ejemplo de números difusos triangulares homogéneos y equiespaciados (elaboración propia basada en (Russell & Campbell, 1996)).

Como se observa en el gráfico, un ambiente cuya temperatura alcanza los 5 [°C] es, según esta clasificación, principalmente “Frío”, ya que presenta un grado de pertenencia de 0.8 para dicha categoría, sin embargo, el mismo ambiente también puede considerarse, en parte, “Muy Frío”, ya que presenta un grado de pertenencia de 0.2 para esta última. Por el contrario, un lugar cuya temperatura alcanza los 32.5 [°C] es definitivamente “Caluroso”, por lo que su grado de pertenencia a dicha categoría es 1, mientras que para el resto es simplemente 0.

Finalmente, la determinación de los grados de pertenencia μ_{xi} de una variable x con respecto a cada una de las categorías de clasificación i , por medio de los números difusos definidos para ello, se conoce como fuzzificación de la variable (por la españolización del término *fuzzy*).

3.3.2. Método de inferencia difusa

Como se ha mencionado con anterioridad, la lógica difusa basa su funcionamiento en un conjunto de sentencias lógicas del tipo “si... entonces...”, por lo que es posible describir su estructura por medio de lo que se conoce como mapa asociativo difuso, el cual integra todas las reglas que definen el comportamiento del sistema. Este mapa agrupa todas las relaciones posibles entre las distintas variables de entrada, definidas en términos difusos, y sus

correspondientes datos de salida asociados, definidos en términos difusos o bien en valores no difusos, como se plantea en los modelos del tipo Takagi-Sugeno y en este mismo estudio. Como consideración, el mapa asociativo difuso de un modelo con n variables de entrada, cada una de ellas clasificada en c categorías, estaría compuesto por un total de c^n sentencias. Mientras más categorías se consideren, mayor será la precisión que podrá alcanzar el modelo, pero más grande será el mapa de reglas y más difícil será construirlo (Russell & Campbell, 1996).

A modo de ejemplo, si se desarrolla un modelo de lógica difusa con 2 variables de entrada y 1 variable de salida no difusa, como pueden ser: de entrada, las temperaturas x e y de dos lugares distintos, cuyos números difusos se definen según lo planteado en la Figura 3.1; y de salida una variable z cualquiera, el mapa asociativo del sistema estaría compuesto por $5^2=25$ sentencias, las cuales abarcarían todas las combinaciones posibles entre las variables. En las sentencias descritas, presentadas a continuación, los valores z_k corresponderían a las consecuencias de que x e y pertenezcan por completo a las categorías referenciadas en la correspondiente regla k .

Si x es	Muy Frío	e y es	Muy Frío	,	entonces z es	z_1
Si x es	Muy Frío	e y es	Frío	,	entonces z es	z_2
Si x es	Muy Frío	e y es	Templado	,	entonces z es	z_3
Si x es	Muy Frío	e y es	Caluroso	,	entonces z es	z_4
Si x es	Muy Frío	e y es	Muy Caluroso	,	entonces z es	z_5
Si x es	Frío	e y es	Muy Frío	,	entonces z es	z_6
Si x es	Frío	e y es	Frío	,	entonces z es	z_7
Si x es	Frío	e y es	Templado	,	entonces z es	z_8
Si x es	Frío	e y es	Caluroso	,	entonces z es	z_9
Si x es	Frío	e y es	Muy Caluroso	,	entonces z es	z_{10}
Si x es	Templado	e y es	Muy Frío	,	entonces z es	z_{11}
Si x es	Templado	e y es	Frío	,	entonces z es	z_{12}
Si x es	Templado	e y es	Templado	,	entonces z es	z_{13}
Si x es	Templado	e y es	Caluroso	,	entonces z es	z_{14}
Si x es	Templado	e y es	Muy Caluroso	,	entonces z es	z_{15}
Si x es	Caluroso	e y es	Muy Frío	,	entonces z es	z_{16}
Si x es	Caluroso	e y es	Frío	,	entonces z es	z_{17}
Si x es	Caluroso	e y es	Templado	,	entonces z es	z_{18}

Si x es	Caluroso	e y es	Caluroso	,	entonces z es	Z_{19}
Si x es	Caluroso	e y es	Muy Caluroso	,	entonces z es	Z_{20}
Si x es	Muy Caluroso	e y es	Muy Frío	,	entonces z es	Z_{21}
Si x es	Muy Caluroso	e y es	Frío	,	entonces z es	Z_{22}
Si x es	Muy Caluroso	e y es	Templado	,	entonces z es	Z_{23}
Si x es	Muy Caluroso	e y es	Caluroso	,	entonces z es	Z_{24}
Si x es	Muy Caluroso	e y es	Muy Caluroso	,	entonces z es	Z_{25}

Al disponer de datos observados para las variables de entrada x e y , la salida z determinada por el modelo se calcularía mediante una ponderación de los valores z_k definidos para cada regla, en relación con el peso w_k que cada sentencia aporta al resultado según los grados de pertenencia que las variables x e y presentan para las categorías referenciadas en cada una de estas sentencias. En términos matemáticos, lo anterior queda expresado en la Ecuación (1):

$$z = \frac{\sum(w_k \cdot z_k)}{\sum w_k} \quad (1)$$

Con el objetivo de otorgar mayor relevancia a las sentencias que presentan altos grados de cumplimiento, Russell y Campbell (1996) proponen que los pesos w_k sean calculados como el cuadrado de la multiplicación de los grados de pertenencia (o fuzzificación) de las variables de entrada con respecto a las categorías referenciadas en la regla correspondiente. Lo anterior queda descrito, en términos matemáticos, por medio de la Ecuación (2), donde i y j hacen referencia, respectivamente, a los números difusos de las variables x e y , asociados a la sentencia k :

$$w_k = (\mu_{xi} \cdot \mu_{yj})^2 \quad (2)$$

La dificultad en la formulación de las reglas que definen el comportamiento del modelo recae, por lo tanto, en la determinación de los valores z_k que adopta la variable de salida para cada una de las sentencias descritas en el mapa asociativo difuso. Esto se puede abordar,

principalmente, de 3 maneras: 1) intentando emular las decisiones que tomaría una persona experta, definiendo explícitamente cada uno de los valores de salida, basándose únicamente en el conocimiento y la experiencia del experto; 2) por medio de un método de inferencia difusa que permita establecer cada uno de estos resultados, en función de la relación existente entre una serie de datos de las variables de entrada y su correspondiente serie de datos de la variable de salida; o 3) por medio de una conjunción entre ambas alternativas, donde el conocimiento experto corrija y perfeccione los resultados generados por el método de inferencia difusa. Cabe destacar que la experiencia del experto o las series de datos pueden ser, perfectamente, reemplazadas por los resultados de modelos deterministas, estocásticos o de optimización, dependiendo de la disponibilidad de recursos y de cuáles sean los objetivos del trabajo.

En el presente estudio, los resultados que definen las reglas del mapa asociativo difuso son calculados mediante una adaptación del método de inferencia difusa descrito por Russell y Campbell (1996), a partir de series de datos observados. Luego, estos resultados son corregidos utilizando un método de autoría propia, descrito en el apartado 3.7 de este informe.

En términos específicos, el método de inferencia difusa considerado para el desarrollo de este estudio queda descrito por medio del siguiente procedimiento:

1. Se define el problema con la mínima cantidad de variables de entrada posibles.
2. Se define cada variable de entrada en términos difusos, clasificándolas todas en una misma cantidad de categorías y precisando, para cada una de ellas, números difusos triangulares homogéneos y equiespaciados.
3. Se fuzzifica cada dato de entrada con respecto a cada uno de sus números difusos, es decir, se identifica el grado de pertenencia μ_{xi} de cada dato de entrada en relación con cada una de las categorías mediante las cuales fue clasificada la variable correspondiente. Para cada dato, solo uno o dos grados de pertenencia

deben ser mayores que cero, ya que, por la forma en la que se han definido los números difusos, no es posible que un valor pertenezca, parcialmente, a más de dos categorías. Por otra parte, Russell y Campbell (1996) plantean que los resultados del método de inferencia difusa mejoran al no considerar los grados de pertenencia pequeños, por lo que las fuzzificaciones que resulten menores que un valor ε_1 , se consideran no significativas y, por lo tanto, se igualan a 0.

4. Para cada set de datos de entrada m , que incorpora los valores x_m e y_m de las variables de entrada asociados a un mismo dato de salida z_m , se calculan los pesos w_{km} correspondientes a cada regla difusa k , para cada set de datos m . Lo anterior se realiza por medio de la Ecuación (3):

$$w_{km} = (\mu_{x_{mi}} \cdot \mu_{y_{mj}})^2 \quad (3)$$

5. Por último, el valor de salida z_k asociado a cada regla difusa k , también conocido como salida agrupada, se obtiene ponderando las salidas observadas z_{km} por el peso w_{km} que cada set de datos m aporta al resultado de la regla k . Esto se lleva a cabo utilizando la Ecuación (4):

$$z_k = \frac{\sum (w_{km} \cdot z_{km})}{\sum w_{km}} \quad (4)$$

Luego de ejecutar el procedimiento recién descrito, quedan definidas todas aquellas reglas del mapa asociativo difuso cuyas condiciones sean satisfechas por alguno de los sets de datos de entrada. De esta manera, las relaciones existentes entre los datos observados ya han sido incorporadas al modelo y, por lo tanto, éste será capaz de reproducirlas. La calidad de esta reproducción, en tanto, dependerá de qué tan correlacionadas estén realmente las variables, además de la cantidad y calidad de los sets de datos que se dispongan para definir el valor de

cada una de las salidas agrupadas. En caso de que, por la falta de datos, queden reglas sin definir, sus salidas agrupadas deberán ser rellenadas considerando algún criterio experto.

3.3.3. Correcciones y operaciones finales

Por último, antes de dar por finalizada la formulación del modelo, se debe verificar que los resultados cumplan con ciertas condiciones lógicas o físicas, y aplicar las correcciones u operaciones que sean necesarias para satisfacerlas.

En el caso de la gestión de embalses, una condición lógica a tener en consideración puede ser la siguiente: la magnitud de los desembalses suele tener una correlación directa con la disponibilidad hídrica aguas arriba del embalse del cual se realizan. Es decir, si las aportaciones que llegan al embalse o el volumen almacenado en el embalse disminuyen, las sueltas realizadas debiesen, en general, disminuir. Si las reglas generadas a partir del método de inferencia difusa dictan comportamientos que contradicen esta premisa, sus salidas agrupadas deben ser corregidas por medio de algún criterio experto.

Por otra parte, una condición física a considerar en la gestión de embalses corresponde al cumplimiento de los límites físicos de su capacidad de acumulación. Un embalse no puede acumular agua por sobre su capacidad máxima de almacenamiento ni es capaz realizar desembalses cuando su volumen almacenado es inferior al mínimo. Si en el proceso de definición de salidas agrupadas se incluyó una gran cantidad de datos que representen estas situaciones extremas, el modelo debería, en cierta medida, reproducirlas sin mayores problemas. Sin embargo, como éste no suele ser el caso, y dado que la incorporación directa de estas situaciones en los sistemas lógicos difusos es compleja, se hace necesaria la implementación de un proceso de verificación y corrección a posteriori de los resultados generados por el modelo. En específico, basándose en los resultados de un balance hídrico, se deben modificar los desembalses resultantes para ajustarlos a las dos condiciones descritas: que incorporen los excedentes que se puedan producir luego de llenarse el embalse y que se reduzcan en la cantidad correspondiente cuando éste se vacíe.

3.4. Modelos propuestos para el caso de estudio

Para la consecución de los objetivos del presente estudio, se propone la formulación de 2 modelos matemáticos independientes, desarrollados mediante el método de inferencia difusa presentado en el apartado anterior. El primer modelo tiene como finalidad la simulación de la serie histórica de los volúmenes mensuales trasvasados desde la cuenca del Tajo hacia la cuenca del Segura, en función de distintos indicadores de la disponibilidad hídrica en los sistemas implicados. El segundo modelo, por su parte, tiene por objetivo la reproducción de la serie histórica de volúmenes mensuales desembalsados desde los embalses de Entrepeñas y Buendía hacia la cuenca del Tajo, en función, también, de indicadores que representen la disponibilidad hídrica en el correspondiente sistema. Cabe destacar que cada uno de estos modelos ha sido desarrollado, de forma paralela, en planillas de cálculo Excel y mediante el lenguaje de programación Python, obteniéndose idénticos resultados en ambos casos, por lo que en el siguiente capítulo se presentan, indistintamente, resultados procedentes de uno u otro lenguaje. A continuación, en la Figura 3.2, se presenta un esquema representativo de las sueltas simuladas por cada modelo desarrollado.



Figura 3.2. Esquema representativo de las sueltas simuladas por los modelos de trasvases al Segura y de desembalses al Tajo.

Ambas variables de salida corresponden a las principales salidas del sistema de embalses compuesto por Entrepeñas y Buendía, por lo que, añadiendo a estas variables las evaporaciones y las aportaciones (se desprecian las infiltraciones), resulta sencillo realizar un balance hídrico para dichos embalses.

En una etapa posterior a la formulación de los modelos de trasvases y desembalses, se desarrolla una integración de ambos sistemas lógicos con el objetivo de predecir los

volúmenes embalsados en los embalses de Entrepeñas y Buendía. Este proceso consiste en el cálculo secuencial de los volúmenes futuros por medio de la aplicación de la ley de conservación de masas, aplicada a escala mensual. En términos específicos, esto quiere decir que el volumen en E+B simulado para fin de mes es calculado como el volumen en E+B al término del mes anterior más las entradas, equivalentes a las aportaciones mensuales, menos las salidas, correspondientes a los trasvases, desembalses y evaporación del mes en simulación. La formulación matemática considerada queda descrita por la Ecuación (5):

$$Vol_i = Vol_{i-1} + Apo_i - (trasvase_i + desembalse_i + evap_i) \quad (5)$$

De todas las variables necesarias para la predicción del volumen en Entrepeñas y Buendía, los volúmenes trasvasados hacia la cuenca del Segura y los volúmenes desembalsados hacia el río Tajo son estimados mediante los modelos difusos desarrollados. El volumen del mes anterior corresponde a un dato observado o calculado en un paso temporal anterior, mientras que el resto de variables, aportaciones y evaporaciones, son proyectadas mediante métodos descritos en el apartado 3.8 de este informe.

3.5. Definición de las variables de entrada y de salida

Como se ha mencionado con anterioridad, los modelos desarrollados tienen como objetivo la reproducción de las sueltas históricas en función de distintos indicadores de la disponibilidad hídrica del sistema. De esta forma, se selecciona un set de variables objetivas y de carácter público, capaces de representar dicha disponibilidad.

En definitiva, la formulación de ambos modelos difusos es desarrollada considerando, en cada caso, 4 variables de entrada y 1 variable de salida. Dichas variables, utilizadas para la generación de los mapas asociativos difusos de los modelos y, posteriormente, para su propia ejecución, son descritas y justificadas a continuación.

3.5.1. *Variables para la modelación de volúmenes trasvasados al Segura*

En este caso, ya que corresponde directamente a la variable que se busca simular, la única **variable de salida** considerada en la formulación del modelo es:

- El volumen trasvasado desde Entrepeñas y Buendía hacia la cuenca del Segura, durante un mes en particular.

En cuanto a las **variables de entrada**, las consideradas para la formulación de este modelo son las siguientes:

- **Nº1:** El volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía, al término del mes anterior al de la realización del trasvase.
- **Nº2:** Las aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía, durante los 12 meses previos a la realización del trasvase.
- **Nº3:** La suma de los volúmenes embalsados en los principales embalses de la cuenca del Segura, en específico en los embalses de Cenajo, Fuensanta, Camarillas y Talave, al término del mes anterior al de la realización del trasvase.
- **Nº4:** El mes del año en el que se realiza el trasvase.

Presentadas estas variables, se procede a describir en detalle cada una de ellas.

A) *Variable de salida: Volumen trasvasado*

Las normas de explotación con las que se gestiona el trasvase adquieren carácter de ley, por primera vez, luego de la promulgación del Real Decreto 773/2014. Previamente, las reglas existentes operaban con carácter meramente orientativo y, producto de esto, los trasvases mensuales no seguían patrones continuos ni claramente establecidos, evidenciándose en

varias ocasiones autorizaciones de trasvases distintas a los volúmenes propuestos según las reglas vigentes (CEDEX, 2017-2022). Además, para este período, solo fue posible encontrar registros de los volúmenes que fueron trasvasados en contadas oportunidades, por lo que la discontinuidad de los datos disponibles no permite una correcta modelación de la variable.

Luego de la promulgación del Real Decreto, sin embargo, los datos evidencian un comportamiento acorde con las normativas vigentes, además de mejorar sustancialmente la disponibilidad de información. Por este motivo, asumiendo que las decisiones normadas presentan un comportamiento con un mayor grado de reproductividad, se decide considerar, para la formulación del modelo, la serie de datos correspondiente a los años hidrológicos 2014/15 – 2021/22, es decir, desde octubre de 2014, hasta septiembre de 2022.

Los volúmenes trasvasados son medidos en destino, específicamente en el túnel que llega al embalse de Talave, y son registrados y publicados mensualmente en un documento denominado Parte Global de Traspase (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022). A continuación, en la Figura 3.3, se presenta la mencionada serie histórica de volúmenes trasvasados:

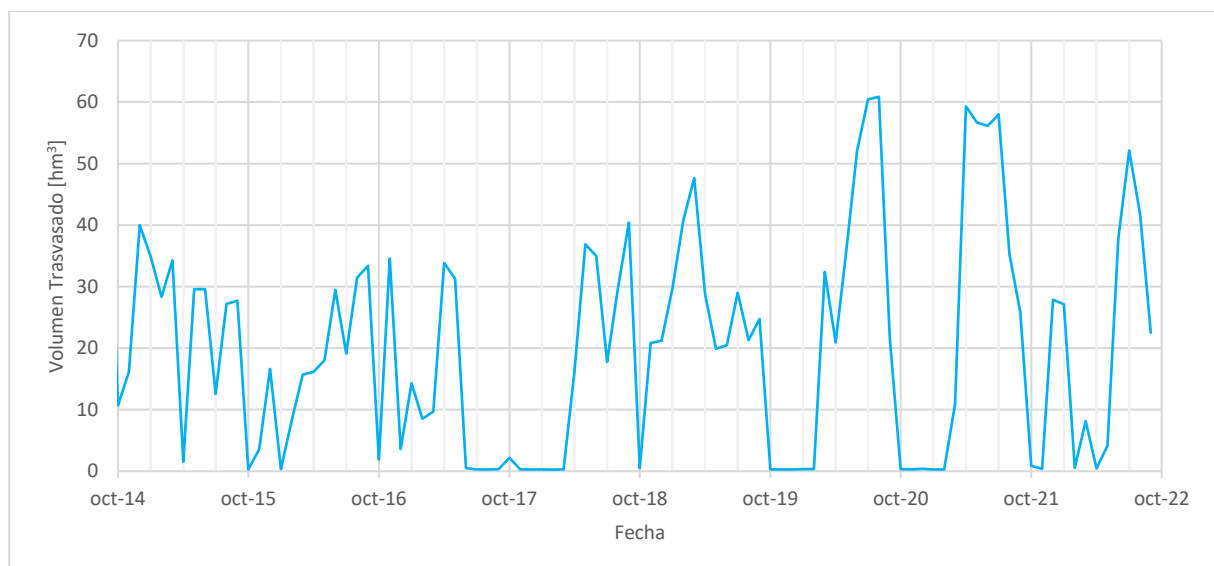


Figura 3.3. Serie histórica de volúmenes mensuales trasvasados hacia la cuenca del Segura (elaboración propia basada en (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022)).

Adicionalmente, en la Figura 3.4 se presenta una comparación de los datos observados con respecto a los volúmenes máximos autorizados según la normativa, disponibles tanto en los Informes de Situación desarrollados mensualmente por el CEDEX como en los Boletines Oficiales del Estado específicos, publicados en caso de identificarse circunstancias hidrológicas excepcionales. Se observa que ambas variables describen comportamientos similares; sin embargo, en muchas ocasiones el volumen trasvasado supera al volumen autorizado. Esto no representa incumplimientos a la regla, ya que, según normativa, son los beneficiarios del agua los que determinan el momento en el que se realizarán los trasvases autorizados. De esta manera, resulta posible, e incluso habitual, que los trasvases realizados durante un mes en particular superen al volumen autorizado del mismo mes, debido a la inclusión de volúmenes previamente autorizados pero pendientes de trasvasar.

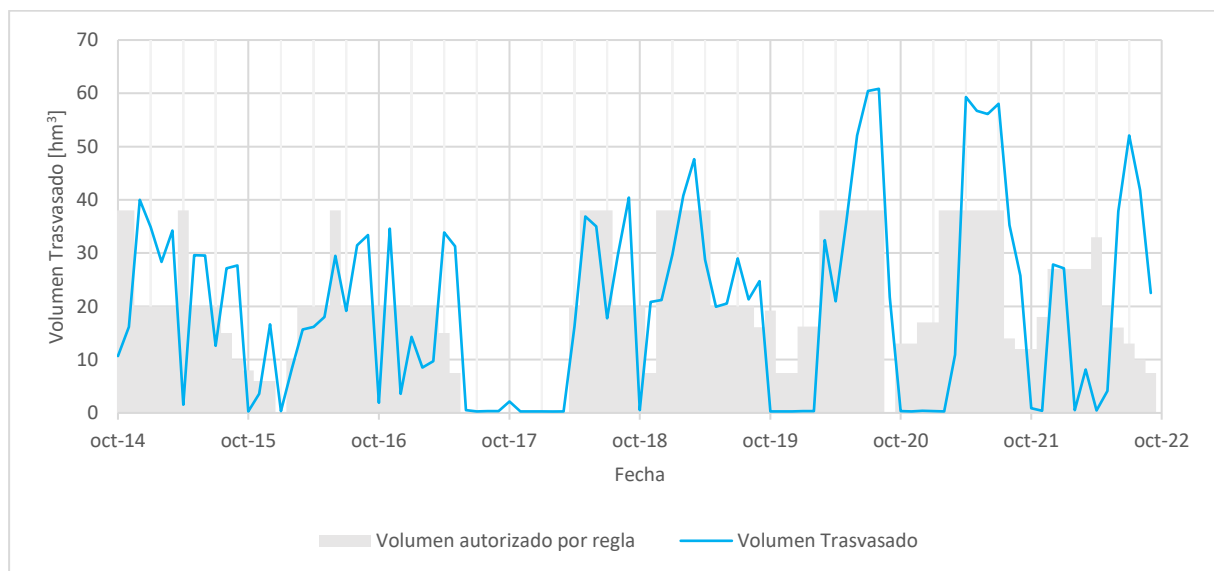


Figura 3.4. Comparación entre trasvases observados y trasvases mensuales autorizados según la normativa (elaboración propia basada en (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022) - (CEDEX, 2017-2022)).

B) Variable de entrada Nº1: Volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía

Dado que, según las reglas de explotación, la autorización mensual de los trasvases queda determinada por los volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía y por las aportaciones acumuladas en dichos embalses, se decide considerar ambas variables para la formulación del modelo.

El volumen considerado para la aplicación de las reglas y que, en definitiva, sirve como indicador de la disponibilidad hídrica del sistema, corresponde al embalsado en Entrepeñas y Buendía al comienzo del mes en el que se ejecutará el trasvase. Sin embargo, las series de datos de volúmenes embalsados suelen indicar los volúmenes embalsados al término del mes, y no al comienzo. Para evitar posibles confusiones, se decide establecer que la variable a considerar en el modelo corresponderá al volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía al término del mes anterior en el que se ejecutará el trasvase, por lo que, si los datos disponibles están medidos a fin de mes, éstos deben ser utilizados para el cálculo de los trasvases realizados durante el mes siguiente. Por el contrario, si los volúmenes están medidos al comienzo del mes, no es necesario desfasarlos, ya que, en la práctica, el volumen embalsado al comienzo de un mes es el mismo que el embalsado al término del mes anterior.

Para la formulación del modelo, se consideran mediciones de volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía realizadas durante el mismo período que las correspondientes a la variable de salida, es decir, desde octubre de 2014 hasta septiembre de 2022. Para este período, sin embargo, no existe una única fuente de datos. El CEDEX, en su anuario de aforos, sólo dispone de datos hasta septiembre del 2019, por lo que el resto de las mediciones se han extraído desde los Informes de Situación del ATS, desarrollados mensualmente por la misma institución. Cabe destacar que los volúmenes indicados en el anuario de aforos se encuentran medidos a fin de mes, por lo que para incluirlos en el modelo es necesario desplazarlos. Por el contrario, los datos indicados en los Informes de Situación están medidos a comienzos del mes y, por lo tanto, no se modifican.

Finalmente, luego de realizar las modificaciones pertinentes, la serie de datos considerada corresponde a la presentada en la Figura 3.5:

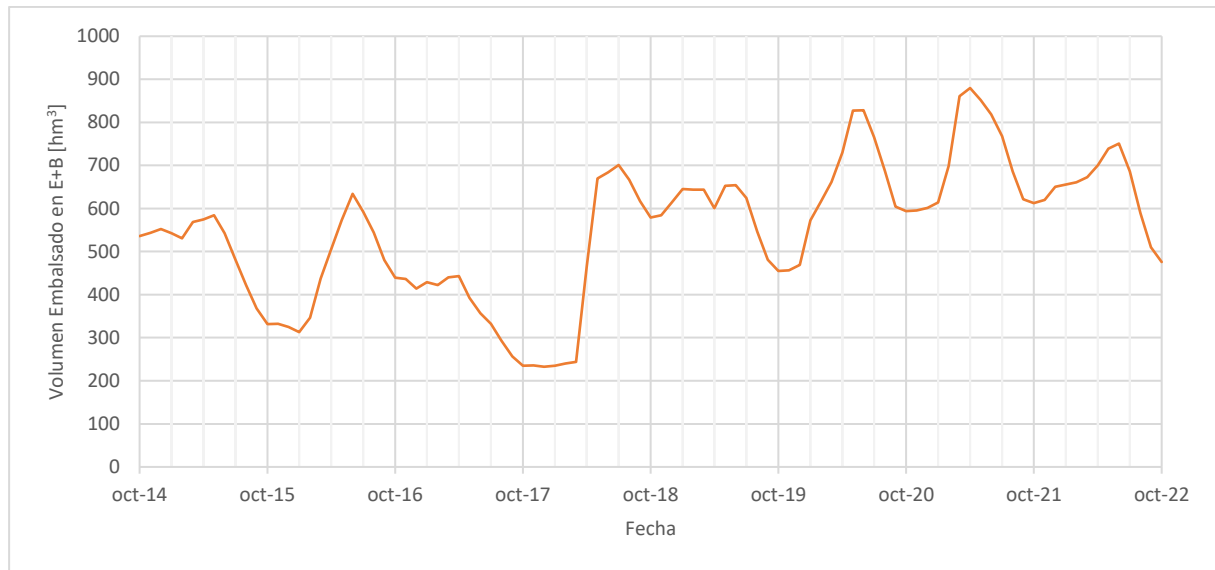


Figura 3.5. Serie histórica de volúmenes embalsado en Entrepeñas y Buendía (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (CEDEX, 2017-2022)).

De forma adicional, a modo de comprobación de la relación existente entre esta variable de entrada y la variable de salida, se presentan las Figuras 3.6 y 3.7. En la primera se muestra la variable de entrada en contraste con la variable de salida, mientras que en la segunda se analiza su nivel de correlación.

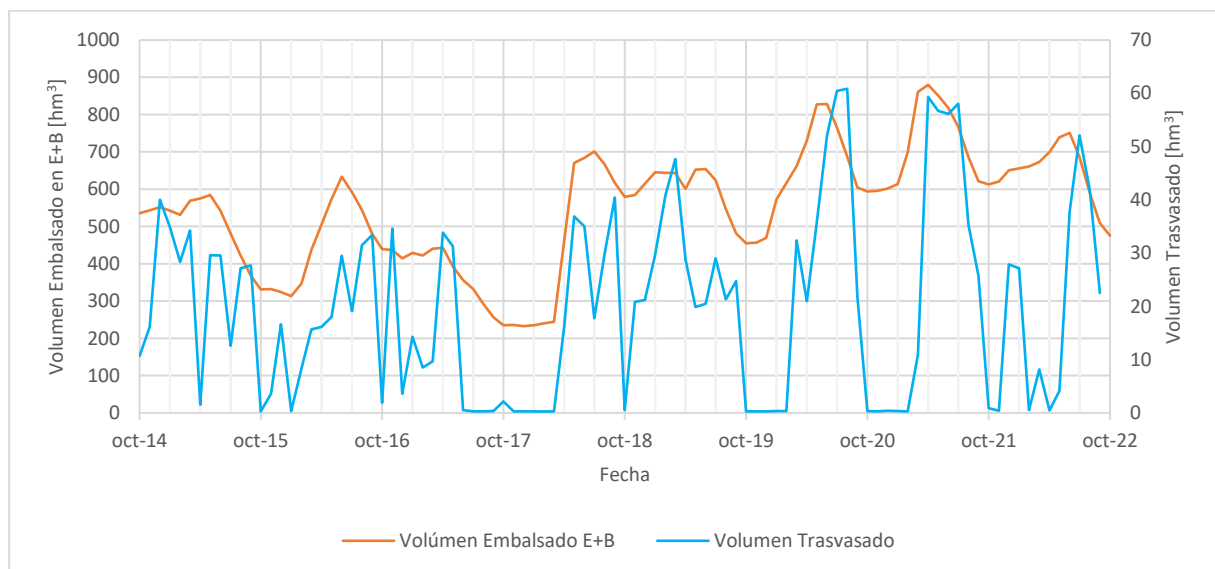


Figura 3.6. Contraste de series históricas de volúmenes embalsados en E+B frente a volúmenes trasvasados (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (CEDEX, 2017-2022) - (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022)).

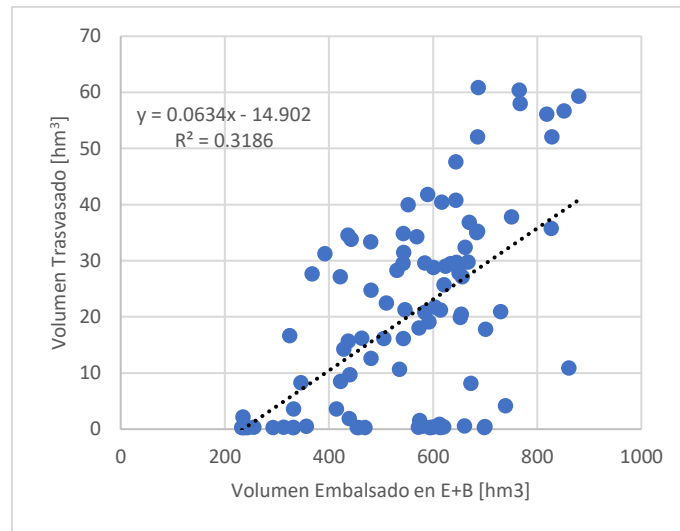


Figura 3.7. Correlación entre las series de datos de volúmenes embalsados en E+B y de volúmenes trasvasados (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (CEDEX, 2017-2022) - (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022)).

En general, se aprecia una relación directa entre ambas variables, siendo los trasvases claramente influenciados por los volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía.

C) *Variable de entrada N°2: Aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía durante los últimos 12 meses*

Como se mencionó anteriormente, la autorización mensual de los trasvases queda determinada por los volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía y por las aportaciones acumuladas en dichos embalses. Por lo tanto, se decide considerar ambas variables para la formulación del modelo.

Las aportaciones consideradas para la aplicación de las reglas de explotación, y que se utilizan como indicador de la disponibilidad hídrica del sistema, corresponden a las registradas en los embalses de Entrepeñas y Buendía durante los 12 meses previos al mes en el que se ejecutará el trasvase. Por ejemplo, si se está modelando el trasvase a realizar durante enero de 2020, la aportación a considerar corresponde a la acumulada entre enero de 2019 y diciembre de 2019, por lo que esta variable se calcula a partir de las aportaciones mensuales.

Para la formulación del modelo, se considera el cálculo de las aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía, a partir de los registros de las 12 aportaciones mensuales previas, para el mismo período correspondiente a la serie de datos de la variable de salida; es decir, desde octubre de 2014 hasta septiembre de 2022. Para este período, sin embargo, no existe una única fuente de datos. El CEDEX, en su anuario de aforos, sólo dispone de datos hasta septiembre del 2019, por lo que el resto de las mediciones se extraen desde los Informes de Situación del ATS, desarrollados mensualmente por la misma institución.

A continuación, se presenta en la Figura 3.8 la serie de aportaciones mensuales consideradas para el cálculo de las aportaciones acumuladas:

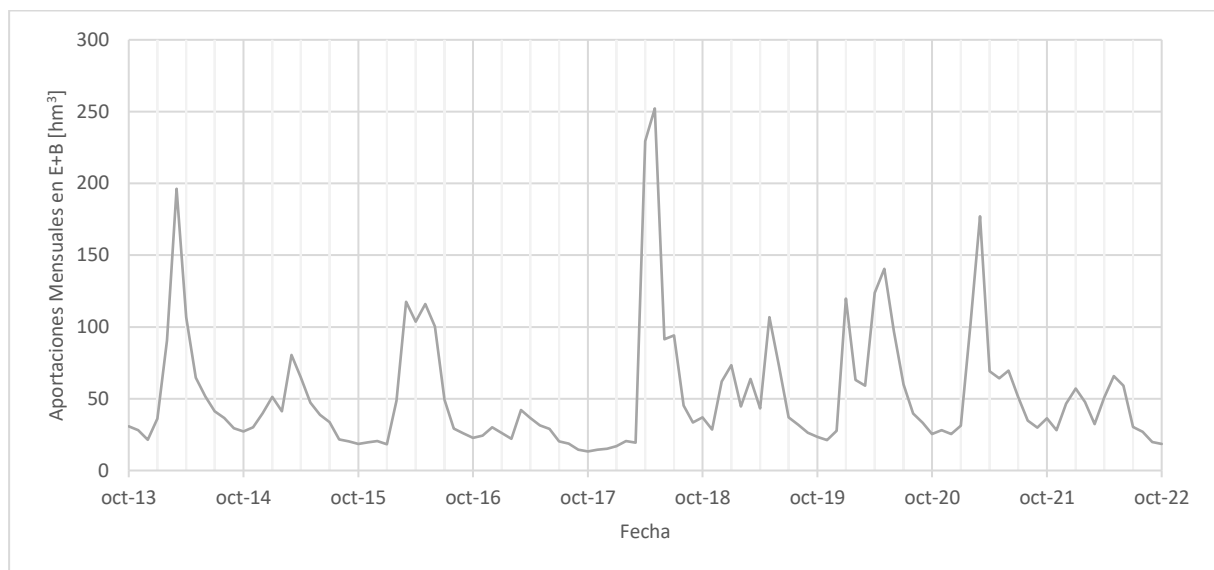


Figura 3.8. Serie histórica de aportaciones mensuales en Entrepeñas y Buendía, mediante las cuales se calculan las aportaciones acumuladas en 12 meses (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (CEDEX, 2017-2022)).

Finalmente, luego de realizar los cálculos pertinentes, la serie de datos considerada como variable de entrada al modelo corresponde a la presentada en la Figura 3.9:

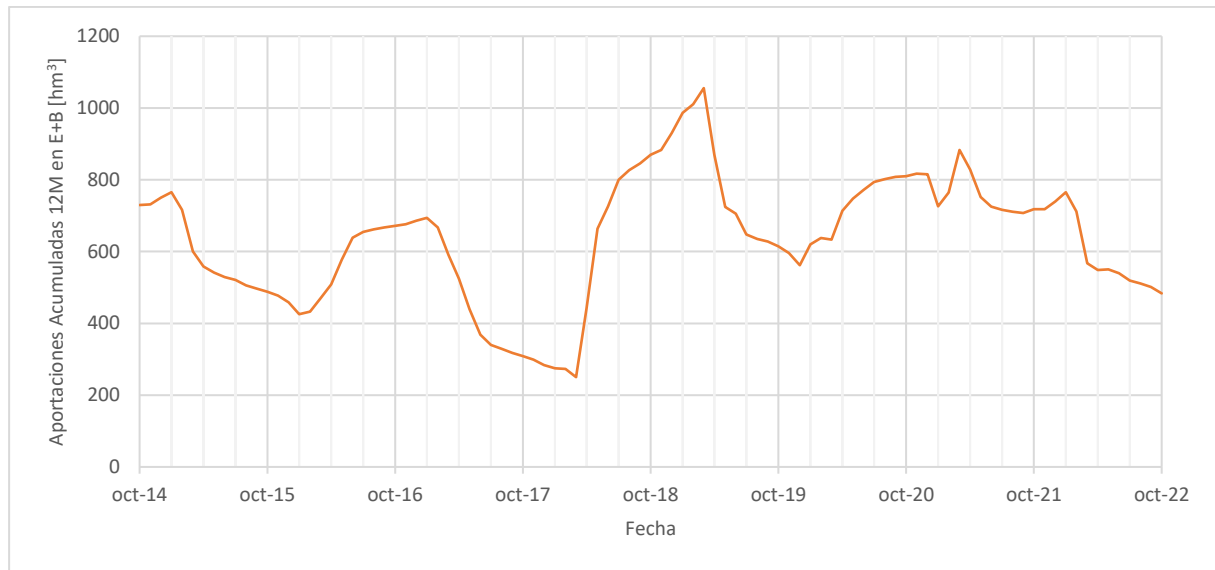


Figura 3.9. Serie histórica de aportaciones acumuladas en 12 meses en Entrepeñas y Buendía (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (CEDEX, 2017-2022)).

De forma adicional, a modo de comprobación de la relación existente entre esta variable de entrada y la variable de salida, se presentan las Figuras 3.10 y 3.11. En la primera se muestra la variable de entrada en contraste con la variable de salida, mientras que en la segunda se analiza su nivel de correlación.

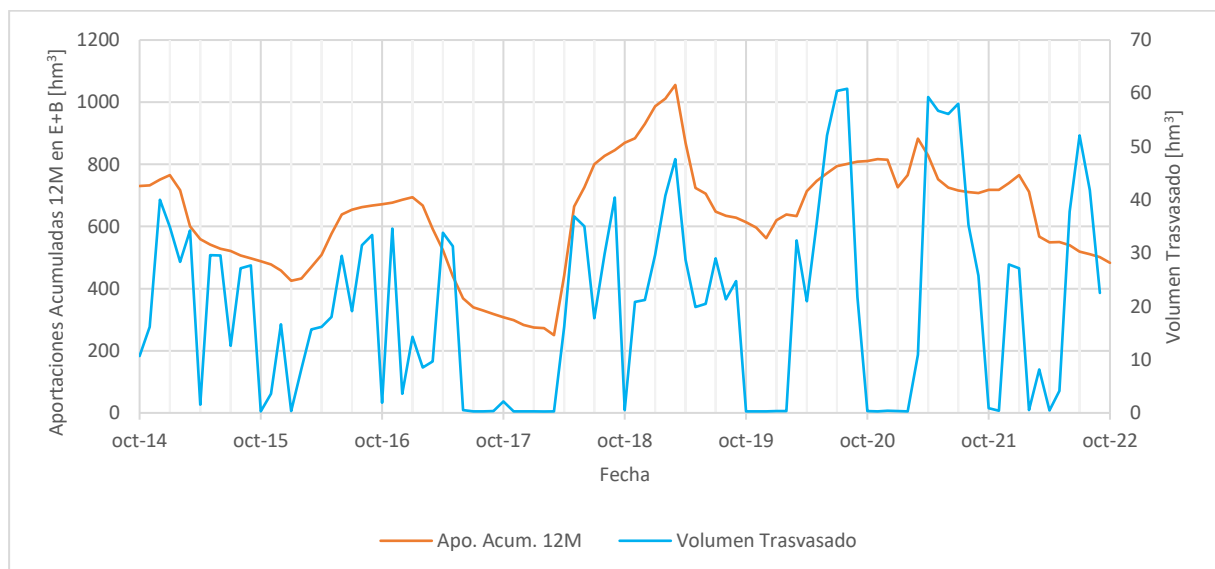


Figura 3.10. Contraste de series históricas de aportaciones acumuladas en 12 meses en E+B frente a volúmenes trasvasados (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (CEDEX, 2017-2022) - (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022)).

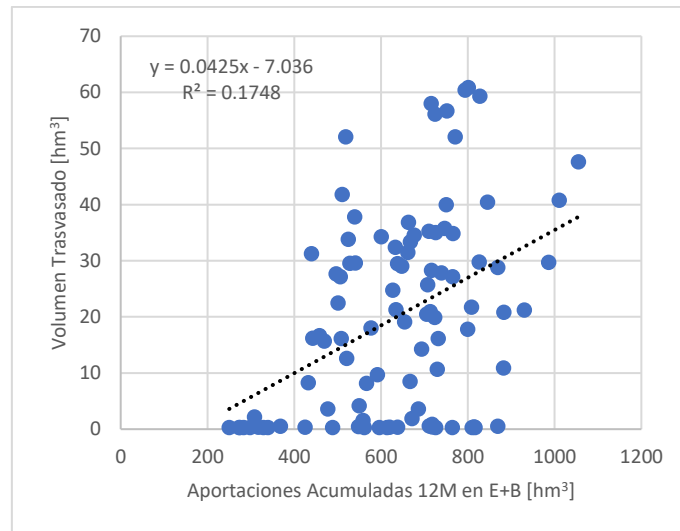


Figura 3.11. Correlación entre las series de datos aportaciones acumuladas en 12 meses en E+B y de volúmenes trasvasados (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (CEDEX, 2017-2022) - (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022)).

Si bien la correlación observada entre las variables no resulta evidente, de todas maneras se observa una relación directa entre ellas, por lo que se decide incluir las aportaciones acumuladas en la modelación.

D) Variable de entrada N°3: Volumen embalsado en los principales embalses de la cuenca del Segura

Como indicador de disponibilidad hídrica, adicional a los considerados por la regla de explotación del trasvase, se considera la incorporación de los volúmenes embalsados en ciertos embalses representativos ubicados en la cuenca del Segura, específicamente Cenajo, Fuensanta, Camarillas y Talave, dado que sus respectivas gestiones resultan influenciadas por la operación del trasvase y son los principales embalses de la cuenca del Segura.

El volumen que, en este caso, sirve como indicador de la disponibilidad hídrica de la cuenca del Segura, corresponde a la suma de los volúmenes embalsados en estos embalses principales al término del mes anterior en el que se ejecutará el trasvase. Por lo tanto, si los datos disponibles están medidos a fin de mes, éstos deben ser utilizados para el cálculo de los trasvases realizados durante el mes siguiente.

Para la formulación del modelo, se consideran mediciones de volúmenes acumulados en los 4 embalses realizadas durante el mismo período que las correspondientes a la variable de salida, es decir, desde octubre de 2014, hasta septiembre de 2022. Para este período, sin embargo, no existe una única fuente de datos. El CEDEX, en su anuario de aforos, sólo dispone de datos hasta septiembre del 2019, por lo que el resto de las mediciones se extraen desde el portal de consulta de series de embalses de la Confederación Hidrográfica del Segura, el cual se actualiza de forma diaria. Cabe destacar que los volúmenes indicados en el anuario de aforos se encuentran medidos a fin de mes, por lo que, al igual que ocurre con los volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía, es necesario desplazarlos. Por el contrario, los datos indicados en el portal de consulta de la Confederación del Segura corresponden a datos diarios, por lo que, seleccionando el primer día de cada mes, no se hace necesario generar desfases.

Finalmente, luego de recopilar y sumar los datos, la serie de datos considerada corresponde a la presentada en la Figura 3.12:

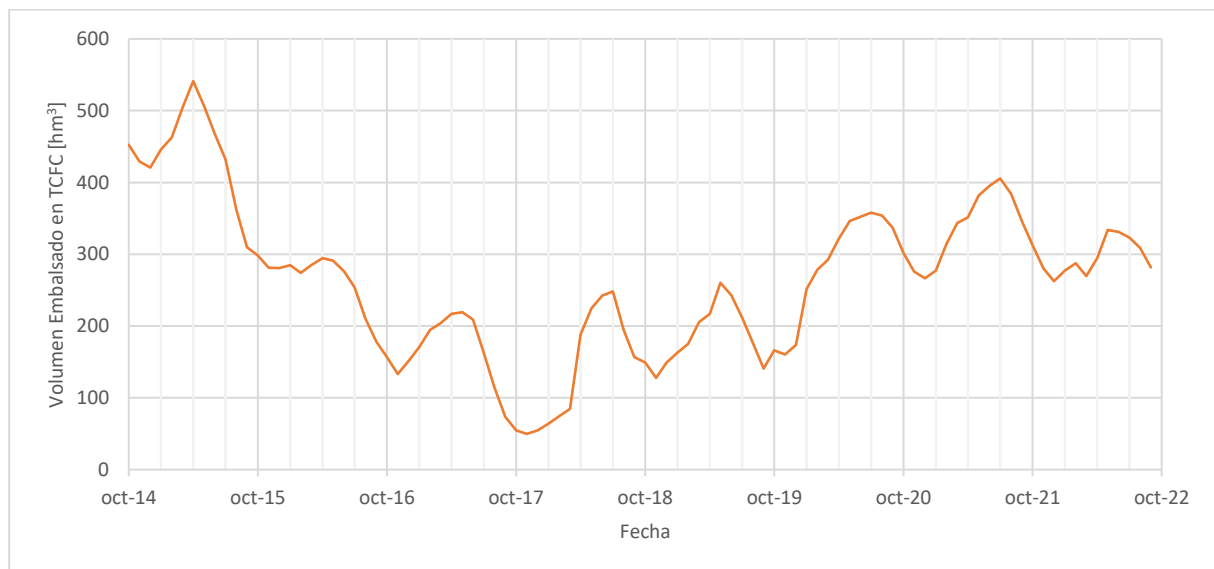


Figura 3.12. Serie histórica de volúmenes embalsados en Talave, Camarillas, Fuensanta y Cenajo (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (Confederación Hidrográfica del Segura, 2019-2022)).

De forma adicional, a modo de comprobación de la relación existente entre esta variable de entrada y la variable de salida, se presentan las Figuras 3.13 y 3.14. En la primera se muestra la variable de entrada en contraste con la variable de salida, mientras que en la segunda se analiza su grado de correlación.

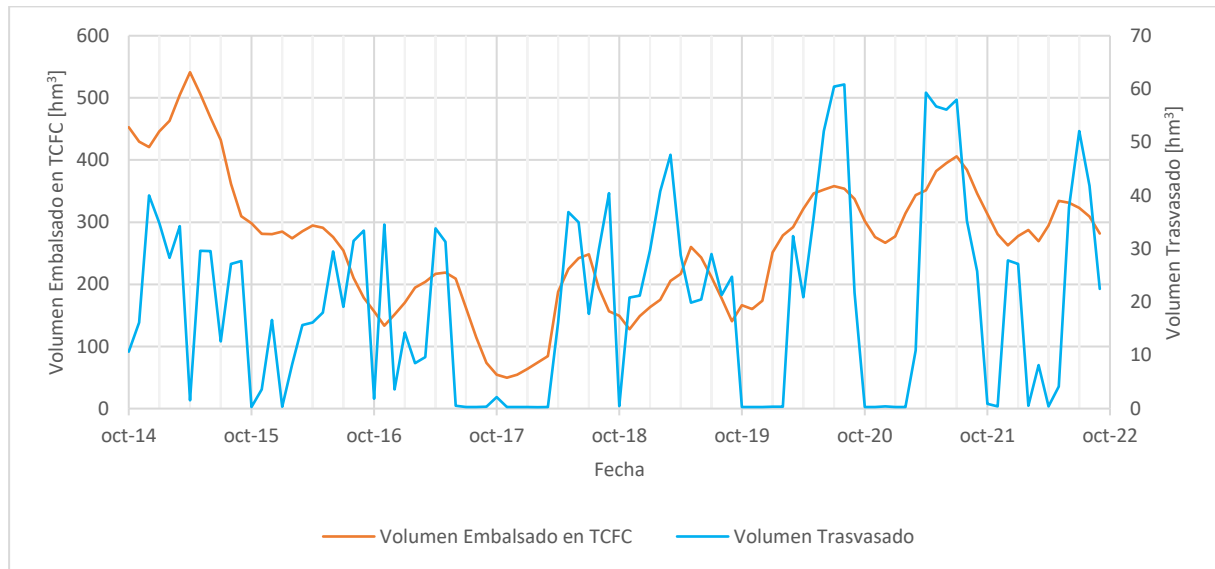


Figura 3.13. Contraste de series históricas de volúmenes embalsados en TCFC frente a volúmenes trasvasados (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (Confederación Hidrográfica del Segura, 2019-2022) - (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022)).

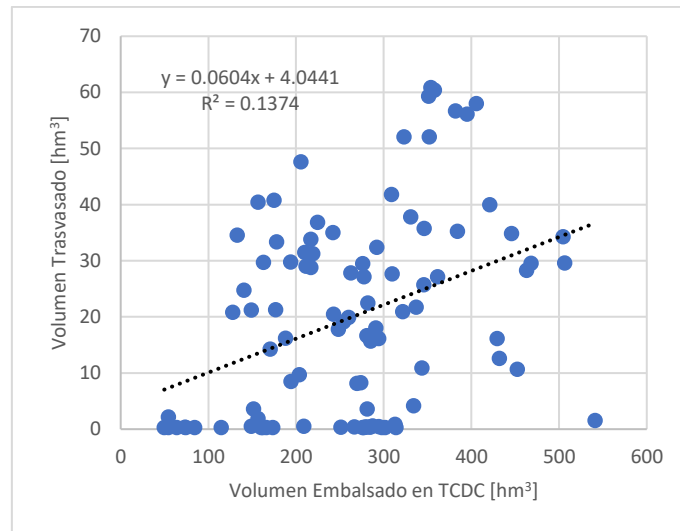


Figura 3.14. Correlación entre las series históricas de volúmenes embalsados en TCFC frente a volúmenes trasvasados (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (Confederación Hidrográfica del Segura, 2019-2022) - (Confederación Hidrográfica del Segura, 2022)).

Aunque la correlación observada entre ambas variables es bastante débil, de todos modos se observa una relación directa entre ellas, por lo que se mantiene la decisión de incluir esta variable en la modelación. De todas maneras, resulta curioso que los volúmenes trasvasados tengan una relación directa con los volúmenes almacenados en la cuenca del Segura. Podría pensarse que, durante períodos en los que los embalses del Segura tienen menos agua, los trasvases hacia dicha cuenca serían mayores, con el objetivo de paliar posibles déficits. Sin embargo, esto no ocurre así. Como se observa en la Figura 3.15, los embalses del Segura tienen un comportamiento bastante similar a los de la cabecera del Tajo, posiblemente por similitudes climáticas de las zonas. Por lo tanto, al estar más llenos los embalses del Segura, también lo estarán los de la cabecera del Tajo, resultando en un aumento de la disponibilidad de agua para trasvasar.

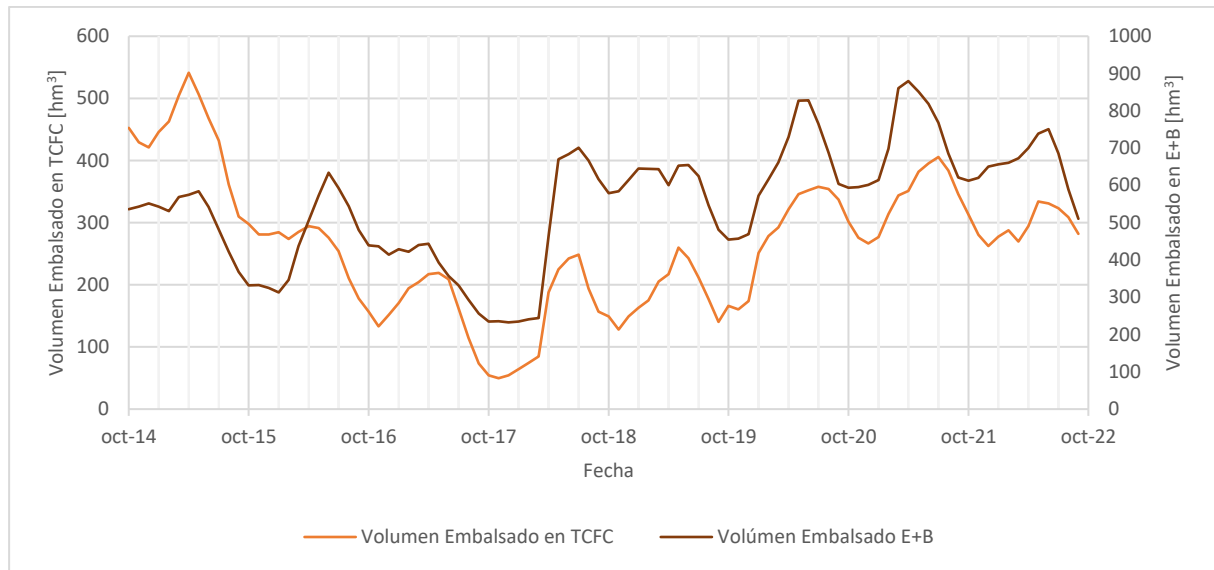


Figura 3.15. Contraste de series históricas de volúmenes embalsados en TCFC frente a volúmenes embalsados en E+B (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (Confederación Hidrográfica del Segura, 2019-2022) - (CEDEX, 2017-2022)).

E) Variable de entrada Nº4: Mes en el que se realiza el trasvase

Como última variable de entrada, aunque implementada de manera distinta que el resto, se decide incorporar la estacionalidad en la modelación. Esto no solo como un indicador de la disponibilidad hídrica, sino también como un descriptor del comportamiento general del sistema. Por distintos motivos, ya sea por la estacionalidad de las cosechas, por variaciones en el consumo, por variables subjetivas u otros motivos indeterminados, las decisiones tomadas durante una época del año podrían diferir de las decisiones que se tomarían durante otra época distinta. Incluyendo la estacionalidad, por lo tanto, el modelo puede incorporar estas variaciones en la definición de sus reglas y, por lo tanto, ser capaz de reproducirlas.

La incorporación de los meses como variable se realiza mediante una modificación del método de inferencia difusa con la que se formula el modelo. A diferencia del resto de variables de entrada, que se definen como variables difusas, los meses del año se definen como variables clásicas binarias, por lo que su fuzzificación adopta solamente valores 1, en caso de pertenecer al mes analizado, o 0, en caso de pertenecer a cualquier otro. En la práctica, esto significa que, para el “aprendizaje” de cada mes del año, por ejemplo enero, el modelo incorporará solamente información de lo ocurrido durante dicho mes, es decir, todos los eneros, pero no

tendrá en cuenta lo ocurrido durante otros meses, como febrero o marzo. Así, el mapa asociativo difuso del modelo presentará, finalmente, sentencias lógicas difusas que combinen todas las variables difusas, volumen embalsado en E+B, aportaciones acumuladas en E+B y volúmenes embalsados en TCFC, con cada uno de los 12 meses del año.

3.5.2. Variables para la modelación de volúmenes desembalsados al Tajo

Para este modelo, ya que corresponde directamente con la variable objetivo, la única **variable de salida** considerada en su formulación es:

- El volumen desembalsado desde Entrepeñas y Buendía hacia el río Tajo, durante un mes en particular.

En cuanto a las **variables de entrada**, las consideradas para la formulación de este modelo son las siguientes:

- **Nº1:** El volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía, al término del mes anterior al de la realización del desembalse.
- **Nº2:** Las aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía, durante los 12 meses previos a la realización del desembalse.
- **Nº3:** La suma de los volúmenes embalsados en los principales embalses de la cuenca del Tajo (sin considerar Entrepeñas y Buendía), en específico los embalsados en Bolarque, Gabriel y Galán, Alcorlo, Atazar, Valmayor, Finisterre, Burguillo y San Juan, al término del mes anterior al de la realización del desembalse.
- **Nº4:** El mes del año en el que se realiza el desembalse.

A continuación, se procede a describir en detalle la variable de salida de este modelo y la variable de entrada Nº3. Las variables de entrada Nº1, Nº2 y Nº4, por su parte, son

exactamente las mismas que las consideradas en el modelo para la simulación de trasvases al Segura, de modo que ya han sido descritas en el apartado anterior. En estos casos, por lo tanto, solo se procederá a presentar sus contrastes y correlaciones con respecto a la nueva variable de salida.

A) Variable de salida: Volumen desembalsado

Al igual como ocurrió con los volúmenes trasvasados hacia el Segura, las reglas que determinan la magnitud de los desembalses al río Tajo adquieren carácter de ley con la promulgación del Real Decreto 773/2014. Dado esto, y en conjunción con el procedimiento realizado para la formulación del modelo de simulación de trasvases, el modelo de desembalses al Tajo considera en su desarrollo la serie de datos correspondiente a los años hidrológicos 2014/15 – 2021/22, es decir, desde octubre de 2014 hasta septiembre de 2022.

El volumen desembalsado al Tajo es medido en la salida del embalse Bolarque, desde el cual también son distribuidos los trasvases al Segura, y publicados en los Informes de Situación del ATS, desarrollados mensualmente por el CEDEX. Sin embargo, estos informes comenzaron a publicarse en noviembre de 2017, por lo que la información previa debe extraerse desde otra fuente. Se revisan los volúmenes de salida del embalse Bolarque publicados en el Anuario de Aforos del mismo CEDEX; sin embargo, estos volúmenes agrupan tanto las sueltas al Tajo, como los trasvases a la cuenca del Segura, presentando, además, ciertas inconsistencias, por lo que se descarta su utilización.

Luego de su salida desde Bolarque, el volumen desembalsado hacia el río Tajo llega a un pequeño embalse llamado Zorita. Los volúmenes de entrada a Zorita se encuentran publicados en el Anuario de Aforos del CEDEX, por lo que, a modo de verificación para su utilización, se comparan con los desembalses publicados en los Informes de Situación del ATS. La comparación de estos volúmenes es presentada en la Figura 3.16:

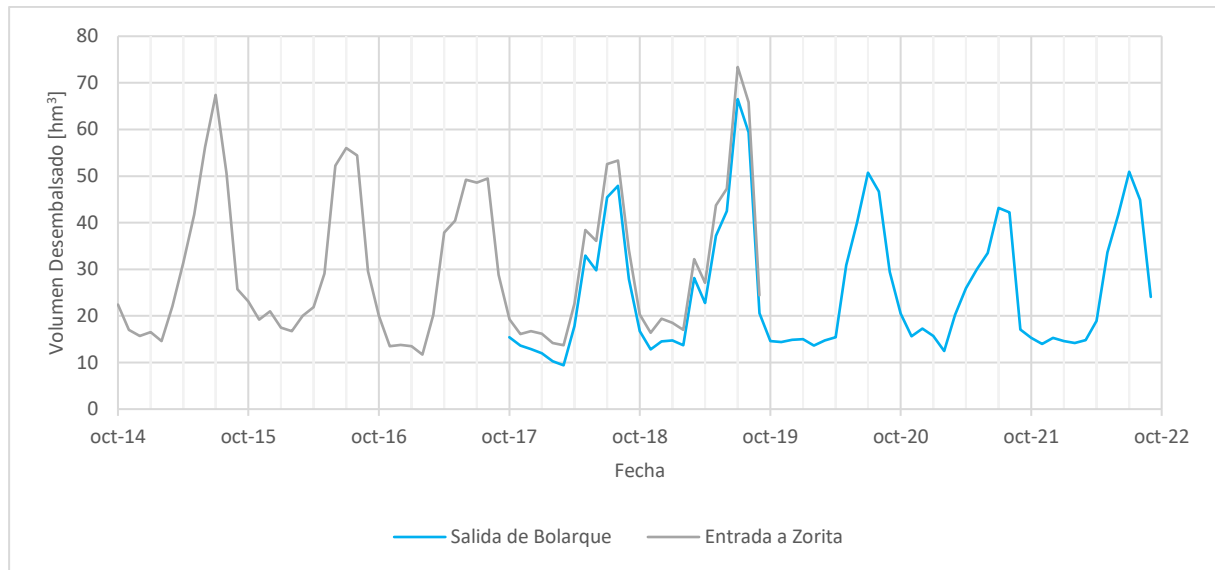


Figura 3.16. Comparación de volúmenes de salida de Bolarque y de entrada a Zorita (elaboración propia basada en (CEDEX, 2017-2022) - (CEDEX, 2022)).

A pesar de que existe una diferencia relativamente constante entre la información procedente de las distintas fuentes de datos, el comportamiento de ambas series es muy similar. En definitiva, se opta por completar los datos faltantes de la salida de Bolarque para el período 2014-2017 por medio de una función lineal que describa su magnitud en función de las entradas a Zorita. Para esto se considera la excelente correlación existente entre dichas variables, presentada en la Figura 3.17:

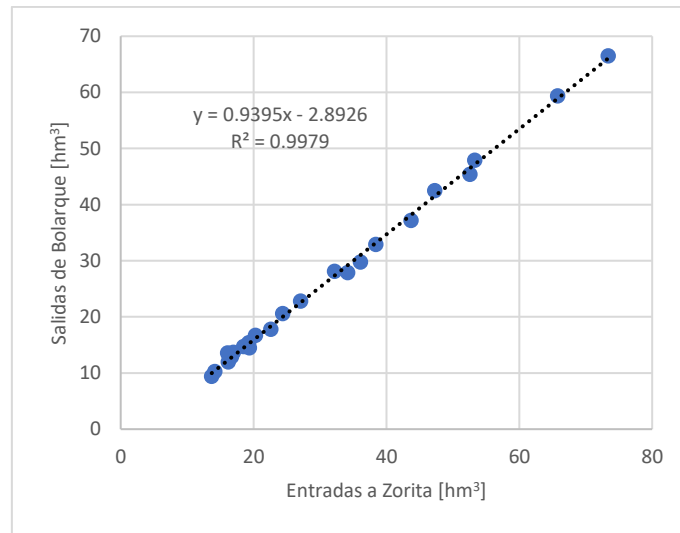


Figura 3.17. Correlación existente entre las salidas de Bolarque y las entradas de Zorita (elaboración propia basada en (CEDEX, 2017-2022) - (CEDEX, 2022)).

Finalmente, luego de rellenar los datos faltantes, se presenta en la Figura 3.18 la serie histórica de volúmenes desembalsados al río Tajo:

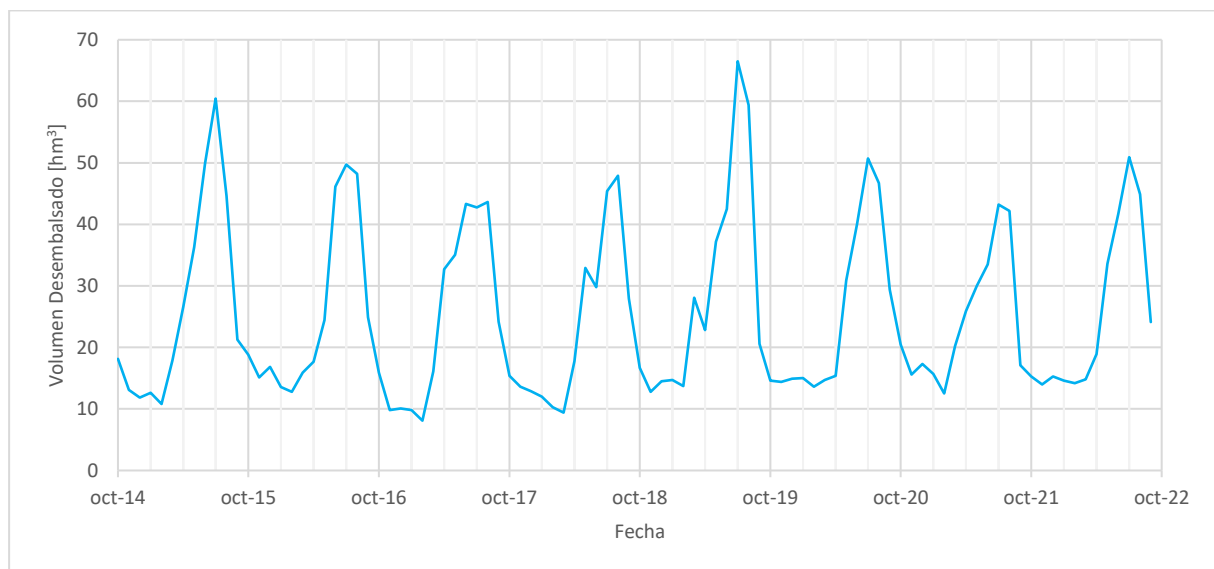


Figura 3.18. Serie histórica de volúmenes mensuales desembalsados al río Tajo (elaboración propia basada en (CEDEX, 2017-2022) - (CEDEX, 2022)).

Adicionalmente, en la Figura 3.19 se presenta una comparación de los datos observados con respecto a los desembalses de referencia y desembalses máximos autorizados según la normativa, descritos de forma explícita en las reglas de operación del trasvase.

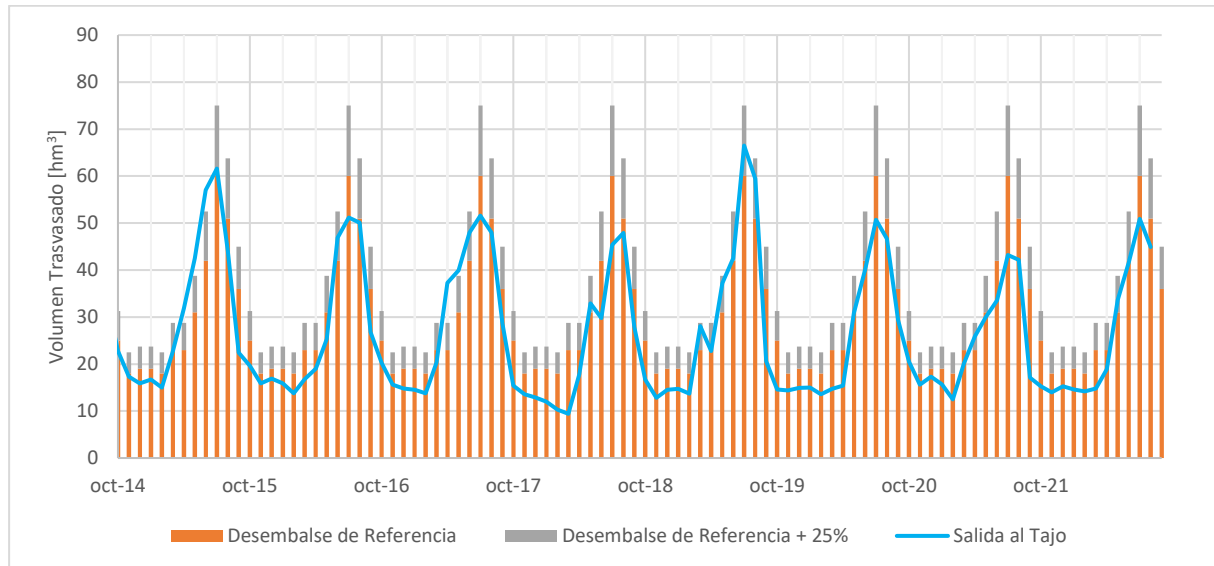


Figura 3.19. Comparación entre desembalses observados y desembalses mensuales autorizados según la normativa (elaboración propia basada en (CEDEX, 2017-2022) - (CEDEX, 2022) - (Real Decreto 773/2014, 2014)).

En general se observa una correcta aplicación de la normativa, con desembalses consistentes y poco variables año tras año.

B) Variable de entrada N°1: Volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía

Esta misma variable ha sido considerada en la formulación del modelo de volúmenes trasvasados hacia la cuenca del Segura, por lo que su descripción detallada ya ha sido expuesta. A continuación, se presenta una comprobación de la relación existente entre esta variable de entrada y la variable de salida volumen desembalsado al Tajo. En la Figura 3.20 se muestra la variable de entrada en contraste con la variable de salida, mientras que en la Figura 3.21 se analiza su grado de correlación.

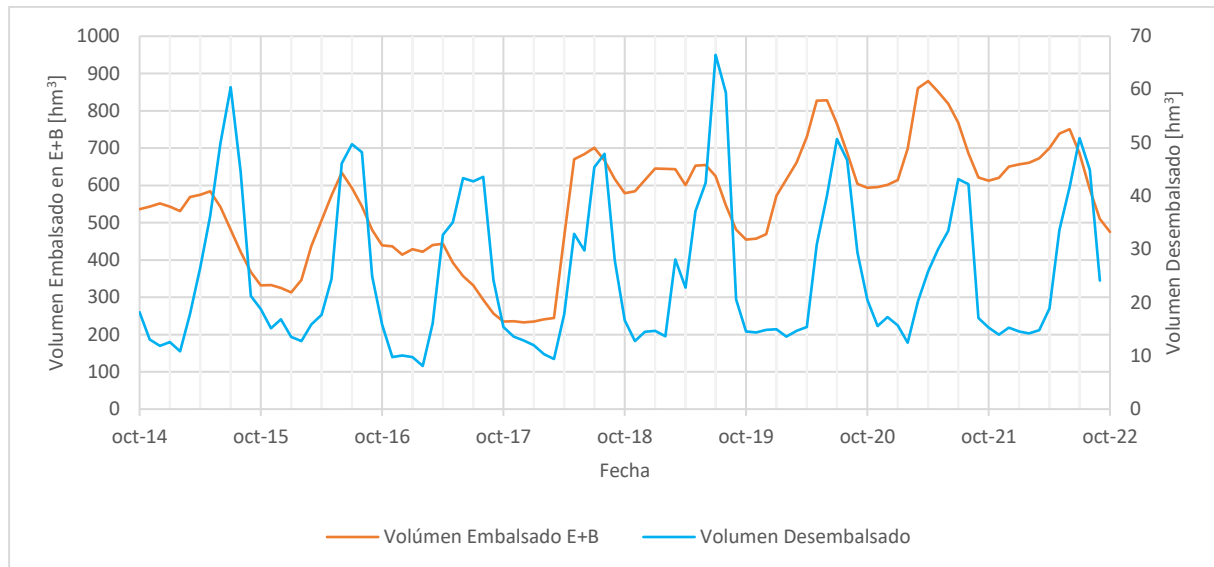


Figura 3.20. Contraste de series históricas de volúmenes embalsados en E+B frente a volúmenes desembalsados (elaboración propia basada en (CEDEX, 2017-2022) - (CEDEX, 2022)).

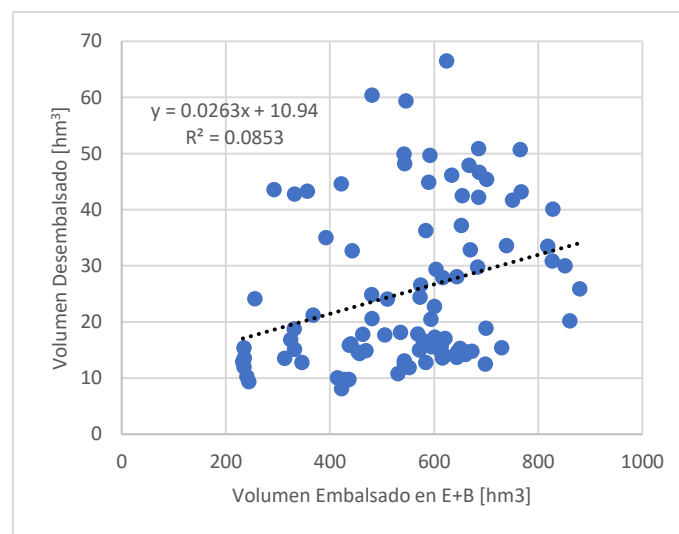


Figura 3.21. Correlación entre las series históricas de volúmenes embalsados en E+B frente a volúmenes desembalsados (elaboración propia basada en (CEDEX, 2017-2022) - (CEDEX, 2022)).

La relación observada entre las variables es bastante deficiente, ya que los desembalses mensuales se ajustan, más que nada, a la estacionalidad y al caudal definido en la normativa. A pesar de esto, se considera la inclusión de esta variable a modo de indicador de la disponibilidad hídrica del sistema.

C) Variable de entrada N°2: Aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía durante los últimos 12 meses

Al igual que el volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía, esta variable ha sido considerada en la formulación del modelo de volúmenes trasvasados hacia la cuenca del Segura, por lo que su descripción detallada se incluye en su correspondiente apartado. A continuación, sin embargo, se presenta una comprobación de la relación existente entre las aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía y el volumen desembalsado al Tajo. En la Figura 3.22 se muestra la variable de entrada en contraste con la variable de salida, mientras que en la Figura 3.23 se analiza su grado de correlación.

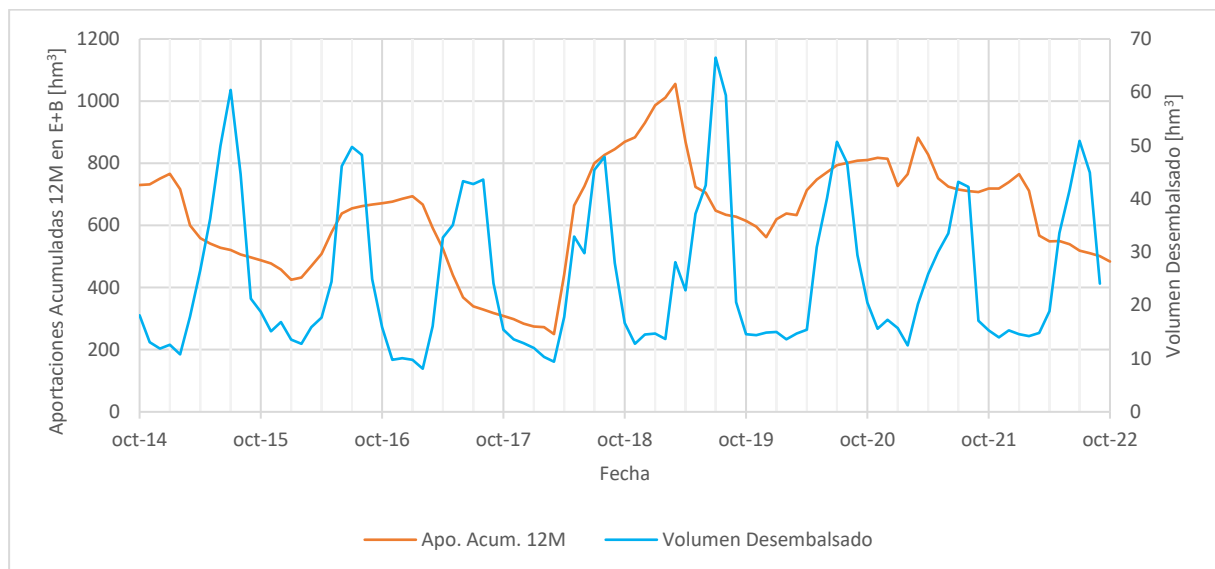


Figura 3.22. Contraste de series históricas de aportaciones acumuladas en 12 meses en E+B frente a volúmenes desembalsados (elaboración propia basada en (CEDEX, 2017-2022) - (CEDEX, 2022)).

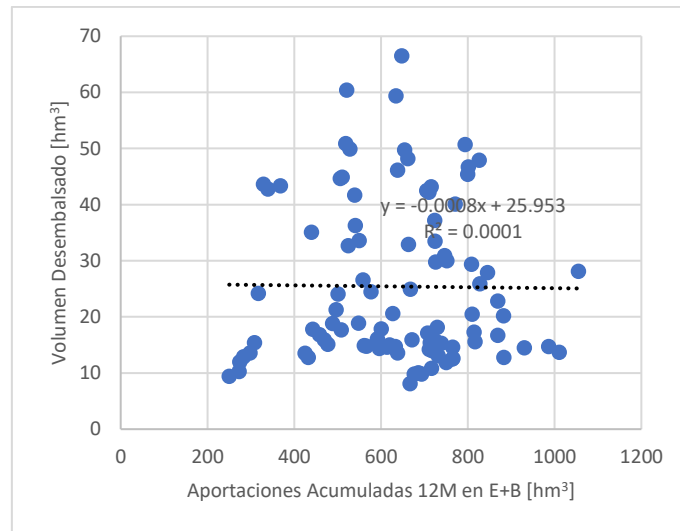


Figura 3.23. Correlación entre las series históricas de aportaciones acumuladas en 12 meses en E+B frente a volúmenes desembalsados (elaboración propia basada en (CEDEX, 2017-2022) - (CEDEX, 2022)).

En este caso se evidencia una prácticamente nula relación entre las variables, nuevamente debido a que los desembalses mensuales se ajustan, más que nada, a la estacionalidad y al caudal definido en la normativa. A pesar de esto, se considera la inclusión de esta variable a modo de indicador de la disponibilidad hídrica del sistema.

D) Variable de entrada N°3: Volumen embalsado en los principales embalses de la cuenca del Tajo

Como indicador adicional de la disponibilidad hídrica del sistema, se considera la incorporación de los volúmenes embalsados en ciertos embalses representativos ubicados en la cuenca del Tajo, específicamente Bolarque, Gabriel y Galán, Alcorlo, Atazar, Valmayor, Finisterre, Burguillo y San Juan.

El volumen que, en este caso, sirve como indicador de la disponibilidad hídrica de la cuenca del Tajo, corresponde a la suma de los volúmenes almacenados en los embalses mencionados al término del mes previo al que se ejecutará el desembalse. Por lo tanto, si los datos disponibles están medidos a fin de mes, éstos deben ser utilizados para el cálculo de los desembalses realizados durante el mes siguiente.

Para la formulación del modelo, se consideran mediciones de volúmenes acumulados en los 8 embalses realizadas durante el mismo período que las correspondientes a la variable de salida, es decir, desde octubre de 2014 hasta septiembre de 2022. Para este período, sin embargo, no existe una única fuente de datos. El CEDEX, en su anuario de aforos, sólo dispone de datos hasta septiembre de 2019, mientras que, al momento de la recopilación de información, el SAIH de la Confederación Hidrográfica del Tajo solo presenta datos desde octubre de 2021 en adelante. Con el objetivo de rellenar el período faltante, se incorporan los datos recopilados en la base de datos del Boletín Hidrológico Semanal del MITECO, el cual abarca la totalidad del período requerido. Sin embargo, antes de rellenar los datos, resulta necesaria la validación de esta información comparándola con los datos CEDEX-SAIH.

Debido a que en el Boletín del MITECO se registran mediciones semanales (correspondientes a cada día martes), se realiza una interpolación lineal que estime el volumen embalsado durante el último día de cada mes y, así, poder comparar esta información con la del CEDEX-SAIH. Los resultados indican que, para la gran mayoría de los embalses estudiados, los datos registrados en el Boletín Semanal son prácticamente iguales a los registrados en el CEDEX-SAIH. Sin embargo, Bolarque y Burguillo presentan ciertas diferencias. En Bolarque, si bien la correlación de los datos es bajísima y los datos del MITECO suelen ser menores que los del CEDEX-SAIH, al menos el rango en el que se mueven los valores es similar. Éste es el más pequeño de los embalses analizados y, además, presenta un comportamiento bastante estable, por lo que el relleno con los datos del MITECO no debiese producir errores significativos. En el caso de Burguillo, se observa un sesgo constante, donde los datos del MITECO se encuentran sistemáticamente unos 3.5 [hm³] por sobre los del CEDEX-SAIH. Este sesgo podría someterse a corrección, aunque, dada la capacidad del embalse (cercana a 200 [hm³]) y su influencia en la suma del volumen total embalsado, esta diferencia no generará errores significativos en la modelación.

Finalmente, luego de recopilar, verificar, rellenar y sumar los datos, la serie de datos considerada corresponde a la presentada en Figura 3.24:

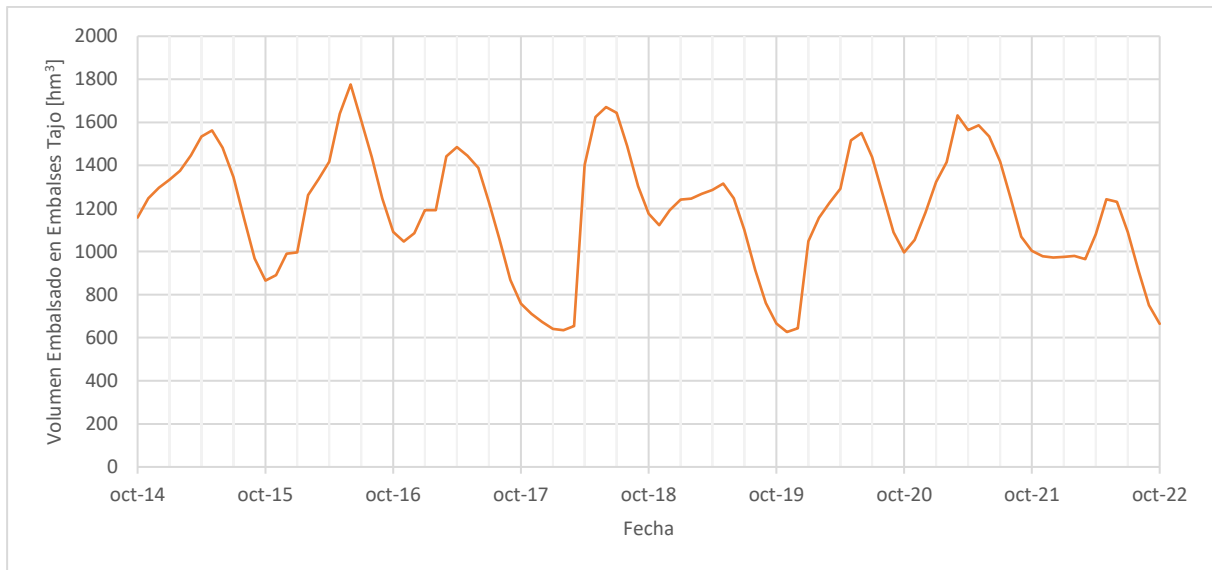


Figura 3.24. Serie histórica de volúmenes embalsados en Bolarque, Gabriel y Galán, Alcorlo, Atazar, Valmayor, Finisterre, Burguillo y San Juan (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (Confederación Hidrográfica del Tajo, 2022) - (MITECO, 2022)).

De forma adicional, a modo de comprobación de la relación existente entre esta variable de entrada y la variable de salida, se presentan las Figuras 3.25 y 3.26. En la primera se muestra la variable de entrada en contraste con la variable de salida, mientras que en la segunda se analiza su grado de correlación.

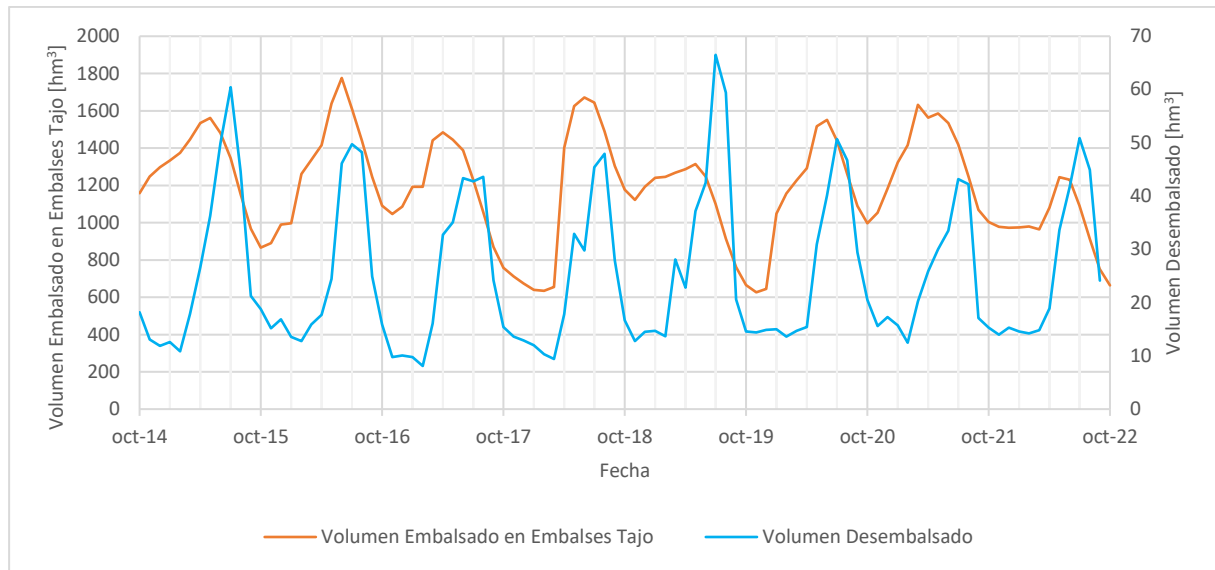


Figura 3.25. Contraste de series históricas de volúmenes embalsados en principales embalses de la cuenca del Tajo frente a volúmenes desembalsados (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (Confederación Hidrográfica del Tajo, 2022) - (MITECO, 2022) - (CEDEX, 2017-2022)).

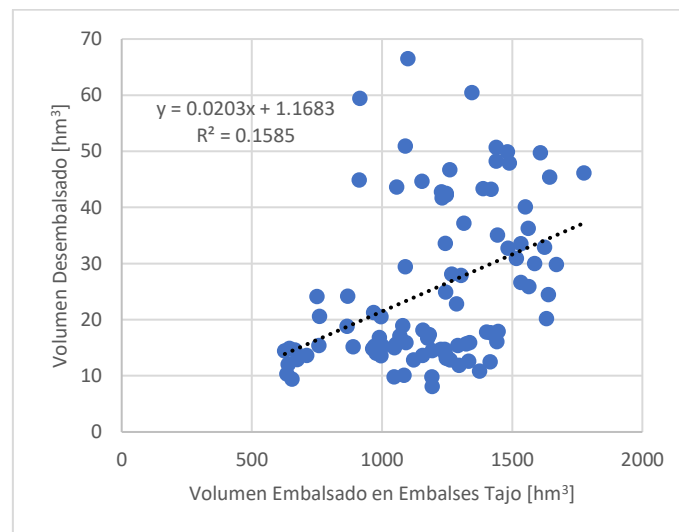


Figura 3.26. Correlación entre las series históricas de volúmenes embalsados en principales embalses de la cuenca del Tajo frente a volúmenes desembalsados (elaboración propia basada en (CEDEX, 2022) - (Confederación Hidrográfica del Tajo, 2022) - (MITECO, 2022) - (CEDEX, 2017-2022)).

A pesar de que la correlación existente es bastante pequeña, al menos se observa cierto grado de similitud en el comportamiento de ambas variables.

E) *Variable de entrada N°4: Mes en el que se realiza el desembalse*

Esta última variable es implementada en el modelo de simulación de desembalses al Tajo de la misma forma que se introduce en la formulación del modelo de trasvases. Debido a esto, su descripción detallada se incluye en el correspondiente apartado del modelo anterior.

Dado el comportamiento estacional que presentan los desembalses realizados al Tajo, los cuales dependen principalmente de los volúmenes mensuales de referencia indicados en la normativa del trasvase, esta variable de entrada corresponderá, seguramente, a la de mayor relevancia en la correcta formulación del modelo.

3.6. Definición de los sistemas difusos

3.6.1. Descripción de los modelos realizados

Los dos modelos difusos desarrollados para este estudio son formulados mediante la misma metodología, correspondiente al método de inferencia difusa descrito por Russel y Campbell (1996) y especificado en el apartado 3.3 de este informe. Dadas sus características, estos modelos pueden ser descritos como modelos lógicos difusos de tipo Takagi-Sugeno de orden cero, ya que los resultados que generan son no difusos, y se obtienen a partir la ponderación de salidas agrupadas constantes, no de combinaciones lineales entre los datos de entrada.

3.6.2. Números difusos

Las variables asociadas a cada modelo han sido descritas previamente, junto con las series históricas a considerar para la formulación de sus reglas difusas. Sin embargo, un paso previo al cálculo de las salidas agrupadas corresponde a la definición de los números difusos asociados a cada variable.

Para el desarrollo de ambos modelos, se considera la definición de 5 números difusos triangulares, homogéneos y equiespaciados para cada variable, los cuales son descritos a continuación.

A) Volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía

El dominio de esta variable se ha establecido en $[120, 2474]$ hm^3 . El límite inferior corresponde a una aproximación por debajo de los volúmenes mínimos registrados desde 1980, que alcanzaron los 127.9 hm^3 , mientras que el límite superior corresponde a la capacidad de almacenamiento conjunta de los embalses, 835 hm^3 el de Entrepeñas y 1639 hm^3 el de Buendía.

Con el objetivo de facilitar el cálculo de los números difusos, el dominio original de esta variable se ha trasladado para que éste comience en 0, quedando finalmente definido en el intervalo $[0, 2354]$ hm^3 . Por supuesto, al hacer esto, los datos observados deben trasladarse en la misma medida al momento de fuzzificarlos.

Luego de haber desplazado el dominio, los números difusos asociados al volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía, quedan definidos según se indica en la Figura 3.27:

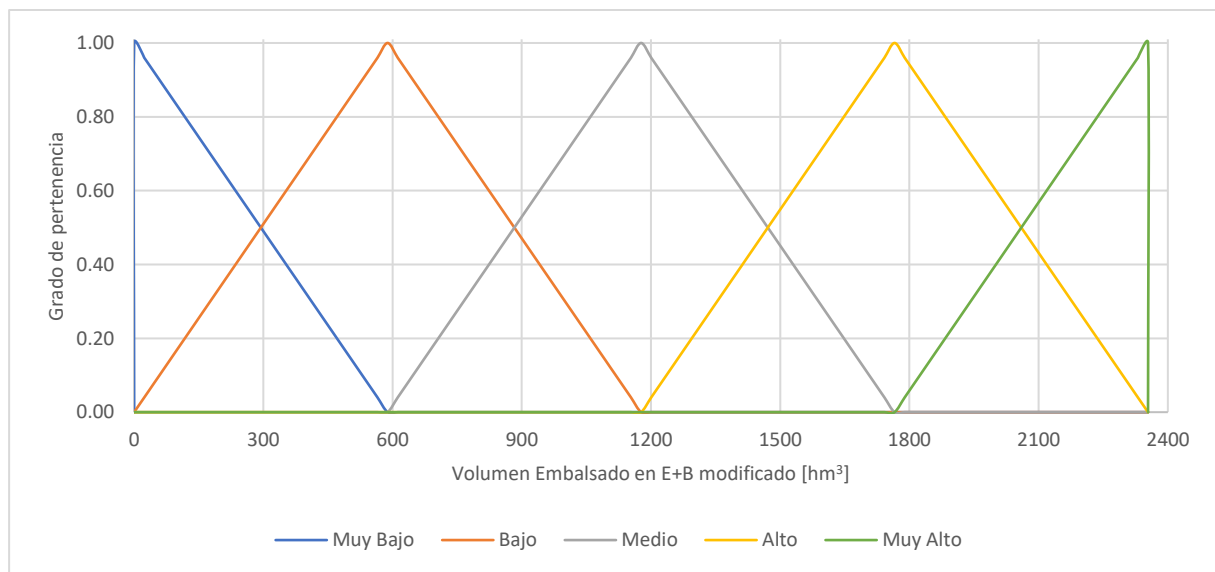


Figura 3.27. Números difusos asociados a la variable modificada de volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía.

B) Aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía durante los últimos 12 meses

El dominio de esta variable se ha establecido en $[200, 1500]$ hm^3 . El límite inferior corresponde a una aproximación por debajo de las aportaciones acumuladas mínimas registradas desde 1981, que alcanzaron los 250.2 hm^3 , mientras que el límite superior corresponde a una aproximación por encima de las aportaciones máximas registradas en el mismo período, que alcanzaron los 1441.1 hm^3 .

Con el objetivo de facilitar el cálculo de los números difusos, el dominio original de esta variable se ha trasladado para que éste comience en 0, quedando finalmente definido en el intervalo $[0, 1300]$ hm^3 . Por supuesto, al hacer esto, los datos observados deben trasladarse en la misma medida al momento de fuzzificarlos.

Luego de haber desplazado el dominio, los números difusos asociados a la aportación acumulada en Entrepeñas y Buendía durante los últimos 12 meses, quedan definidos según se indica en la Figura 3.28:

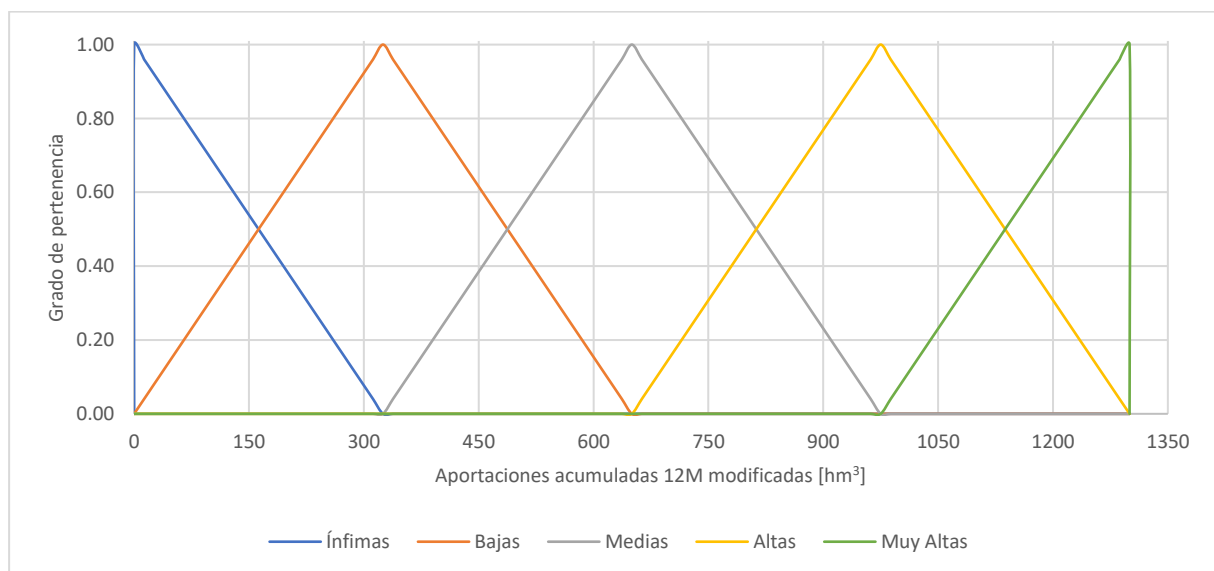


Figura 3.28. Números difusos asociados a la variable modificada de aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía durante los últimos 12 meses.

C) Volumen embalsado en los principales embalses de la cuenca del Segura

El dominio de esta variable se ha establecido en $[15, 718]$ hm^3 . El límite inferior corresponde a una aproximación por debajo de los volúmenes mínimos registrados desde 1980, que alcanzaron los 19.7 hm^3 , mientras que el límite superior corresponde a la capacidad de almacenamiento conjunta de los embalses, 437 hm^3 el de Cenajo, 210 hm^3 el de Fuensanta, 36 hm^3 el de Camarillas y 35 hm^3 el de Talave.

Con el objetivo de facilitar el cálculo de los números difusos, el dominio original de esta variable se ha trasladado para que éste comience en 0, quedando finalmente definido en el intervalo $[0, 703]$ hm^3 . Por supuesto, al hacer esto, los datos observados deben trasladarse en la misma medida al momento de fuzzificarlos.

Luego de haber desplazado el dominio, los números difusos asociados al volumen embalsado en los principales embalses de la cuenca del Segura quedan definidos según se indica en la Figura 3.29:

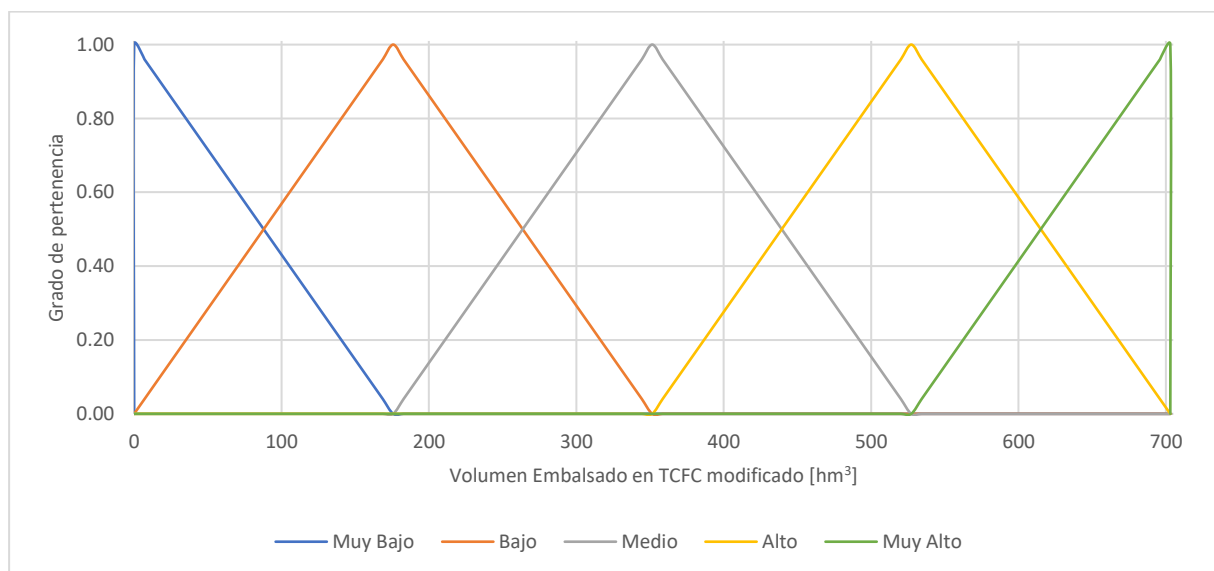


Figura 3.29. Números difusos asociados a la variable modificada de volúmenes embalsados en Talave, Camarillas, Fuensanta y Cenajo.

D) Volumen embalsado en los principales embalses de la cuenca del Tajo

El dominio de esta variable se ha establecido en $[340, 2144]$ hm^3 . El límite inferior corresponde a una aproximación por debajo de los volúmenes mínimos registrados desde 1988, mientras que el límite superior corresponde a la capacidad de almacenamiento conjunta de los embalses, 31 hm^3 el de Bolarque, 911 hm^3 el de Gabriel y Galán, 180 hm^3 el de Alcorlo, 426 hm^3 el de Atazar, 124 hm^3 el de Valmayor, 133 hm^3 el de Finisterre, 201 hm^3 el de Burguillo y 138 hm^3 el de San Juan.

Con el objetivo de facilitar el cálculo de los números difusos, el dominio original de esta variable se ha trasladado para que éste comience en 0, quedando finalmente definido en el intervalo $[0, 1804]$ hm^3 . Por supuesto, al hacer esto, los datos observados deben trasladarse en la misma medida al momento de fuzzificarlos.

Luego de haber desplazado el dominio, los números difusos asociados al volumen embalsado en los principales embalses de la cuenca del Tajo quedan definidos según se indica en la Figura 3.30:

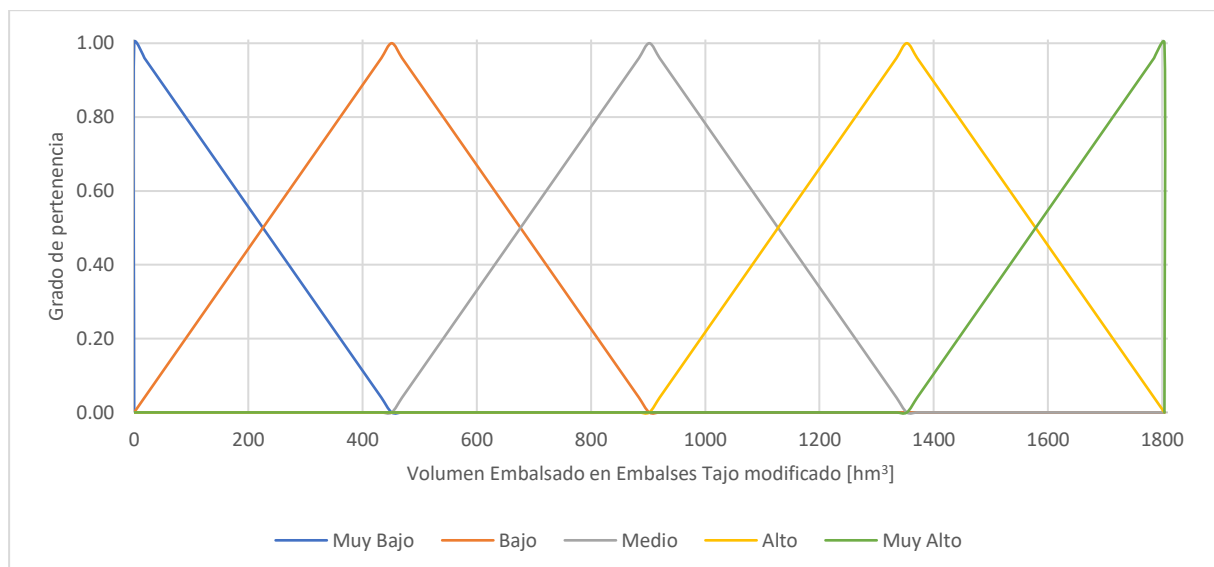


Figura 3.30. Números difusos asociados a la variable modificada de volúmenes embalsados en los principales embalses de la cuenca del Tajo.

3.6.3. Reglas difusas

Los mapas asociativos difusos de cada modelo están compuestos por todas las combinaciones posibles de números difusos, dando paso, cada sentencia, a una regla difusa diferente. Debido a que los dos modelos desarrollados tienen igual número de variables y sus números difusos son los mismos, las sentencias lógicas que componen sus mapas asociativos son, también, las mismas. Dichas sentencias son presentadas en la Tabla A.1 del Anexo A.

3.6.4. Parámetros adicionales

El único parámetro que queda por definir para la formulación completa de los modelos difusos corresponde al umbral ϵ_1 bajo el cual se considera no significativo el grado de pertenencia de una variable con respecto a una categoría. Luego de un proceso iterativo de prueba y error, se determina que al considerar un ϵ_1 igual a 0.3 se obtiene un buen grado de reproducción de las variables de salida.

3.6.5. Restricciones adicionales

De forma posterior a la formulación y ejecución del modelo difuso se aplican las siguientes restricciones y modificaciones sobre los resultados:

- Según las reglas del trasvase, los volúmenes trasvasados no pueden superar los 600 [hm³] en un mismo año hidrológico, por lo que, si se alcanza dicho valor, el resto de los volúmenes trasvasados durante el año debe ser cero.
- Según las reglas del trasvase, los volúmenes desembalsados al río Tajo no pueden superar los 365 [hm³] en un mismo año hidrológico, por lo que, si se alcanza dicho valor, el resto de los volúmenes desembalsados durante el año debe ser cero.

3.7. Proceso de calibración – validación

3.7.1. Relleno y corrección de salidas agrupadas

Los parámetros que describen las reglas de ejecución de los modelos desarrollados mediante el método de inferencia difusa no requieren de una calibración propiamente dicha, sino que ésta se incorpora en la formulación misma del modelo. Esto se debe a que dichos parámetros, específicamente las salidas agrupadas de cada regla difusa, han sido determinados a partir de las series de datos incorporadas en la concepción del modelo y, por lo tanto, ya se ajustan a su comportamiento particular. A pesar de lo anterior, algunas reglas pueden quedar indeterminadas o presentar resultados inconsistentes, lo que podría generar problemas al momento de simular nuevos datos.

Cada salida agrupada es formulada a partir de los sets de datos que cumplen con las condiciones lógicas asociadas a su regla difusa particular. De este modo, si ningún set de datos cumple con las condiciones asociadas a cierta regla difusa, su salida agrupada no podrá ser determinada y el modelo será incapaz de reproducir comportamientos que se ajusten a la misma. Por otra parte, si existen sets de datos que sí cumplen con las condiciones especificadas por dicha regla, pero esos datos en particular son deficientes o no se ajustan al comportamiento esperado, la salida agrupada resultante podría reproducir las variables de manera inapropiada. Para evitar estos problemas, en un paso posterior a la determinación de las salidas agrupadas mediante el método de inferencia difusa, los valores indeterminados deben ser rellenados y los anómalos corregidos.

La premisa lógica que rige el relleno y corrección de las salidas agrupadas indica que, si la variable de salida del modelo es directamente proporcional a las variables de entrada, como se ha verificado en este caso, las sueltas agrupadas también debiesen tener una proporcionalidad directa en relación con los números difusos referenciados en sus respectivas sentencias. Es decir, las salidas agrupadas de sentencias lógicas que incluyan categorías elevadas, como “Alto” o “Muy Alto”, debiesen ser siempre mayores o iguales que las salidas agrupadas de sentencias lógicas que incluyan categorías menores, como “Bajas” o “Muy

Bajas”, de modo que los resultados generados a partir de datos de entrada altos sean mayores que los generados a partir de datos de entrada bajos, y viceversa.

Para el relleno y corrección de las salidas agrupadas siguiendo la premisa lógica descrita, en este estudio se propone el procedimiento planteado a continuación:

- Como primer paso, se debe verificar que las sentencias lógicas que componen el mapa asociativo difuso se encuentren ordenadas en forma creciente, esto es, que las primeras sentencias incorporen números difusos menores que las siguientes. A modo de ejemplo se plantea un modelo con 2 variables de entrada a y b ; 1 variable de salida c ; y 3 números difusos “bajo”, “medio”, “alto”; cuyas salidas agrupadas deben ser rellenas y corregidas. El mapa asociativo difuso que describe el comportamiento de este modelo sería el siguiente:

- 1.- Si a es bajo y b es bajo , entonces c es 1
- 2.- Si a es bajo y b es medio , entonces c es 3
- 3.- Si a es bajo y b es alto , entonces c es /
- 4.- Si a es medio y b es bajo , entonces c es 2
- 5.- Si a es medio y b es medio , entonces c es 9
- 6.- Si a es medio y b es alto , entonces c es 3
- 7.- Si a es alto y b es bajo , entonces c es /
- 8.- Si a es alto y b es medio , entonces c es 5
- 9.- Si a es alto y b es alto , entonces c es 6

- Se generan 2 nuevas series de salidas agrupadas, obtenidas a partir de modificaciones realizadas a la serie original (la cual fue calculada mediante el método de inferencia difusa).
- En la primera serie modificada, se debe verificar que cada salida agrupada sea **menor o igual** que las salidas agrupadas asociadas a todas las otras sentencias que presenten 1, y solo 1, de sus números difusos en la categoría **inmediatamente superior** al suyo, comparando entre números difusos asociados a la misma variable. Si esto no se

cumple, las salidas agrupadas indeterminadas o inconsistentes deben ser rellenadas o modificadas según este mismo criterio, considerando el **mayor** valor posible. Siguiendo con el ejemplo, el primer mapa modificado quedaría de la siguiente forma:

- 1.- Si a es bajo y b es bajo , entonces c es 1
- 2.- Si a es bajo y b es medio , entonces c es 3
- 3.- Si a es bajo y b es alto , entonces c es ~~3~~
- 4.- Si a es medio y b es bajo , entonces c es 2
- 5.- Si a es medio y b es medio , entonces c es ~~3~~
- 6.- Si a es medio y b es alto , entonces c es 3
- 7.- Si a es alto y b es bajo , entonces c es ~~5~~
- 8.- Si a es alto y b es medio , entonces c es 5
- 9.- Si a es alto y b es alto , entonces c es 6

- En la segunda serie modificada, se debe verificar que cada salida agrupada sea **mayor o igual** que las salidas agrupadas asociadas a todas las otras sentencias que presenten 1, y solo 1, de sus números difusos en la categoría **inmediatamente inferior** al suyo, comparando entre números difusos asociados a la misma variable. Si esto no se cumple, las salidas agrupadas indeterminadas o inconsistentes deben ser rellenadas o modificadas según este mismo criterio, considerando el **menor** valor posible. Siguiendo con el ejemplo, el segundo mapa modificado quedaría de la siguiente forma:

- 1.- Si a es bajo y b es bajo , entonces c es 1
- 2.- Si a es bajo y b es medio , entonces c es 3
- 3.- Si a es bajo y b es alto , entonces c es ~~3~~
- 4.- Si a es medio y b es bajo , entonces c es 2
- 5.- Si a es medio y b es medio , entonces c es 9
- 6.- Si a es medio y b es alto , entonces c es ~~3~~ 9
- 7.- Si a es alto y b es bajo , entonces c es ~~2~~
- 8.- Si a es alto y b es medio , entonces c es ~~5~~ 9
- 9.- Si a es alto y b es alto , entonces c es ~~6~~ 9

- Finalmente, el mapa asociativo difuso rellenado y corregido corresponde al que incorpora, en cada sentencia, las mínimas salidas agrupadas obtenidas en las series modificadas. De esta manera, el ejemplo concluye con el siguiente resultado, quedando rellenos los valores indeterminados y corregido un valor que se alejaba del comportamiento esperado:

- 1.- Si a es bajo y b es bajo , entonces c es 1
- 2.- Si a es bajo y b es medio , entonces c es 3
- 3.- Si a es bajo y b es alto , entonces c es ~~3~~
- 4.- Si a es medio y b es bajo , entonces c es 2
- 5.- Si a es medio y b es medio , entonces c es ~~3~~
- 6.- Si a es medio y b es alto , entonces c es 3
- 7.- Si a es alto y b es bajo , entonces c es ~~2~~
- 8.- Si a es alto y b es medio , entonces c es 5
- 9.- Si a es alto y b es alto , entonces c es 6

- También puede ocurrir que las salidas agrupadas indeterminadas o inconsistentes correspondan a las asociadas con la primera o última sentencia lógica. En ese caso, una posibilidad es reemplazar ese valor por el dato mínimo o máximo, según sea el caso, de la serie de datos referente a la variable de salida.

3.7.2. Indicador de desempeño

Para evaluar el grado de exactitud con la que un modelo reproduce datos medidos u observados, es posible utilizar diversos indicadores de desempeño. En este caso, dada su utilidad y su extendido uso en el área de la hidrología, se considera la evaluación de los modelos mediante la utilización del índice de Nash-Sutcliffe (NS), determinado a partir de la Ecuación (6):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \overline{Qobs})^2} \quad (6)$$

En esta ecuación $Qsim_i$ representa los valores simulados por el modelo, mientras que $Qobs_i$ los datos observados y \overline{Qobs} su promedio. Ante esto, lo que hace el indicador es comparar el desempeño del modelo frente a la simple consideración del promedio de los datos observados. Valores de índice de Nash-Sutcliffe menores que 0 indican que el modelo presenta menor capacidad predictiva que el promedio de los datos, por lo que su utilidad es nula. Por el contrario, índices de Nash-Sutcliffe mayores que 0 indican que la capacidad predictiva del modelo supera a la del promedio de los datos, mientras que un modelo que reproduce los datos observados de manera perfecta presenta un índice de Nash-Sutcliffe igual a 1.

3.7.3. Procedimiento de validación cruzada K-Fold

Para lograr que los modelos reproduzcan la realidad de la mejor manera posible, es necesario calibrarlos a partir de mediciones que representen de manera certera la relación que existe entre las distintas variables que lo componen. Es por esto que el desempeño de un modelo depende, en gran medida, de la calidad de los datos con los que se calibre.

La selección de los datos considerados para la calibración del modelo corresponde, por lo tanto, a una decisión clave en el proceso de su calibración. Se debe escoger un período relativamente extenso, que incluya la mayor cantidad de escenarios posibles, para que así el modelo sea capaz de incorporar distintas situaciones en su funcionamiento. Durante este período, además, la relación entre las variables debe ser consistente, para que el modelo pueda reproducirla de manera acertada. Lamentablemente, el período de datos disponible para la formulación de los modelos de lógica difusa desarrollados en este estudio no cumple con ninguna de estas condiciones. Solo se dispone de 8 años de datos, un período cortísimo en términos hidrológicos, durante el cual, además, se realizaron modificaciones en la normativa que rige el funcionamiento del sistema. Cualquier periodo de calibración, por lo tanto, será insuficiente para dotar al modelo de la capacidad requerida para reproducir el comportamiento de las variables de manera perfecta.

Ante esta problemática, se considera la aplicación del método de validación cruzada *K-Fold* (*K-Fold cross validation*), que no solo reduce la variabilidad generada por la selección del período de calibración, sino que, además, permite homogeneizar los efectos que los cambios de reglas producen en los resultados del modelo.

El procedimiento de validación cruzada *K-Fold* consiste en dividir la totalidad de datos disponibles en k grupos del mismo tamaño: $k-1$ grupos se emplean para calibrar el modelo mientras que el grupo restante se emplea para validarlo. En un proceso iterativo, se realizan k calibraciones considerando un grupo diferente para validar en cada iteración (Amat Rodrigo, 2016). El proceso genera k calibraciones distintas, por lo que, finalmente, se considera como representativo el promedio de los parámetros obtenidos en cada calibración.

Para este caso de estudio en particular, debido a que se dispone de 8 años de datos, desde el año hidrológico 2014/15 hasta el año hidrológico 2021/22, se opta por realizar 8 calibraciones, apartando, para cada una de ellas, los datos de un año diferente. Finalmente, la calibración definitiva del modelo queda determinada por el promedio de las salidas agrupadas resultantes en cada una de las iteraciones.

3.7.4. Análisis de sensibilidad

Posterior a la calibración de los modelos difusos, se propone la realización de un análisis de sensibilidad de las variables. Este análisis permite identificar cuáles son las variables de entrada más relevantes en la ejecución del modelo y en qué medida su correcta estimación influye en la calidad de los resultados.

El procedimiento consiste en modificar, de manera independiente, cada una de las series de datos asociadas a las variables de entrada de cada modelo y analizar, luego de su ejecución, los cambios que estas variaciones generan en los resultados. De este modo, las variables cuyas modificaciones produzcan grandes fluctuaciones en los resultados se consideran altamente influyentes para la ejecución del modelo, mientras que las variables cuyas modificaciones no

produzcan, prácticamente, cambios en los resultados, probablemente no sean muy relevantes.

3.8. Predicción de variables

Luego de haber definido, elaborado y calibrado los modelos difusos para la simulación de volúmenes trasvasados a la cuenca del Segura y de volúmenes desembalsados al río Tajo, éstos se integran en un modelo predictivo que permita estimar, en una proyección de siete meses, los volúmenes que serán trasvasados al Segura, los volúmenes que serán desembalsados al río Tajo y los volúmenes que permanecerán almacenados en los embalses de Entrepeñas y Buendía; en función de variables conocidas al inicio de la predicción.

En particular, el nuevo modelo se desarrolla mediante planillas de cálculo Excel y contempla la unión de los modelos de trasvases al Segura y desembalses al Tajo. Para su ejecución, dichos modelos requieren como datos de entrada los volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía al término del mes anterior, las aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía durante los 12 meses anteriores, el volumen embalsado en los principales embalses de la cuenca del Segura al término del mes anterior y el volumen embalsado en los principales embalses de la cuenca del Tajo al término del mes anterior, todas variables conocidas. A partir de estos datos, los modelos reproducen el volumen trasvasado al Segura y el volumen desembalsado al Tajo hacia el término del mes en curso, los cuales constituyen las salidas de los embalses de Entrepeñas y Buendía. Proyectando también las aportaciones que reciben Entrepeñas y Buendía, las cuales constituyen las entradas a los embalses, además de las evaporaciones esperadas, se procede a calcular, mediante un balance hídrico, el volumen almacenado a fin de mes en los embalses de Entrepeñas y Buendía. Este volumen predicho, junto con las aportaciones proyectadas, que a su vez permiten estimar nuevas aportaciones acumuladas, además de los volúmenes embalsados en los embalses representativos de ambas cuencas, constituyen las variables de entrada para dar paso a la simulación de las sueltas del mes siguiente. De esta forma, mediante la aplicación de cálculos sucesivos, se logra predecir las distintas variables hasta alcanzar el horizonte de siete meses.

Como se menciona en la descripción del procedimiento, son varias las variables que deben predecirse para dar paso a las simulaciones de meses futuros, por lo cual, los distintos procedimientos se detallan a continuación.

3.8.1. Procedimientos para la predicción de variables

A) *Aportaciones mensuales en Entrepeñas y Buendía*

Si bien la aportación mensual en la cabecera del Tajo no es, directamente, una variable de entrada del modelo, su predicción es requerida tanto para el cálculo de las aportaciones acumuladas en 12 meses como por su participación en el balance hídrico de los embalses de Entrepeñas y Buendía.

La predicción de esta variable es realizada siguiendo el procedimiento establecido para este fin en las reglas de explotación del trasvase (Real Decreto 773/2014, 2014), el cual permite estimar, mediante cálculos sucesivos, las aportaciones esperadas durante el mes siguiente en función de las aportaciones registradas o proyectadas durante el mes inmediatamente anterior. Dicho procedimiento indica lo siguiente:

- 1º Se fijan el mes inicial de la predicción, o mes actual, que es el que comienza en el momento de realizar la predicción, y el mes previo anterior, que es el que acaba de concluir. La aportación en este mes previo, expresada en hm^3 , se denominará x_p .
- 2º Se extraen los valores b , a_2 , a_5 de la Tabla 3.1, correspondientes al mes actual.
- 3º Se calculan, $x_2 = a_2 \cdot x_p^b$ y $x_5 = a_5 \cdot x_p^b$
- 4º Se adopta como previsión para el mes actual el valor x_2 [hm^3], se hace $x_p = x_5$, y se avanza al siguiente mes, que será ahora el nuevo mes actual, volviendo al paso 2º hasta concluir todo el periodo de predicción deseado.

Tabla 3.1. Parámetros para la predicción de aportaciones en Entrepeñas y Buendía (Real Decreto 773/2014, 2014).

Mes actual	b	a2	a5
Octubre	0.794	1.983	2.399
Noviembre	0.933	1.178	1.504
Diciembre	1,012	0.996	1.400
Enero	0.971	0.825	1.301
Febrero	0.631	2.997	4.454
Marzo	0.638	3.410	4.832
Abril	0.629	3.933	5.319
Mayo	0.718	2.416	3.257
Junio	0.714	1.911	2.564
Julio	0.562	3.379	4.242
Agosto	0.587	3.049	3.664
septiembre	0.687	2.228	2.651

De esta manera, a partir de cada dato de aportación medido, se realizan predicciones de la aportación esperada durante los 6 meses siguientes.

B) Aportaciones acumuladas en Entrepeñas y Buendía durante los últimos 12 meses

La variable de aportaciones acumuladas corresponde a la suma de las aportaciones mensuales registradas en la cabecera del Tajo durante los últimos 12 meses, por lo que su predicción se basa completamente en la proyección de las aportaciones mensuales.

Para el primer mes de predicción de las sueltas, igual como ocurre con las aportaciones mensuales, las aportaciones acumuladas durante los 12 meses previos son conocidas. Sin embargo, para el segundo mes de predicción, de las 12 aportaciones previas a la simulación solo se conocen 11, debiendo incluirse, por lo tanto, las aportaciones proyectadas del último mes. Para la proyección del mes siguiente, el tercero, la suma incluye 10 meses de aportaciones conocidas y 2 meses de aportaciones proyectadas. Así ocurre, sucesivamente, mientras se aumenta el horizonte de proyección, hasta que, finalmente, para el último mes de predicción, las aportaciones acumuladas incluyen 6 meses de aportaciones conocidas y 6

meses de aportaciones proyectadas, por lo que, esta variable posee, siempre, una componente conocida.

C) Volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía

El proceso para la predicción de esta variable consiste en el cálculo sucesivo de los volúmenes proyectados, por medio de la aplicación mensual de la ley de conservación de masas. Esto significa que el volumen que se espera que los embalses de Entrepeñas y Buendía almacenen a fin de mes corresponde al volumen embalsado al término del mes anterior, sumado a las variaciones de volumen predichas durante el mes de simulación, específicamente, entradas menos salidas y evaporaciones (no se toman en cuenta las infiltraciones). En términos concretos, las entradas a los embalses corresponden a las aportaciones mensuales previstas según el método previamente indicado; las salidas quedan representadas por los volúmenes trasvasados hacia la cuenca del Segura y los desembalses realizados al río Tajo, calculados ambos empleando los sistemas lógicos difusos previamente descritos; y, finalmente, las evaporaciones se estiman a partir del procedimiento descrito en el párrafo siguiente. La predicción de los volúmenes almacenados queda determinada, por lo tanto, en función de las proyecciones de cada una de las variables mencionadas.

Las evaporaciones contempladas para la formulación del balance hídrico de los embalses Entrepeñas y Buendía son directamente extraídas de la Tabla 3.2, la cual agrupa las predicciones de evaporación desarrolladas por la CCEATS en función del mes y del volumen embalsado en dichos embalses a comienzos del mes.

Tabla 3.2. Evaporaciones mensuales esperables en Entrepeñas y Buendía, en [hm³], según las existencias a comienzos de mes (CEDEX, 2017-2022).

Existencias en Entrepeñas y Buendía [hm ³]	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	1	1	1	2	2	2	3	3	2	2	1	1
200	1	1	2	2	3	3	4	4	3	2	1	1
300	1	2	2	3	3	4	6	6	4	3	2	1

Existencias en Entrepeñas y Buendía [hm ³]	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
400	2	2	3	3	4	5	7	7	5	3	2	2
500	2	2	3	4	5	6	8	8	5	4	2	2
600	2	3	4	4	5	6	9	9	6	4	2	2
700	2	3	4	5	6	7	10	10	7	5	3	2
800	2	3	5	5	7	8	12	11	8	5	3	2
900	3	3	5	6	7	9	13	12	8	6	3	3
1000	3	4	5	6	8	9	14	13	9	6	3	3
1100	3	4	6	7	8	10	15	14	10	7	3	3
1200	3	4	6	7	9	11	16	15	10	7	4	3
1300	3	4	6	7	9	11	16	16	11	8	4	3
1400	3	5	7	8	10	12	17	17	11	8	4	3
1500	4	5	7	8	10	12	18	18	12	8	4	4
1600	4	5	7	9	11	13	19	19	13	9	4	4
1700	4	5	8	9	11	13	20	20	13	9	5	4
1800	4	5	8	9	12	14	21	20	14	9	5	4
1900	4	5	8	10	12	15	22	21	14	10	5	4
2000	4	6	9	10	13	15	22	22	15	10	5	4
2100	4	6	9	10	13	16	23	23	15	11	5	4
2200	5	6	9	11	13	16	24	23	16	11	5	5
2300	5	6	9	11	14	16	25	24	16	11	6	5
2400	5	6	10	11	14	17	25	25	17	11	6	5
2500	5	7	10	11	14	17	26	25	17	12	6	5

D) Volúmenes embalsados en los principales embalses de las cuencas del Segura y del Tajo

En el presente trabajo no se dispone de modelos capaces de predecir los volúmenes almacenados en los principales embalses de las cuencas del Segura ni del Tajo. Podrían hacerse estimaciones mediante modelos estocásticos o modelos de gestión de recursos hídricos que usen predicciones hidrológicas como dato de entrada, pero ello implica trabajos de modelación complejos, en ambas cuencas, que escapan del objetivo del presente estudio. Por lo tanto, a falta de predicción, en estos casos se considera directamente la utilización de los registros históricos correspondientes. Esta consideración implica, sin embargo, que las calidades de predicción obtenidas en el modelo desarrollado corresponden a un límite superior y, por lo tanto, se verán disminuidas al incluir futuros modelos de predicción de estos volúmenes.

3.8.2. *Metodología para la estimación de la capacidad predictiva del modelo*

Para valorar la calidad de los resultados predichos y poder evaluar el desempeño del modelo en cuanto a su capacidad predictiva, la proyección de los resultados se realiza a partir de datos históricos conocidos y se extiende durante períodos pasados en los que todas las variables ya han sido medidas y registradas. De esta manera, se hace posible la comparación de dichas predicciones frente a valores reales conocidos o previamente modelados, según sea el caso, lo que permite estimar su calidad, asumiendo que en un uso de los modelos en tiempo real esta calidad se mantendrá.

Como indicadores del desempeño de los modelos predictivos se consideran los errores medios absolutos y los errores medios relativos que presentan los resultados en relación con los datos medidos y en relación con los trasvases o desembalses previamente simulados.

4. RESULTADOS

4.1. Desempeño de los modelos de Lógica Difusa para las series históricas

En el presente apartado se exponen y analizan los resultados conseguidos por los dos modelos de lógica difusa desarrollados; el de volúmenes trasvasados a la cuenca del Segura y el de volúmenes desembalsados a la cuenca del Tajo, luego de ser cada uno calibrado y validado considerando sus respectivas series históricas.

4.1.1. Modelación de volúmenes trasvasados al Segura

A) *Proceso y rendimiento de la calibración*

Según la metodología descrita, el modelo desarrollado es calibrado por medio de un proceso de calibración-validación cruzada (*cross validation*). En este método se realizan varias calibraciones del mismo modelo, cada una de ellas asociada a distintas ventanas temporales de la serie de datos histórica, para, posteriormente, establecer como resultado final el promedio de las salidas agrupadas resultantes en cada calibración. Ya que se dispone de 8 años de datos, desde el año hidrológico 2014/15 hasta el año hidrológico 2021/22, se opta por realizar 8 calibraciones preliminares, apartando para cada una de ellas, los datos de un año diferente. Las salidas agrupadas resultantes para cada una de las calibraciones preliminares se encuentran detalladas en la Tabla A.2 del Anexo A. Por otra parte, los trasvases modelados considerando cada una de estas calibraciones son presentados, respectivamente, en las Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8, mientras que sus desempeños son expuestos en la Tabla 4.1.

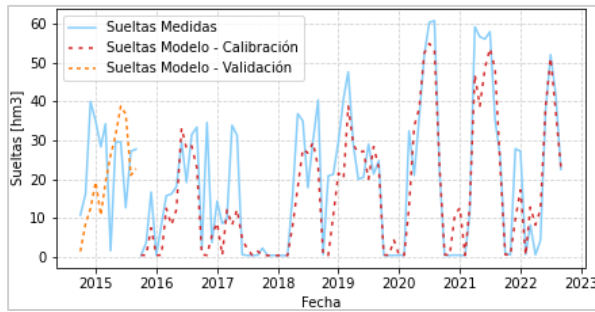


Figura 4.1. Traslases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°1 (apartando el año 2014/15).

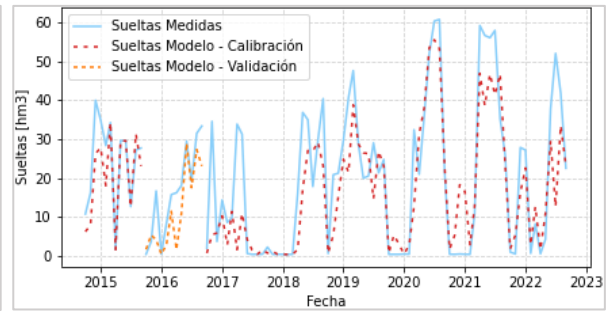


Figura 4.2. Traslases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°2 (apartando el año 2015/16).

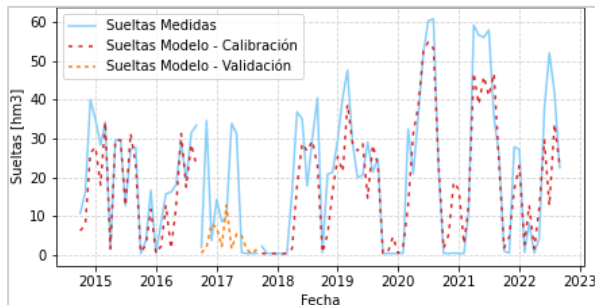


Figura 4.3. Traslases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°3 (apartando el año 2016/17).

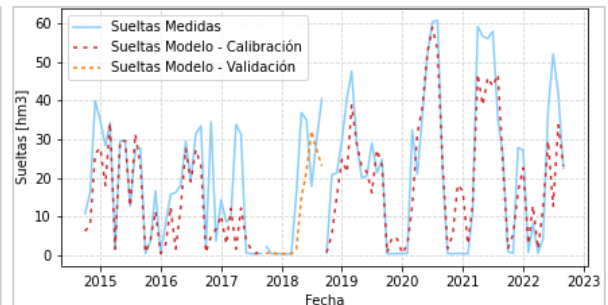


Figura 4.4. Traslases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°4 (apartando el año 2017/18).

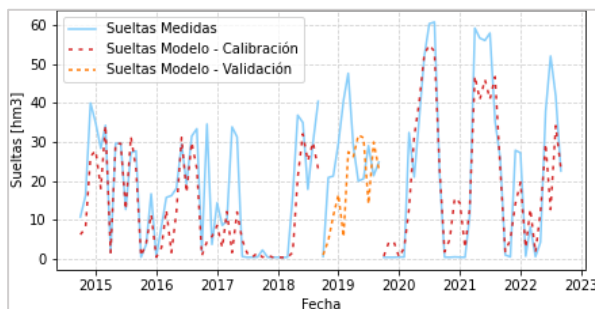


Figura 4.5. Traslases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°5 (apartando el año 2018/19).

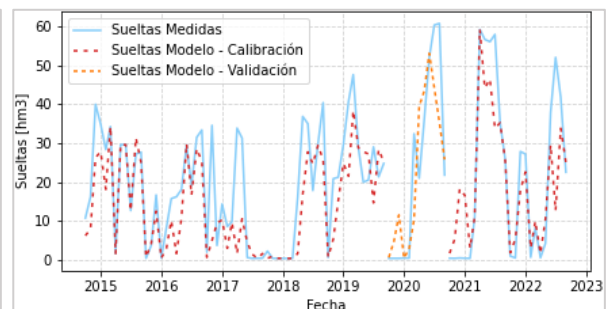


Figura 4.6. Traslases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°6 (apartando el año 2019/20).

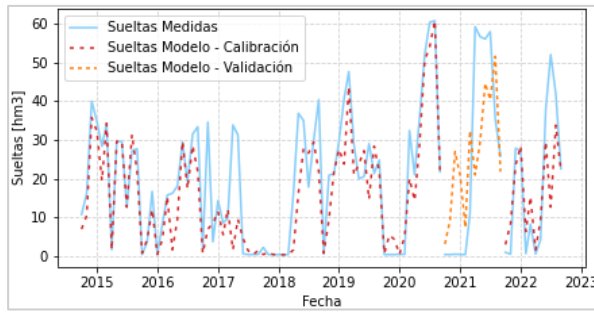


Figura 4.7. Trasvases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°7 (apartando el año 2020/21).

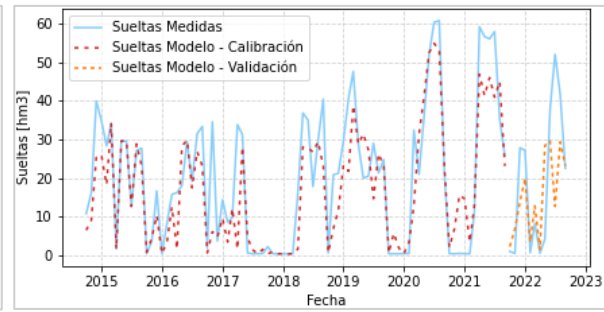


Figura 4.8. Trasvases al Segura modelados según Calibración Preliminar N°8 (apartando el año 2021/22).

Tabla 4.1. Desempeño de Calibraciones Preliminares en Modelo de Trasvases al Segura.

Calibración	Año Apartado (Año de Validación)	Índice de Nash Calibración	Índice de Nash Validación
1	2014/15	0.743	-1.085
2	2015/16	0.675	0.581
3	2016/17	0.730	-0.400
4	2017/18	0.685	0.536
5	2018/19	0.705	-0.831
6	2019/20	0.622	0.696
7	2020/21	0.670	0.385
8	2021/22	0.735	0.294

En todos los casos, los desempeños de calibración resultan satisfactorios. Los índices de Nash-Sutcliffe fluctúan entre 0.622 y 0.743, evidenciándose el buen ajuste del modelo en relación con los registros históricos considerados en el proceso.

Las validaciones preliminares se realizan tomando como referencia los años hidrológicos que no se utilizaron en la calibración, por lo que, como es de esperar, los desempeños obtenidos en validación resultan ser menores que los obtenidos en calibración. Cabe recordar que, durante el período analizado, las reglas de explotación que rigen la operación del trasvase fueron modificadas en varias ocasiones. Las reglas dispuestas en 2014 se aplican, al principio de la serie, de manera parcial y se escalonan anualmente desde su publicación hasta diciembre

del 2017, entrando en completo vigor en enero de 2018 y siendo nuevamente modificadas en octubre de 2021. Por ello es esperable que las calibraciones del modelo no representen de forma estricta, aunque sí semejante, el comportamiento registrado durante los distintos períodos. Esta fluctuación en la operación complica los procesos de calibración y validación tradicionales, y es el principal motivo por el cual se propone el procedimiento de calibración-validación cruzada, para homogeneizar los efectos que los cambios en las reglas producen en los resultados del modelo.

Finalmente, la calibración definitiva del modelo se obtiene luego de promediar las salidas agrupadas resultantes en cada una de las calibraciones preliminares. Estos resultados se encuentran detallados en la Tabla A.2 del Anexo A, mientras que los trasvases modelados considerando estos parámetros definitivos son los presentados en la Figura 4.9.

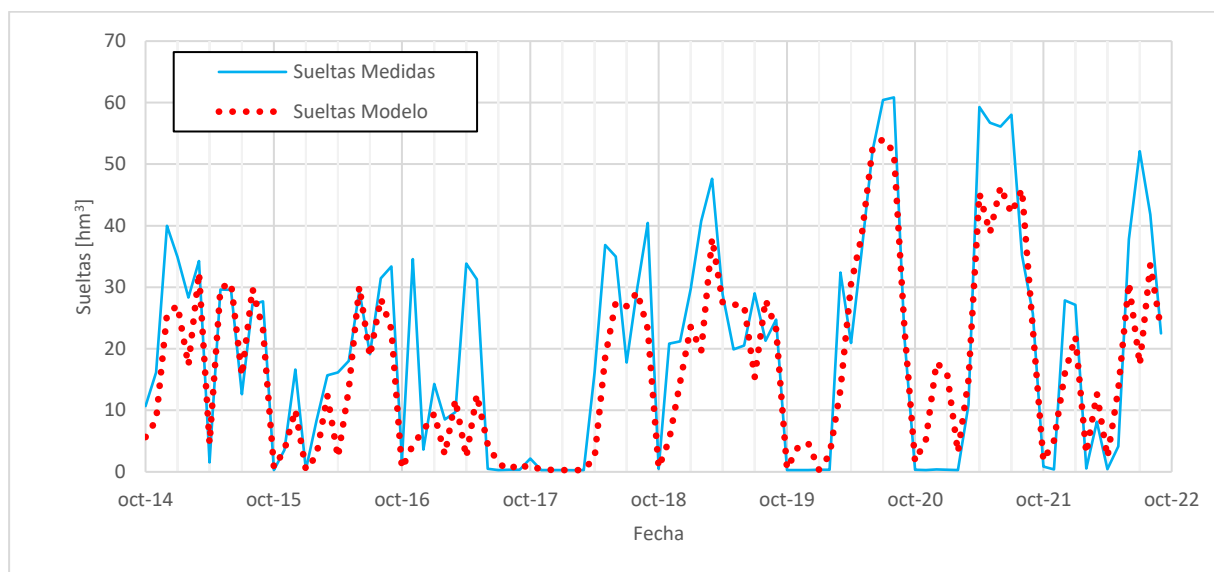


Figura 4.9. Trasvases al Segura modelados según Calibración Definitiva.

Comparando, a grandes rasgos, los resultados obtenidos con los registros de la serie histórica completa, se puede observar que el modelo emula bastante bien los datos medidos, aunque con dificultades para reproducir los picos.

El desempeño general del modelo queda representado por un índice de Nash-Sutcliffe bastante satisfactorio, igual a 0.689, por lo que se considera que el modelo se ajusta apropiadamente a los registros históricos. Por otra parte, uno de los objetivos del modelo generado es facilitar la gestión en tiempo real y la planificación en el uso del recurso hídrico, por lo que resulta útil verificar su rendimiento en relación con los trasvases realizados durante el ejercicio de las reglas de explotación actualmente vigentes, es decir, considerando los trasvases registrados a lo largo del último año hidrológico de la serie. En este caso, el modelo se valida con un índice de Nash-Sutcliffe igual a 0.575, un valor adecuado y superior a la mayoría de los desempeños de validación preliminares obtenidos durante el procedimiento de validación cruzada, por lo que se verifica la capacidad del modelo para reproducir los volúmenes trasvasados siguiendo las reglas de explotación vigentes. A continuación, en la Figura 4.10, se presenta en detalle el ajuste de dicho período y luego, en la Tabla 4.2, se resumen los indicadores de desempeño mencionados.

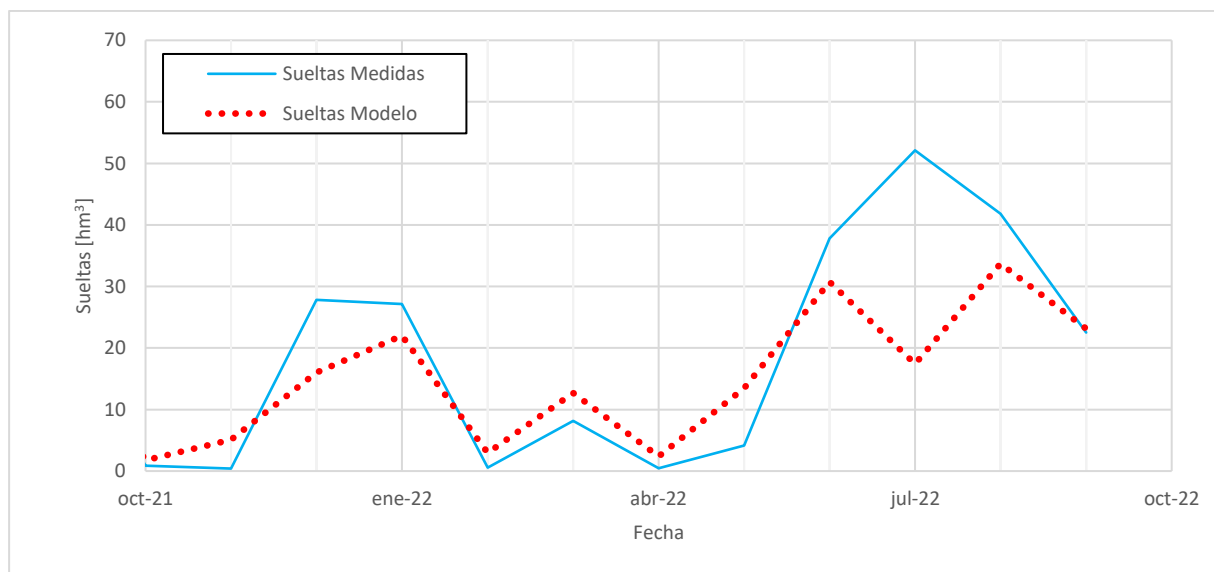


Figura 4.10. Trasvases al Segura modelados según Calibración Definitiva. Detalle del período en el que han estado en vigencia las últimas reglas de explotación.

Tabla 4.2. Desempeño del Modelo de Trasvases al Segura para distintos períodos de relevancia.

Período	Índice de Nash
Serie completa (2014/15 – 2021/22)	0.689
Reglas de explotación vigentes (2021/22)	0.575

B) Valores medios mensuales

El índice de Nash-Sutcliffe permite estimar el desempeño general del modelo; sin embargo, para un análisis más acabado de la calidad de los resultados, se revisan, también las diferencias existentes entre los datos medios históricos y los volúmenes medios modelados. De esta manera, en la Figura 4.11, se presentan los trasvases medios mensuales registrados y los trasvases medios mensuales modelados.

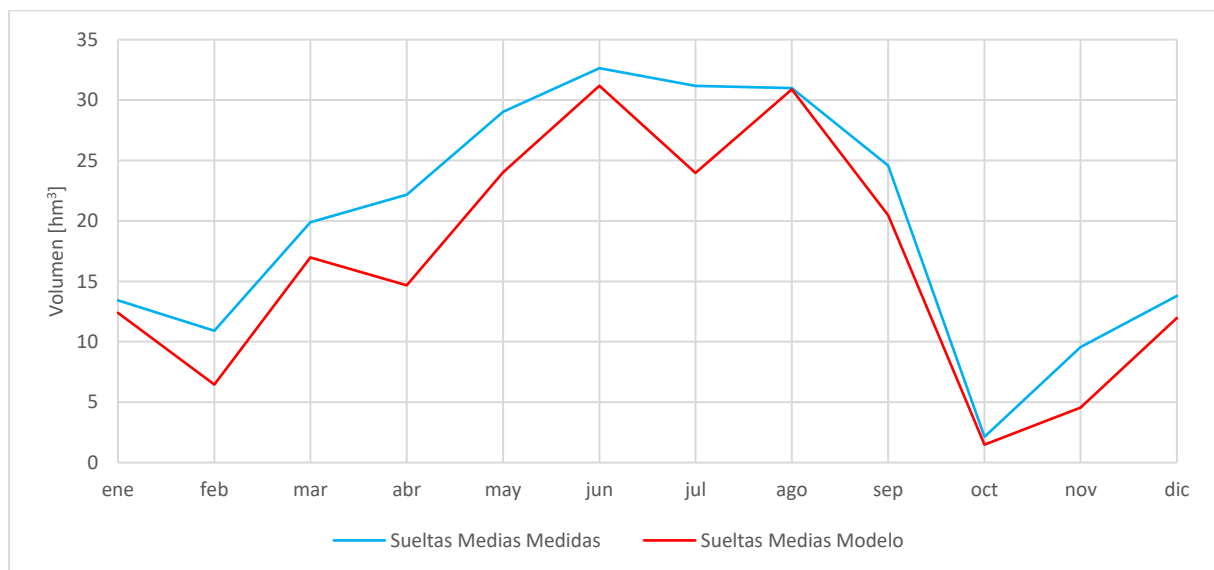


Figura 4.11. Trasvases medios mensuales.

Se observa una clara similitud en el comportamiento medio de ambas curvas; sin embargo, se evidencia una tendencia a la subestimación de los volúmenes trasvasados, ya que, como se comentó con anterioridad, el modelo presenta dificultades para reproducir los valores pico.

Los errores medios mensuales de los valores modelados con respecto a los valores medidos quedan representados, en la Figura 4.12, por la diferencia entre los datos históricos y los volúmenes modelados.

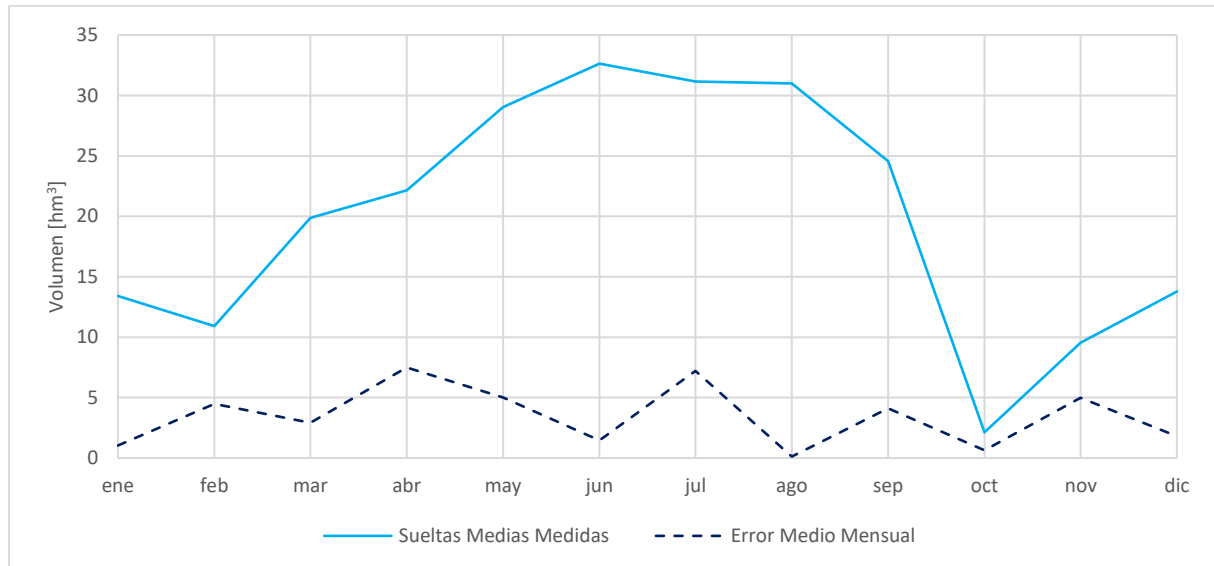


Figura 4.12. Errores medios mensuales de la modelación de trasvases al Segura con respecto a los trasvases medidos.

En promedio, los errores rondan los 3 [hm³], dependiendo del mes modelado, y, como media mensual, no superan los 8 [hm³]. Estos resultados son relativamente buenos considerando que los trasvases medidos promedian 20 [hm³] y, como media mensual, pueden superar los 32 [hm³].

Para una última revisión, en la Figura 4.13, se presentan los mismos errores medios mensuales, pero normalizados con respecto al valor medio mensual medido.

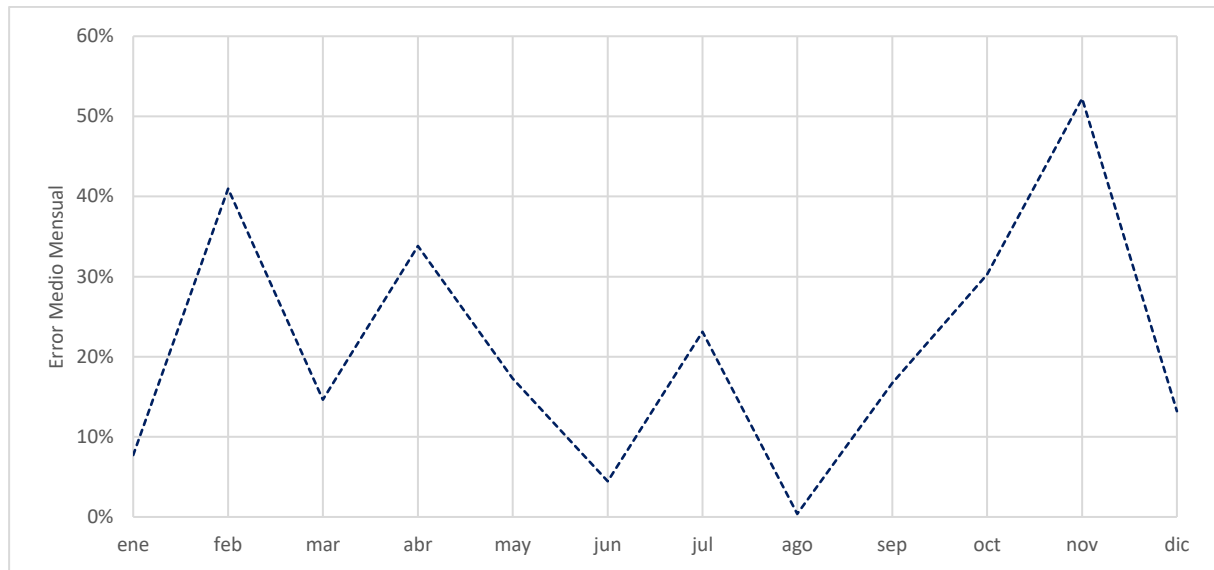


Figura 4.13. Errores medios mensuales porcentuales de la modelación de trasvases al Segura con respecto a los trasvases medidos.

Porcentualmente, los errores pueden llegar a ser bastante altos; sin embargo, los mayores errores porcentuales se obtienen durante meses en los que no se registran trasvases demasiado cuantiosos, por lo que no se espera que sus valores absolutos sean de gran importancia. Por ejemplo, en noviembre se obtienen los peores errores medios porcentuales, que alcanzan un 52%, pero, ya que en ese mes solo se trasvasan, en promedio, 10 [hm³], el valor absoluto de este error corresponde a, únicamente, 5 [hm³].

C) Análisis de sensibilidad

El presente análisis tiene como objetivo identificar cuáles son las variables de entrada más relevantes para la ejecución del modelo y en qué medida su correcta estimación influye en la calidad de los resultados. La sensibilidad del modelo con respecto a cada variable se estima modificando, de manera independiente, cada una de las series de datos asociadas a las variables de entrada y analizando, posteriormente, los cambios que estas variaciones generan en los volúmenes calculados.

A continuación, en las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16, se presentan los resultados del modelo luego de modificar, en los porcentajes indicados en cada gráfico, las series de Volúmenes

Embalsados en Entrepeñas y Buendía, de Aportaciones Acumuladas en la cabecera del Tajo durante los últimos 12 meses y de Volúmenes Embalsados en los principales embalses de la cuenca del Segura, respectivamente.

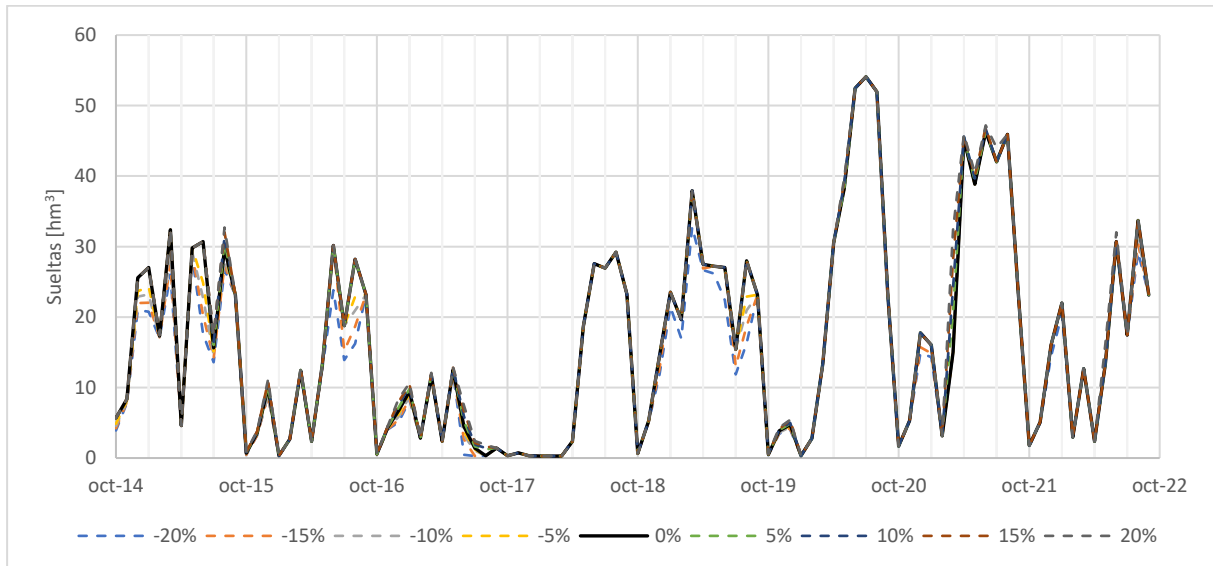


Figura 4.14. Cambios en los resultados de la modelación de trasvases al Segura, debidos a modificaciones porcentuales en la serie de Volúmenes Embalsados en E+B.

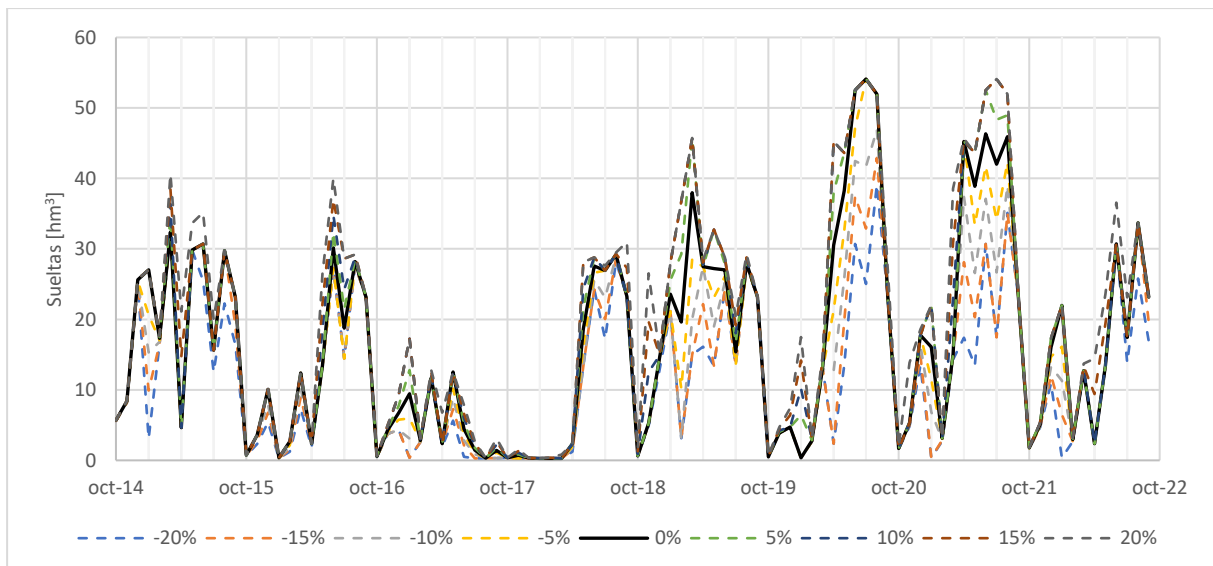


Figura 4.15. Cambios en los resultados de la modelación de trasvases al Segura, debidos a modificaciones porcentuales en la serie de Aportaciones Acumuladas en la cabecera del Tajo durante los últimos 12 meses.

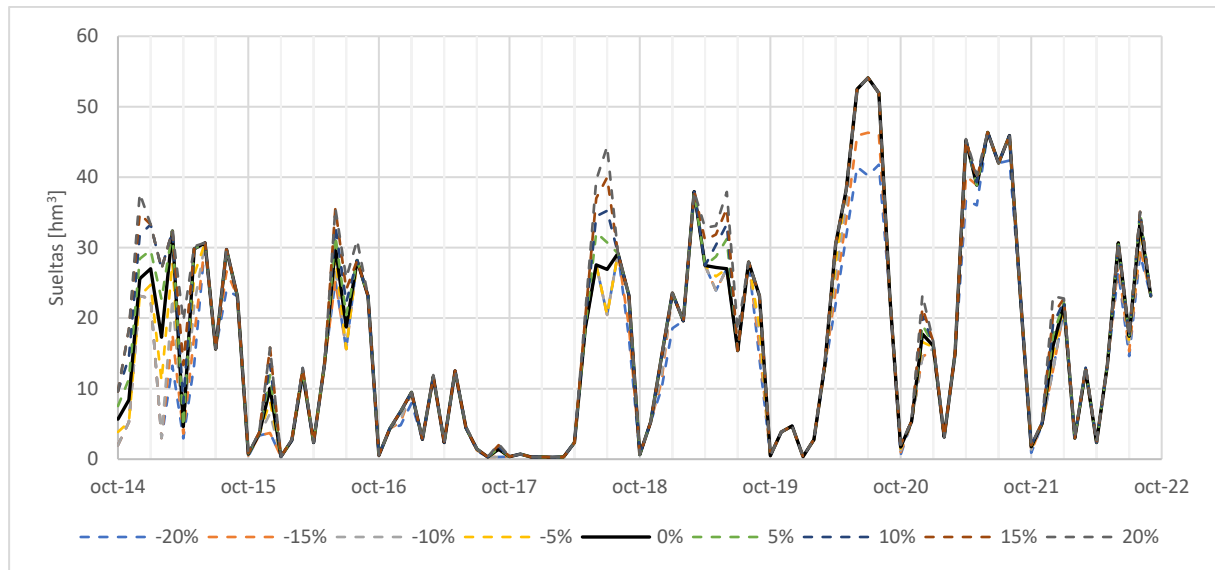


Figura 4.16. Cambios en los resultados de la modelación de trasvases al Segura, debidos a modificaciones porcentuales en la serie de Volúmenes Embalsados en los principales embalses de la cuenca del Segura.

En los gráficos se observa claramente una mayor sensibilidad del modelo a las aportaciones acumuladas en la cabecera del Tajo, ya que sus resultados varían ampliamente al modificar dicha variable.

Al promediar la variación que, en cada caso, sufren los resultados generados por el modelo, se obtienen las sensibilidades medias presentadas en la Figura 4.17.

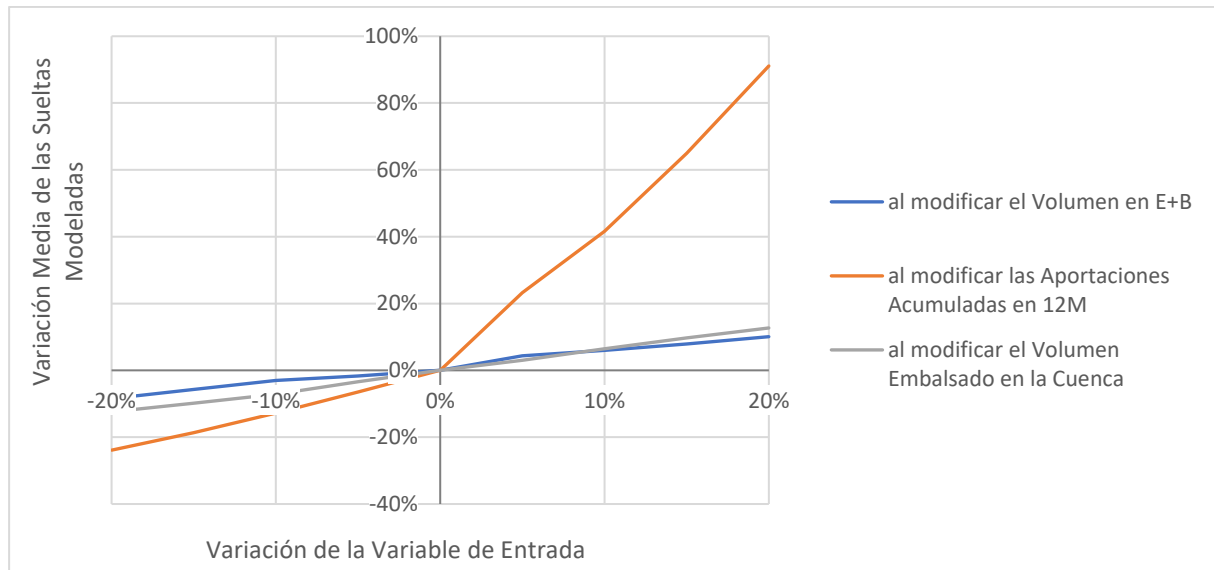


Figura 4.17. Sensibilidad media del modelo de trasvases al Segura en relación con las distintas variables de entrada.

Los resultados corroboran que el modelo para la obtención de volúmenes trasvasados a la cuenca del Segura es tremendamente sensible a las aportaciones acumuladas en la cabecera del Tajo. Esto ocurre sobre todo al sobreestimar esta variable, dado el cambio de pendiente observado en el gráfico. Un aumento del 10% en las aportaciones del último año hace que el modelo genere salidas un 42% mayores, mientras que una disminución de estas, en el mismo porcentaje, genera salidas un 13% menores. Por el contrario, la sensibilidad del modelo con respecto a las otras variables de entrada es mucho menor, aunque sigue siendo considerable. Un aumento del 10% en los volúmenes embalsados en los principales embalses de la cuenca del Segura o en los volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía, implica resultados un 6% mayores, mientras que una disminución de los mismos, en igual porcentaje, genera salidas un 7% o un 3% menores, respectivamente.

Dados los resultados obtenidos, se infiere que todas las variables resultan relevantes para la obtención de volúmenes certeros, no obstante, la correcta estimación de las aportaciones acumuladas en la cabecera del Tajo resulta ser el factor preponderante para una modelación exitosa.

4.1.2. *Modelación de volúmenes desembalsados al Tajo*

A) *Proceso y rendimiento de la calibración*

El modelo para la obtención de volúmenes desembalsados al Tajo, al igual que el modelo para la obtención de volúmenes trasvasados al Segura, es calibrado por medio de un proceso de calibración-validación cruzada. El período que constituye la serie histórica es el mismo que el considerado para la calibración del modelo anterior, es decir, 8 años de datos, desde el año hidrológico 2014/15 hasta el año hidrológico 2021/22. De este modo, se realizan 8 calibraciones preliminares, apartando, para cada una de ellas, los datos de un año diferente. Las salidas agrupadas resultantes para cada una de las calibraciones preliminares se encuentran detalladas en la Tabla A.3 del Anexo A. Por otra parte, los desembalses modelados considerando cada una de estas calibraciones son presentados, respectivamente, en las Figuras 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 y 4.25, mientras que sus desempeños son expuestos en la Tabla 4.3.

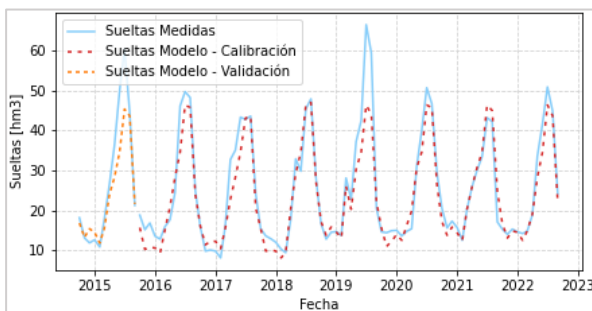


Figura 4.18. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°1 (apartando el año 2014/15).

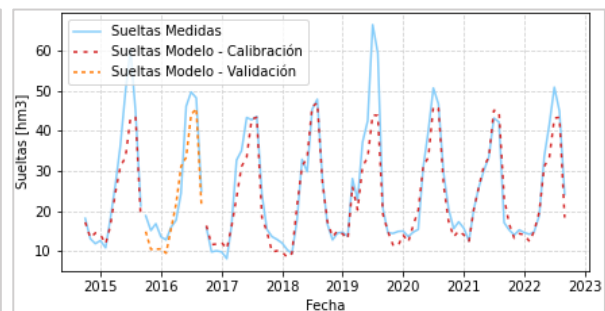


Figura 4.19. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°2 (apartando el año 2015/16).

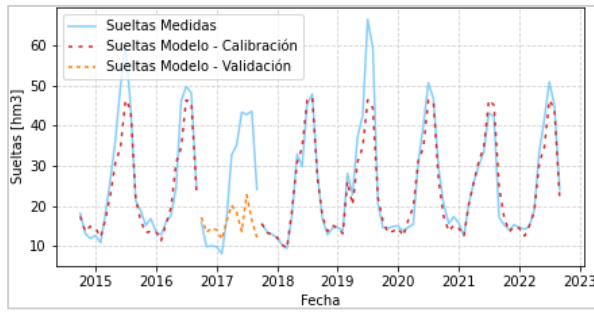


Figura 4.20. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°3 (apartando el año 2016/17).

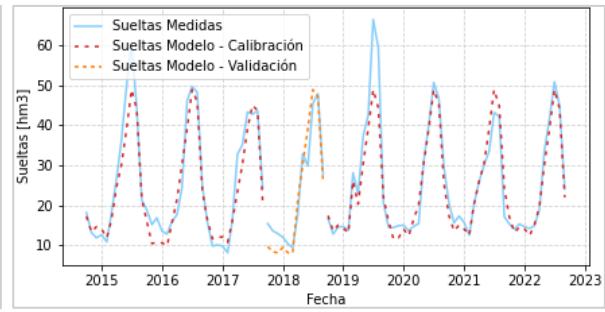


Figura 4.21. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°4 (apartando el año 2017/18).

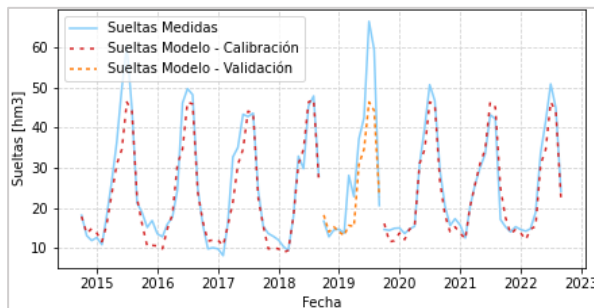


Figura 4.22. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°5 (apartando el año 2018/19).

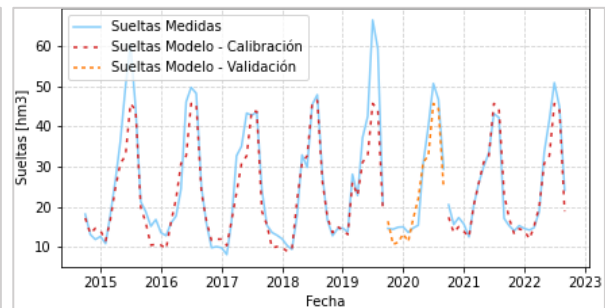


Figura 4.23. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°6 (apartando el año 2019/20).

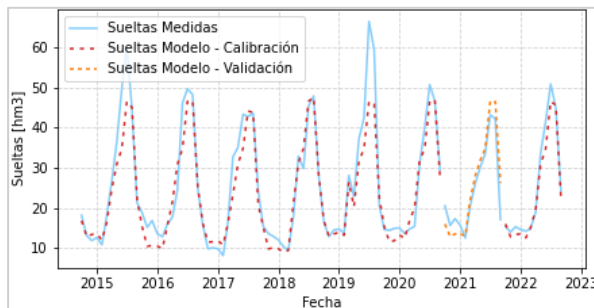


Figura 4.24. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°7 (apartando el año 2020/21).

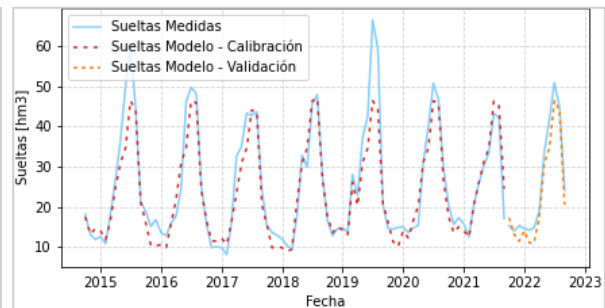


Figura 4.25. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Preliminar N°8 (apartando el año 2021/22).

Tabla 4.3. Desempeño de Calibraciones Preliminares en Modelo de Desembalses al Tajo.

Calibración	Año Apartado (Año de Validación)	Índice de Nash Calibración	Índice de Nash Validación
1	2014/15	0.896	0.822
2	2015/16	0.871	0.832
3	2016/17	0.896	-0.163
4	2017/18	0.911	0.891
5	2018/19	0.911	0.745
6	2019/20	0.866	0.910
7	2020/21	0.894	0.860
8	2021/22	0.881	0.934

En todos los casos, los desempeños de calibración resultan más que satisfactorios. Los índices de Nash-Sutcliffe fluctúan entre 0.866 y 0.911, evidenciándose un excelente ajuste del modelo en relación con los registros históricos considerados en el proceso.

Las validaciones preliminares, por su parte, se realizan tomando como referencia los años hidrológicos que no se utilizaron en la calibración. Debido a que las modificaciones realizadas a las reglas de explotación del trasvase durante el período analizado no incluyen cambios sobre la operación de los desembalses al Tajo, además de presentar estas sueltas un comportamiento anual sumamente estable, los desempeños de validación obtenidos son excelentes. La gran mayoría de las validaciones preliminares presentan índices de Nash-Sutcliffe que fluctúan entre 0.745 y 0.934, y sólo el año hidrológico 2016-2017 no pudo ser reproducido de manera satisfactoria.

Finalmente, la calibración definitiva del modelo se obtiene luego de promediar las salidas agrupadas resultantes en cada una de las calibraciones preliminares. Estos resultados se encuentran detallados en la Tabla A.3 del Anexo A, mientras que los desembalses modelados considerando estos parámetros definitivos son los presentados en la Figura 4.26.

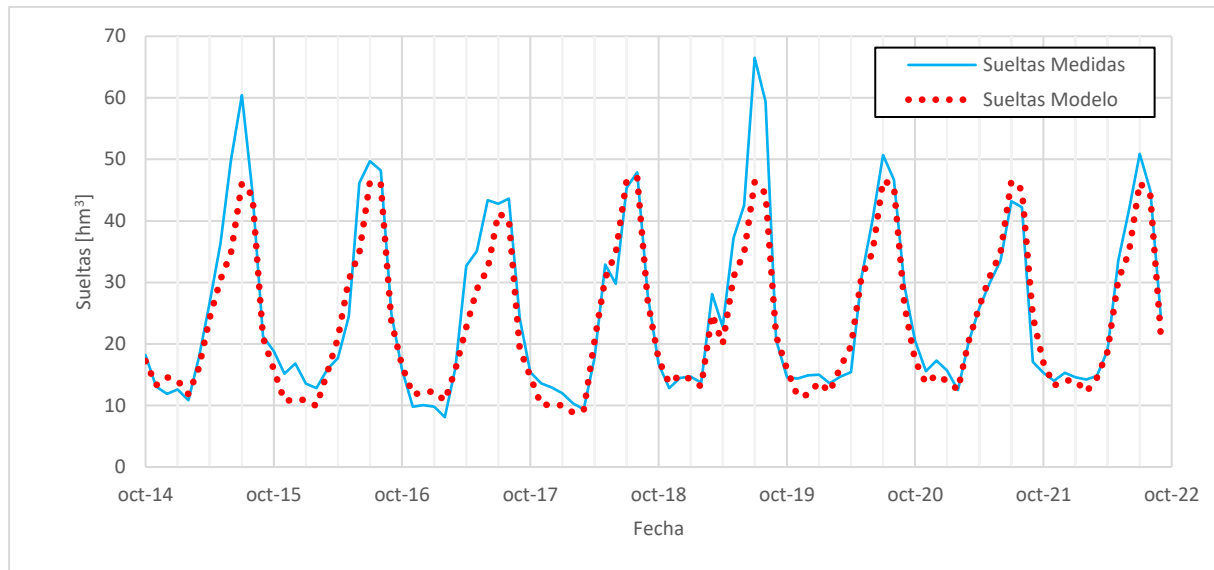


Figura 4.26. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Definitiva.

Comparando, a grandes rasgos, los resultados obtenidos con los registros de la serie histórica completa, se puede observar que el modelo emula de forma excelente los datos medidos, aunque no logra reproducir los picos que escapan de la media.

El desempeño general del modelo queda representado por un índice de Nash-Sutcliffe altísimo, igual a 0.886, por lo que se considera que el modelo se ajusta sumamente bien a los registros históricos. Por otra parte, uno de los objetivos del modelo generado es facilitar la gestión en tiempo real y la planificación en el uso del recurso hídrico, por lo que resulta útil verificar su rendimiento en relación con los desembalses realizados durante el ejercicio de las reglas de explotación actualmente vigentes. A pesar de que durante el período analizado no se han realizado modificaciones referentes a los volúmenes desembalsables hacia el Tajo, se opta por ejecutar un análisis equivalente al desarrollado para el modelo de volúmenes trasvasados al Segura, es decir, se analiza el desempeño del modelo considerando únicamente los desembalses registrados a lo largo del último año hidrológico de la serie. En este caso, el modelo se valida con un índice de Nash-Sutcliffe igual a 0.953, un valor sumamente alto, por lo que se verifica la capacidad del modelo para reproducir los volúmenes que han sido desembalsados durante el último tiempo. A continuación, en la Figura 4.27, se presenta en

detalle el ajuste del último año y luego, en la Tabla 4.4, se resumen los indicadores de desempeño mencionados.

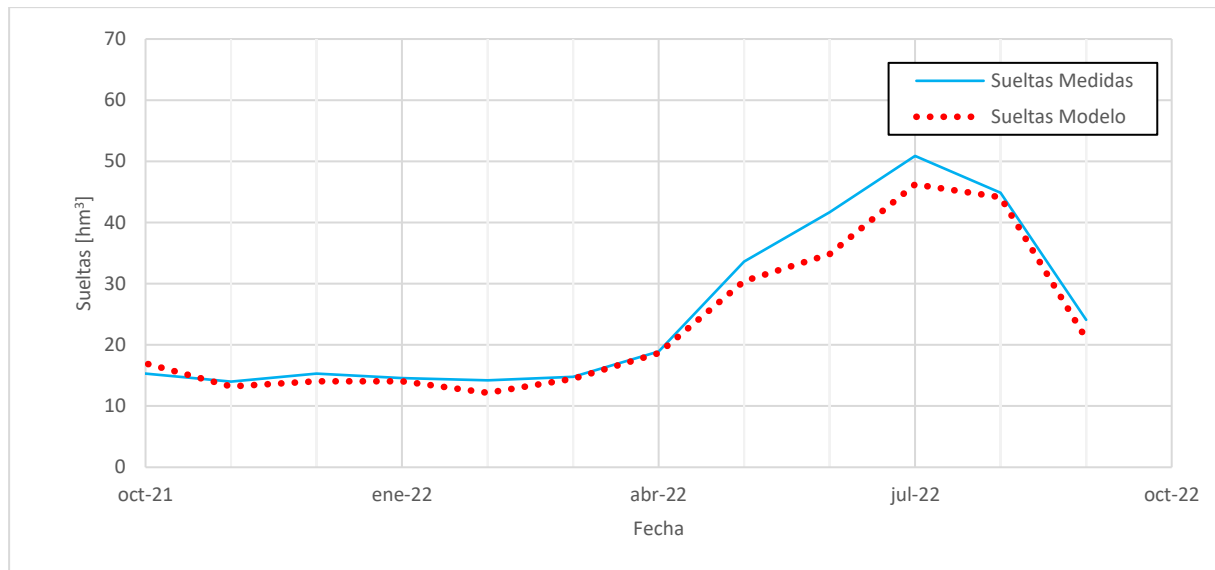


Figura 4.27. Desembalses al Tajo modelados según Calibración Definitiva. Detalle del último año hidrológico.

Tabla 4.4. Desempeño del Modelo de Desembalses al Tajo para distintos períodos de relevancia.

Período	Índice de Nash
Serie completa (2014/15 – 2021/22)	0.886
Último año hidrológico (2021/22)	0.953

B) Valores medios mensuales

Con objeto de realizar un análisis más acabado de la calidad de los resultados, se revisan las diferencias existentes entre los datos medios históricos y los volúmenes medios modelados. De esta manera, en la Figura 4.28 se presentan los trasvases medios mensuales registrados y los trasvases medios mensuales modelados.

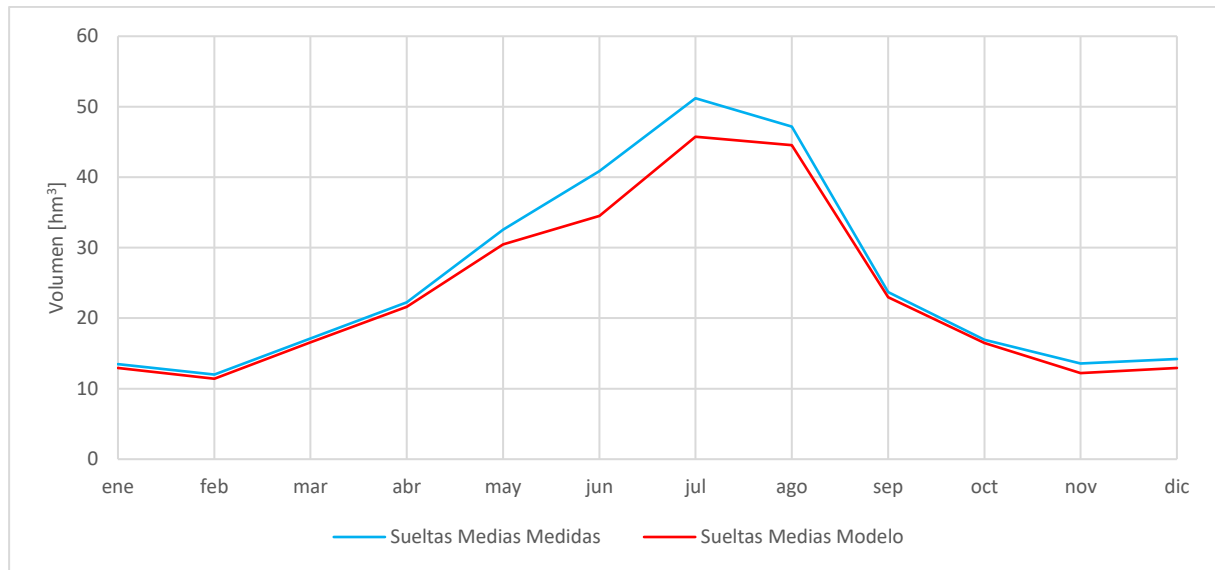


Figura 4.28. Desembalses medios mensuales.

Se observa una clara similitud en el comportamiento medio de ambas curvas, sin embargo, similar a lo que ocurre con el modelo de trasvases al Segura, aunque en menor proporción, se evidencia una leve tendencia a la subestimación de los volúmenes desembalsados, ya que, como se comentó con anterioridad, el modelo presenta dificultades para reproducir los valores pico que se escapan del comportamiento medio.

Los errores medios mensuales de los valores modelados con respecto a los valores medidos quedan representados, en la Figura 4.29, por la diferencia entre los datos históricos y los volúmenes modelados.

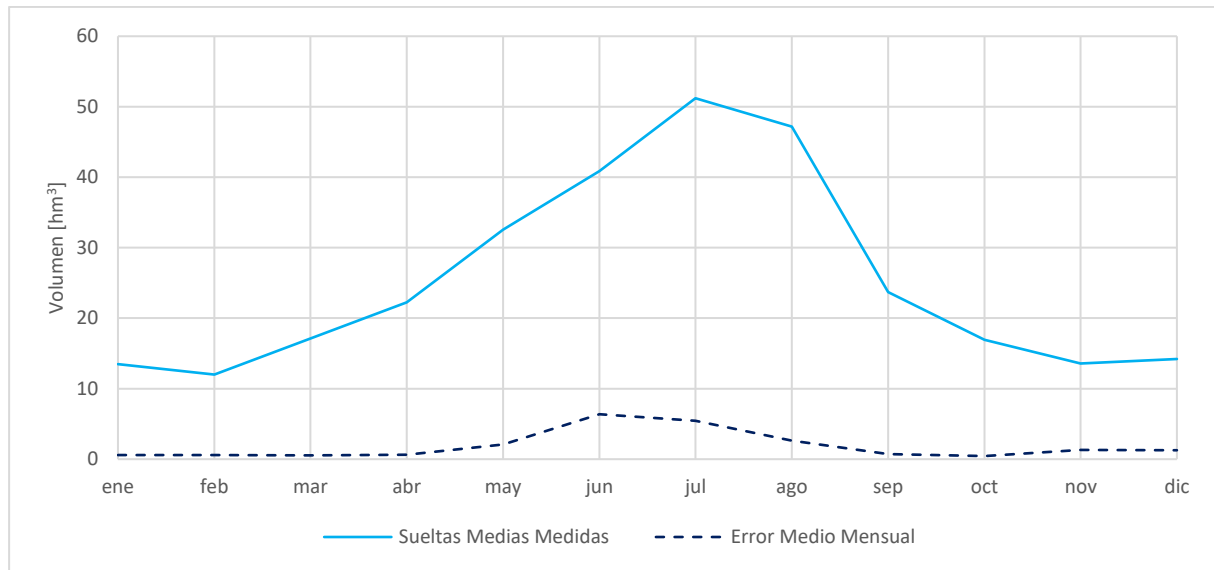


Figura 4.29. Errores medios mensuales de la modelación de desembalses al Tajo con respecto a los trasvases medidos.

En promedio, los errores rondan los 2 [hm³], dependiendo del mes modelado, y, como media mensual, no superan los 7 [hm³]. Estos resultados son sumamente buenos considerando que los desembalses medidos promedian 25 [hm³] y, como media mensual, pueden superar los 51 [hm³].

Para una última revisión, en la Figura 4.30, se presentan los mismos errores medios mensuales, pero normalizados con respecto al valor medio mensual medido.

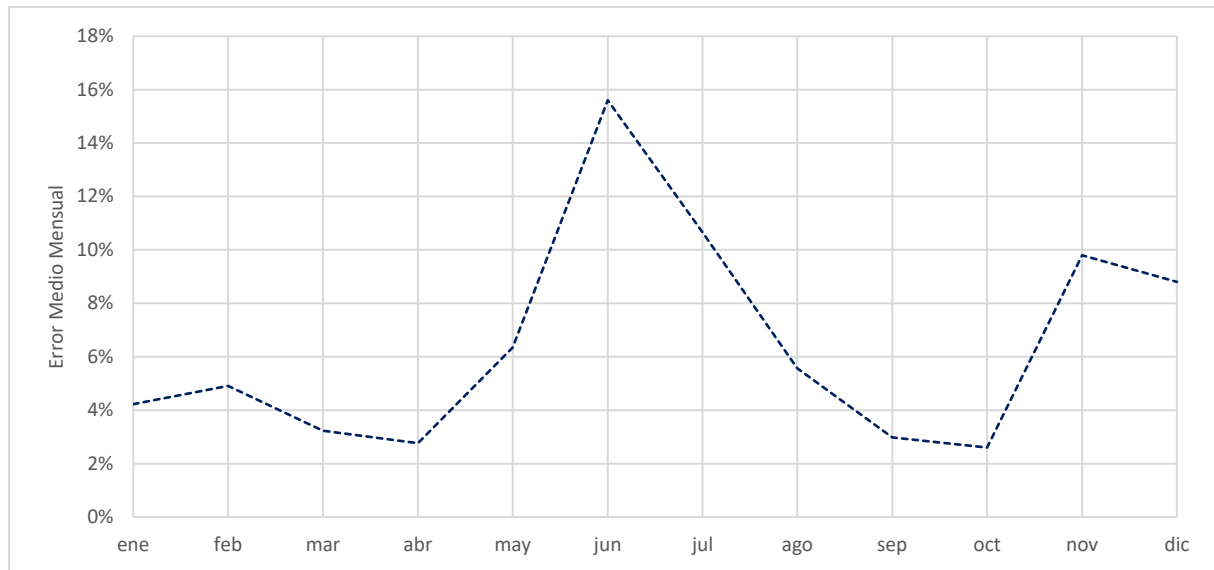


Figura 4.30. Errores medios mensuales porcentuales de la modelación de desembalses al Tajo con respecto a los trasvases medidos.

En este caso, los errores porcentuales suelen ser bastante bajos, con excepción de los meses en los que se registran los picos de desembalse que el modelo no logra reproducir. Aún así, como se observa en la Figura 4.29, los valores absolutos de estos errores no representan un gran problema.

C) Análisis de sensibilidad

Por medio del presente análisis se hace posible la identificación de las variables de entrada más relevantes para la ejecución del modelo y en qué medida su correcta estimación influye en la calidad de los resultados.

A continuación, en las Figuras 4.31, 4.32 y 4.33, se presentan los resultados del modelo luego de modificar, en los porcentajes indicados en cada gráfico, las series de Volúmenes Embalsados en Entrepeñas y Buendía, de Aportaciones Acumuladas en la cabecera del Tajo durante los últimos 12 meses y de Volúmenes Embalsados en los principales embalses de la cuenca del Tajo, respectivamente.

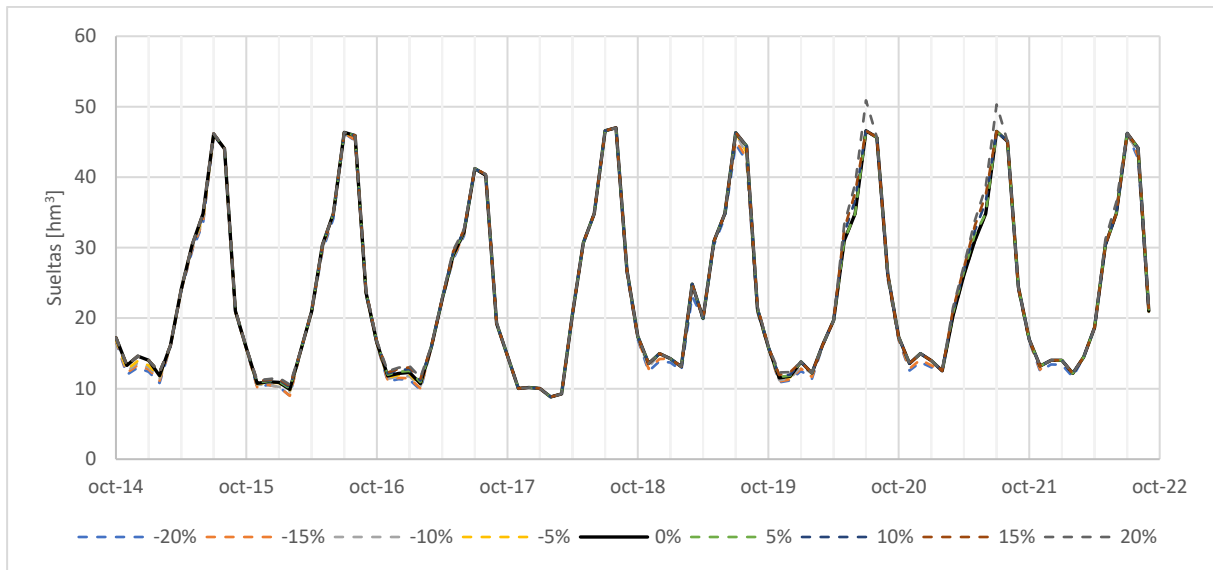


Figura 4.31. Cambios en los resultados de la modelación de desembalses al Tajo, debidos a modificaciones porcentuales en la serie de Volúmenes Embalsados en E+B.

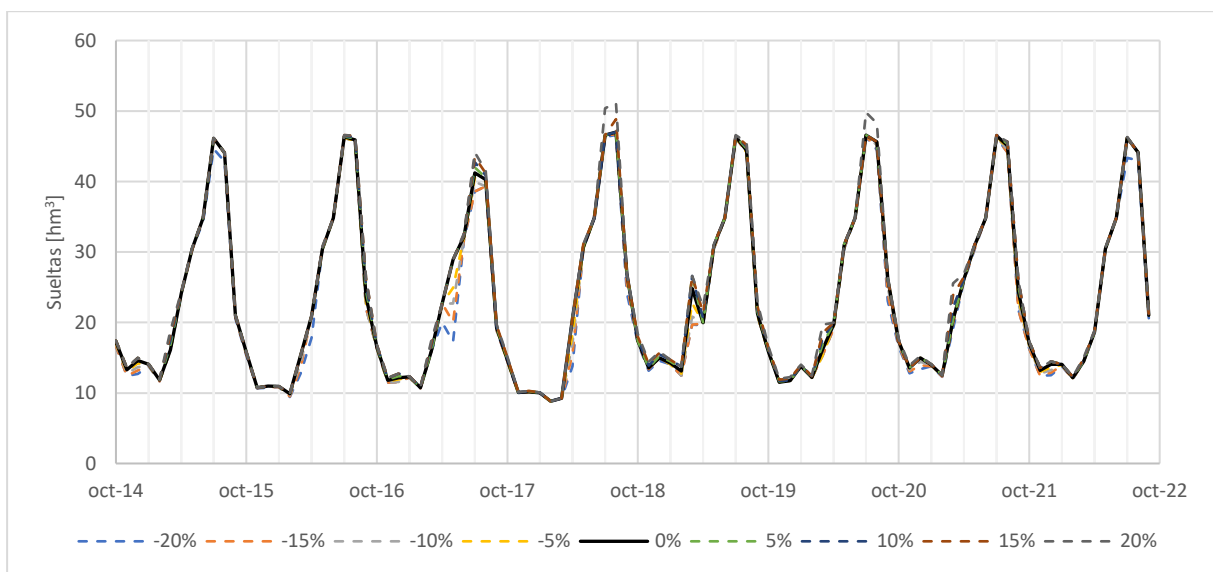


Figura 4.32. Cambios en los resultados de la modelación de desembalses al Tajo, debidos a modificaciones porcentuales en la serie de Aportaciones Acumuladas en la cabecera del Tajo durante los últimos 12 meses.

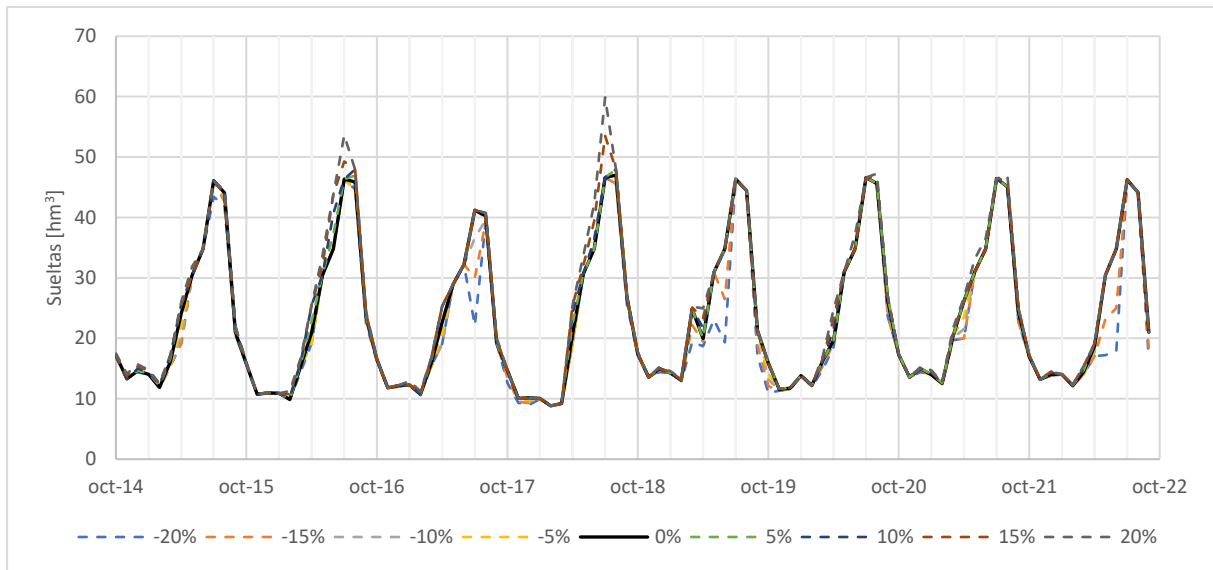


Figura 4.33. Cambios en los resultados de la modelación de desembalses al Tajo, debidos a modificaciones porcentuales en la serie de Volúmenes Embalsados en los principales embalses de la cuenca del Tajo.

Si bien la variabilidad es mínima, en los gráficos se observa claramente una mayor sensibilidad del modelo a los volúmenes embalsados en los principales embalses de la cuenca del Tajo.

Al promediar la variación que, en cada caso, sufren los resultados generados por el modelo, se obtienen las sensibilidades medias presentadas en la Figura 4.34.

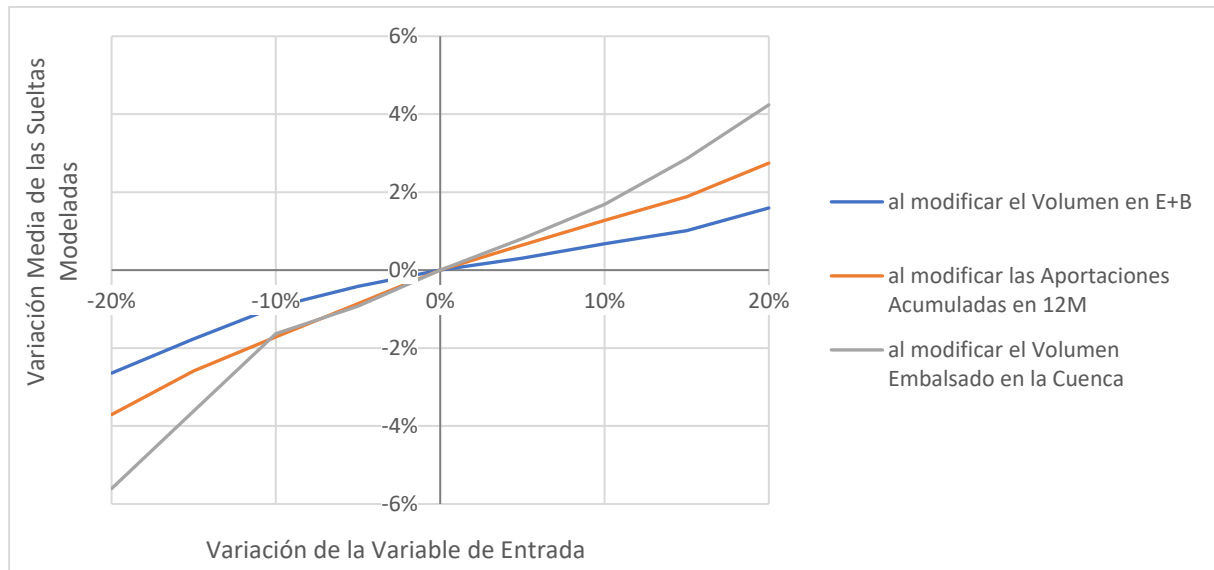


Figura 4.34. Sensibilidad media del modelo de desembalses al Tajo en relación con las distintas variables de entrada.

Los resultados verifican que el modelo para la obtención de volúmenes desembalsados a la cuenca del Tajo es prácticamente insensible a las modificaciones realizadas sobre las variables de entrada. Esto se explica por la marcada estacionalidad con la que se realizan los desembalses, los cuales siguen, casi sin variaciones, el patrón mensual de referencia propuesto en las reglas de explotación del trasvase. Sin perjuicio de lo anterior, la variable cuya modificación provoca los mayores cambios en los resultados corresponde al volumen embalsado en los principales embalses de la cuenca del Tajo. Un aumento del 10% en aquel volumen causa que el modelo genere salidas un 2% mayores, mientras que una disminución de esta variable, en la misma cantidad, provoca una disminución de un 2% en las salidas. Menos relevantes aún son los cambios inducidos en los resultados producto de las variaciones de las aportaciones acumuladas en la cabecera del Tajo y de los volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía. Una modificación del 10% en aquellas variables cambia los resultados del modelo en, apenas, un 1%.

Dados los resultados obtenidos, se infiere que, si bien las variables de entrada tienen cierto grado de incidencia en los resultados generados por el modelo, los desembalses hacia la cuenca del Tajo se rigen principalmente por el patrón mensual de referencia establecido en las reglas de explotación del trasvase. Debido a esto, la presencia de errores o estimaciones

deficientes de los datos de entrada no debiesen perjudicar demasiado la obtención de resultados certeros.

4.2. Predicción de variables relacionadas con el Trasvase Tajo-Segura

Utilizando como base los modelos de simulación elaborados, cuyos resultados han sido presentados en el apartado anterior, se desarrolla un modelo predictivo que tiene como objetivo estimar, en una proyección de siete meses y en función de variables previamente conocidas, los volúmenes que serán trasvasados a la cuenca del Segura, los volúmenes que serán desembalsados hacia la cuenca del Tajo y los volúmenes que permanecerán almacenados en los embalses de Entrepeñas y Buendía.

Para la ejecución en conjunto de los modelos de simulación de sueltas (de trasvases al Segura y de desembalses al Tajo) y, por lo tanto, para la ejecución del modelo predictivo, se requiere el conocimiento de cuatro variables de entrada: las aportaciones acumuladas en la cabecera del Tajo durante los últimos 12 meses, el volumen conjunto embalsado en Entrepeñas y Buendía y los volúmenes almacenados en los principales embalses de las cuencas del Segura y del Tajo, todas ellas registradas al término del mes anterior a la simulación. Es por esto que, para el primer mes de predicción de las salidas, las variables de entrada corresponden, en todos los casos, a valores conocidos, debiendo éstas ser proyectadas para el desarrollo de las predicciones desde el segundo mes en adelante. Teniendo esto en cuenta, las aportaciones acumuladas son proyectadas sobre la base de la predicción de las aportaciones mensuales, cuyo valor se estima siguiendo el procedimiento establecido en las reglas de explotación del trasvase (detallado en el capítulo de metodología de este informe). El volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía se calcula por balance hídrico, es decir, la variación del volumen almacenado durante un mes en particular se corresponde con la diferencia entre las entradas y las salidas proyectadas durante ese tiempo, incluyendo también las evaporaciones. Finalmente, a falta de modelos capaces de predecir los volúmenes almacenados en los principales embalses de las cuencas del Segura y del Tajo, en estos casos se han usado directamente los registros históricos correspondientes.

Para valorar la calidad de los resultados predichos y poder evaluar el desempeño del modelo en cuanto a su capacidad predictiva, la proyección de los resultados se realiza a partir de datos históricos conocidos y se extiende durante períodos pasados en los que todas las variables ya han sido medidas y registradas. De esta manera, se hace posible la comparación de dichas predicciones frente a valores reales conocidos o previamente modelados, según sea el caso, lo que permite estimar la calidad del modelo predictivo, asumiendo que ésta se mantendría al hacer uso de los modelos en tiempo real.

Los resultados obtenidos en las distintas etapas del proceso predictivo, junto con sus respectivos análisis, son presentados a continuación.

4.2.1. Predicción de aportaciones mensuales en la cabecera del Tajo

Si bien la aportación mensual en la cabecera del Tajo no es, directamente, una variable de entrada del modelo, su predicción es requerida tanto para el cálculo de las aportaciones acumuladas a doce meses como por su participación en el balance hídrico de los embalses de Entrepeñas y Buendía.

La predicción de esta variable es realizada siguiendo el procedimiento establecido para este fin en las reglas de explotación del trasvase, el cual permite estimar, mediante cálculos sucesivos, las aportaciones esperadas durante el mes siguiente en función de las aportaciones registradas o proyectadas durante el mes inmediatamente anterior. De esta manera, a partir de cada dato de aportación medido, se realizan predicciones de la aportación esperada durante los 6 meses siguientes.

A) Resultados generales

A continuación, en la Figura 4.35, se presenta en color negro la aportación mensual registrada históricamente, mientras que las líneas segmentadas representan los resultados de las predicciones realizadas a partir de cada uno de estos datos.

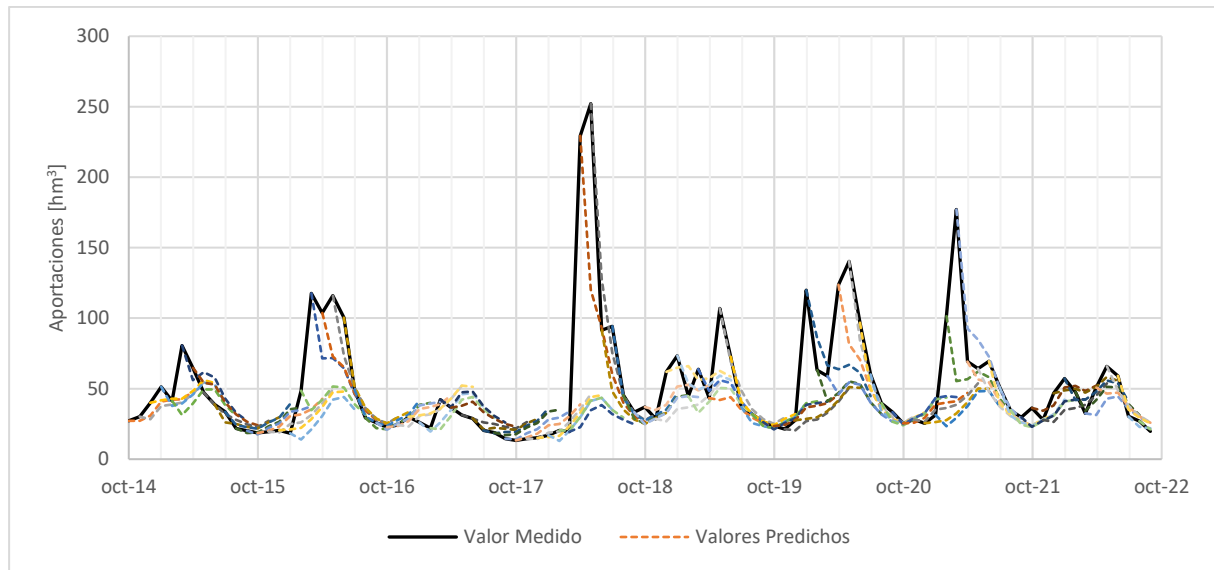


Figura 4.35. Predicciones de Aportaciones Mensuales.

La separación existente entre la curva continua y las segmentadas representa el grado de error asociado a cada predicción, ya que, en un caso ideal, donde las predicciones fuesen totalmente certeras, dichas curvas quedarían superpuestas.

Para observar de mejor manera la tendencia que siguen las predicciones desarrolladas, se procede a reagrupar los resultados en la Figura 4.36. En ésta, cada línea punteada representa el promedio de las aportaciones mensuales predichas al considerar como mes inicial para la proyección los distintos meses del año, es decir, por ejemplo, la línea azul punteada que comienza en enero indica, para ese mes y los 6 siguientes, los promedios mensuales de todas las predicciones que se realizan tomando como mes inicial un mes de enero; la línea naranja punteada que comienza en febrero indica, para ese mes y los 6 siguientes, los promedios mensuales de todas las predicciones que se realizan tomando como mes inicial un mes de febrero; y así, sucesivamente, hasta llegar a la curva que representa las predicciones que se realizan tomando como mes inicial un mes de diciembre. Además, a modo de referencia, se incluye una línea continua que indica la aportación media mensual registrada.

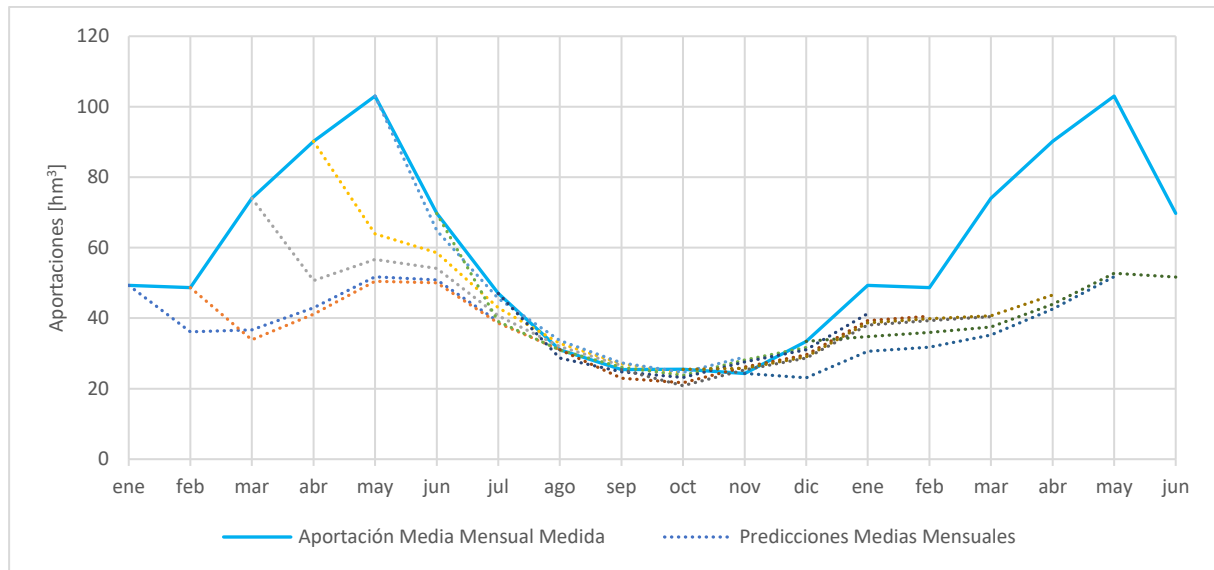


Figura 4.36. Predicciones medias mensuales de Aportaciones Mensuales, según el mes en el que comienza la predicción.

Tanto en la Figura 4.35 como en la Figura 4.36 se observa cómo el modelo de predicción considerado tiende a normalizar las precipitaciones, pronosticando valores relativamente constantes dependiendo de la época del año y, en general, subestimando las crecidas registradas.

Adicionalmente, a modo de síntesis de los resultados, se presenta la Figura 4.37, que expone una representación del valor medio de las predicciones realizadas para cada mes del año, independiente del mes de origen de su predicción, es decir, indica la que sería la aportación media mensual predicha.

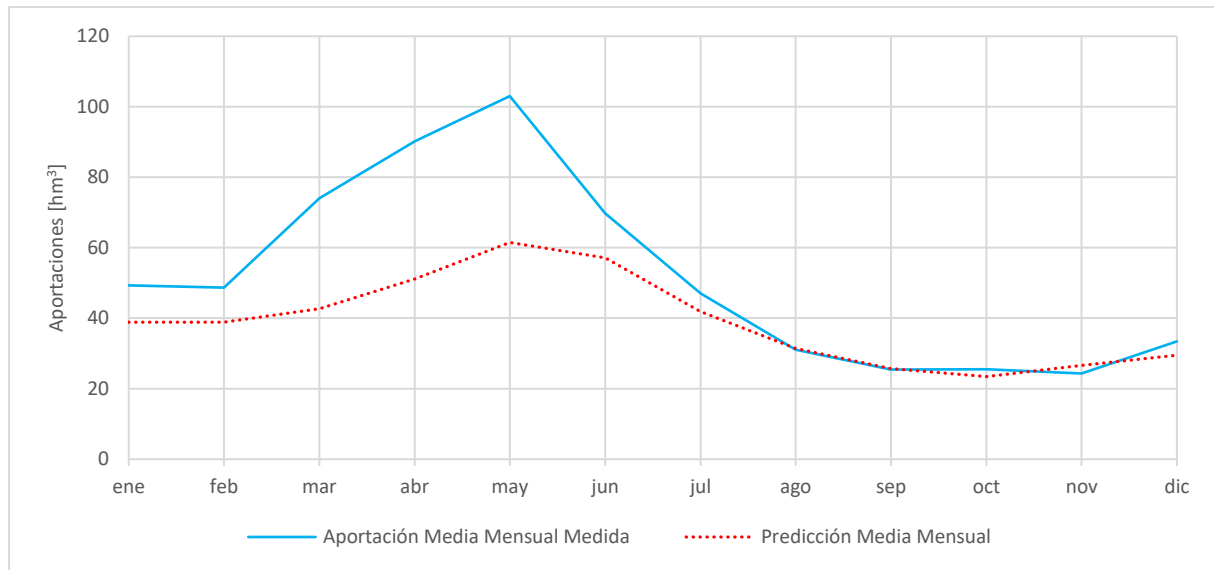


Figura 4.37. Predicción media mensual de Aportaciones Mensuales, según el mes predicho.

Según los resultados promedio de la predicción, entre enero y marzo las aportaciones mensuales rondarían los 40 [hm³], aumentando, luego, hasta un máximo de 61 [hm³] durante mayo, para luego descender hasta un mínimo de 23 [hm³] en octubre.

B) Desempeño según el mes de inicio de la predicción

De forma análoga a la previa exhibición de las predicciones medias según el mes a partir del cual se desarrollan, en las Figuras 4.38 y 4.39 se presentan los promedios mensuales de los errores asociados a estas predicciones. En el primer gráfico se muestran los errores absolutos, con la aportación media mensual registrada como referencia, mientras que, en el segundo, se presentan los valores porcentuales de estos mismos errores, con respecto a los datos históricos.

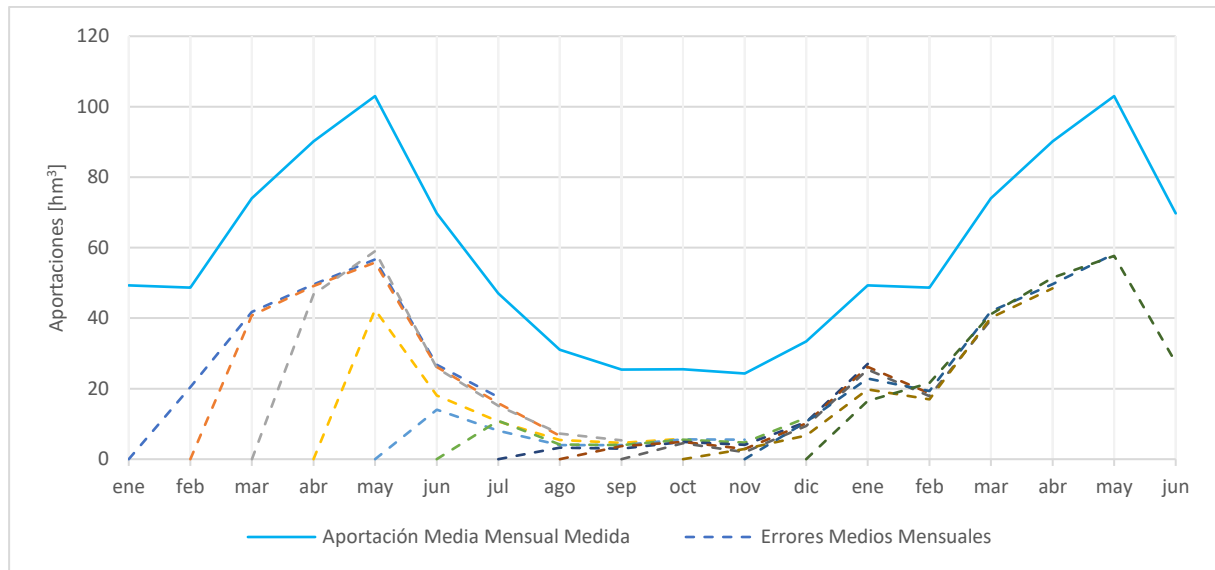


Figura 4.38. Errores medios mensuales de las predicciones de aportaciones con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.

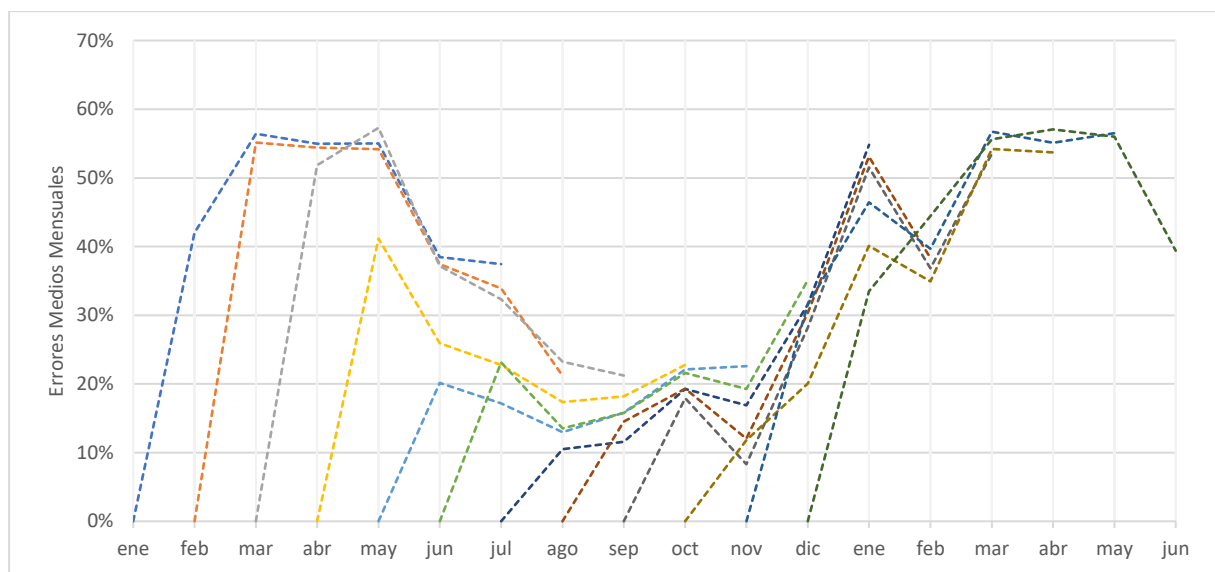


Figura 4.39. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de aportaciones con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.

Según los resultados, las predicciones realizadas a partir de las aportaciones registradas durante el mes de mayo son las que más se asemejan a los valores medidos, obteniendo errores medios del 16%. De igual forma, las predicciones hechas a partir de los meses siguientes, desde junio a septiembre, se ajustan bastante bien a los valores esperados durante

la temporada de estiaje. Por el contrario, las predicciones generadas sobre la base de las mediciones de noviembre corresponden a las menos acertadas, con un 41% de error medio.

C) Desempeño según el mes predicho

Promediando los errores asociados a las predicciones generadas para cada mes del año, se generan las curvas presentadas en las Figuras 4.40 y 4.41 que dan una idea de la calidad de la predicción de las aportaciones, dependiendo del mes para el cual se están desarrollando.

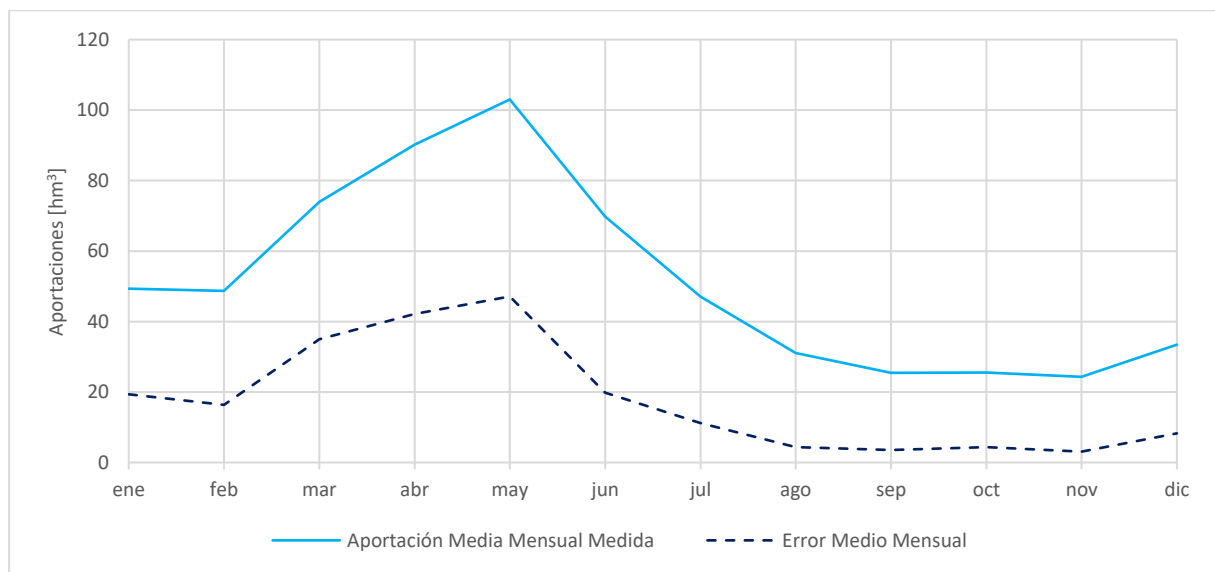


Figura 4.40. Error medio mensual de las predicciones de aportaciones con respecto a los datos medidos, según el mes predicho.

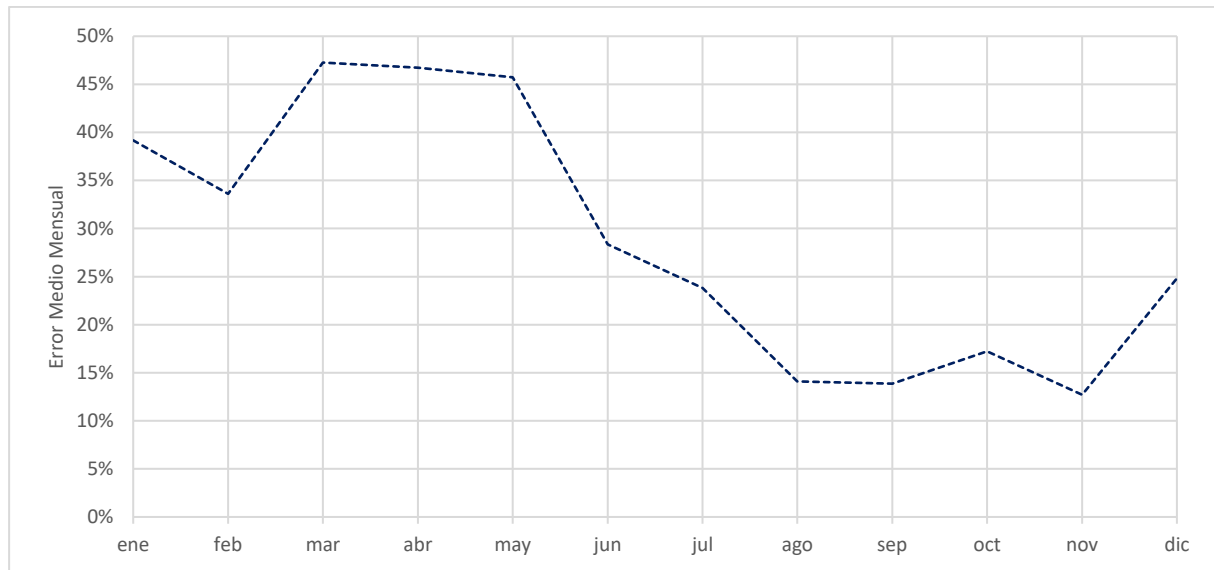


Figura 4.41. Error medio mensual porcentual de las predicciones de aportaciones con respecto a los datos medidos, según el mes predicho.

Los mínimos errores se presentan al predecir los meses más secos, entre agosto y noviembre, obteniéndose errores medios del orden del 15%, pero que implican diferencias de solo 4 [hm³]. Esto ocurre porque, durante esa época, la componente aleatoria de la variable (precipitación) es menor que la determinista (descarga hidrológica superficial y subterránea), la cual resulta más sencilla de predecir. Totalmente distinto es lo que ocurre entre marzo y mayo, el período más húmedo, ya que los errores alcanzan valores de casi el 50%, equivalentes a 47 [hm³].

D) Desempeño según la antelación con la que se realiza la predicción

Ya que no es lo mismo predecir lo que ocurrirá durante el mes siguiente, que lo que ocurrirá en 6 meses más, se analiza, finalmente, la calidad de las predicciones en función de la antelación con la que éstas se desarrollan, es decir, qué tan certeros son los resultados luego de aumentar el horizonte de predicción.

A continuación, luego de promediar los errores obtenidos para las predicciones desarrolladas a distintos plazos de tiempo, se generan las curvas presentadas en las Figuras 4.42 y 4.43, que representan los errores medios absolutos y porcentuales, respectivamente.

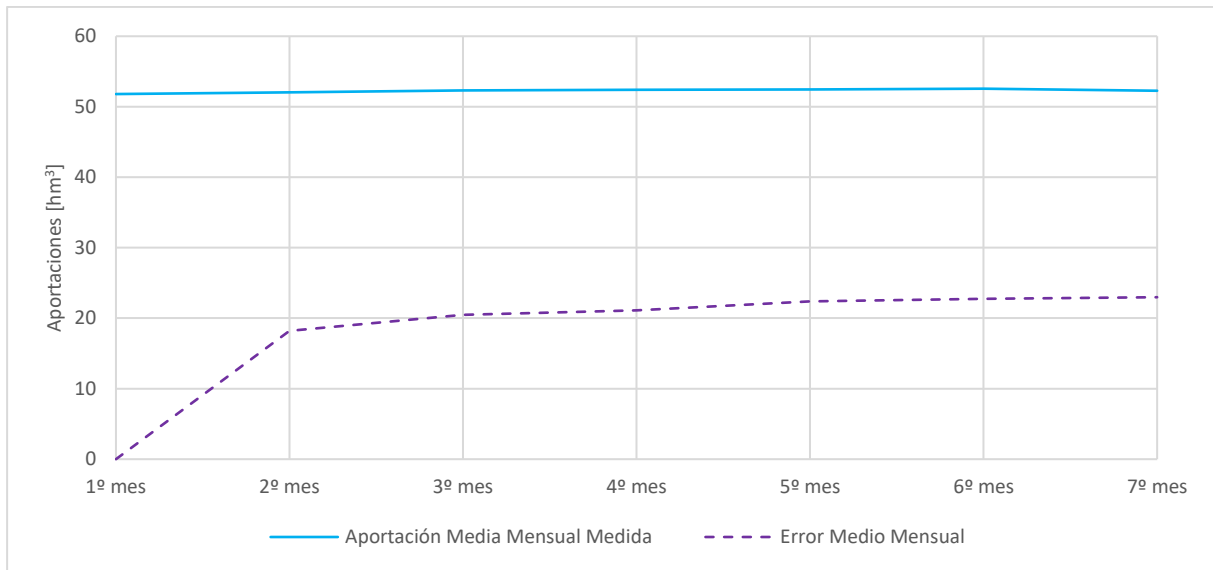


Figura 4.42. Error medio mensual de las predicciones de aportaciones con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

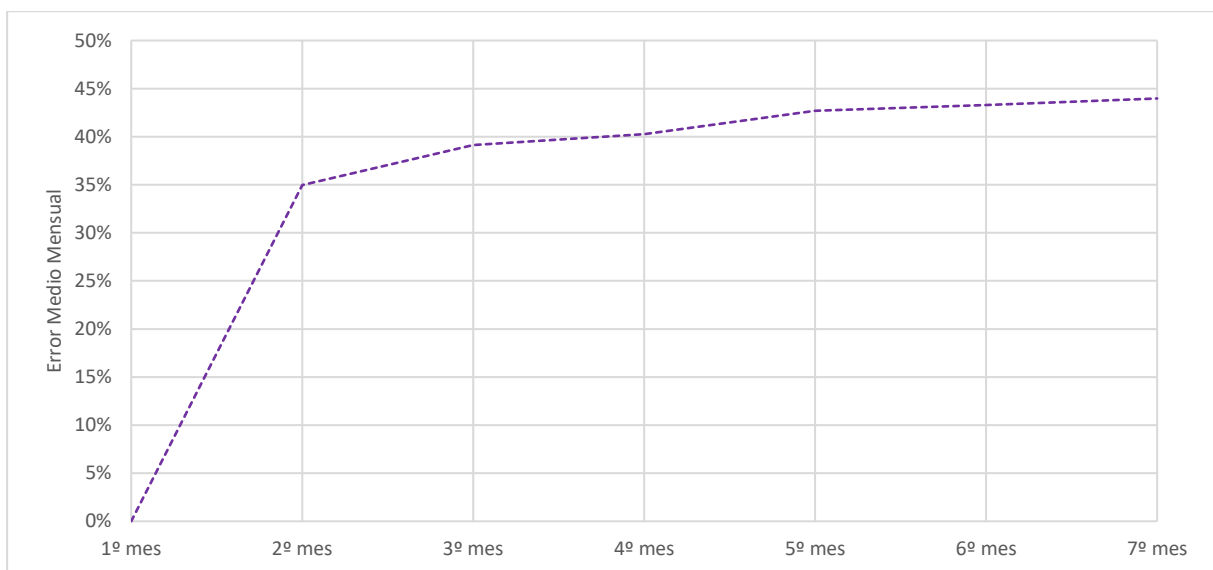


Figura 4.43. Error medio mensual porcentual de las predicciones de aportaciones con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

El error asociado a la predicción de las aportaciones del primer mes es nulo debido a que, como se ha mencionado con anterioridad, los modelos de sueltas desarrollados en este estudio simulan los trasvases y desembalses a partir de variables de entrada correspondientes al mes anterior a la simulación, por lo que, para realizar la predicción del primer mes de

sueltas, las aportaciones a considerar son las referentes al mes recién concluido y, por lo tanto, son conocidas. Para las predicciones desarrolladas hacia más largo plazo, como cabe esperar, los errores van aumentando conforme crece el horizonte de predicción, aunque, en general, se mantienen entre un 35% y un 45% de las aportaciones medias.

4.2.2. Predicción de aportaciones acumuladas en la cabecera del Tajo

La variable de aportaciones acumuladas corresponde a la suma de las aportaciones mensuales registradas en la cabecera del Tajo durante los últimos 12 meses, por lo que su predicción se basa completamente en la proyección de las aportaciones mensuales. Sin embargo, la calidad de su predicción no se puede inferir directamente de las calculadas anteriormente para las predicciones mensuales, debiendo de analizar de nuevo la misma. A este respecto, el hecho de que la predicción acumulada a 12 meses implica, para periodos de antelación cortos, el uso de datos pasados, hace pensar, a priori, que su capacidad de predicción es superior a las previamente estimadas.

Para el primer mes de predicción de las sueltas, igual como ocurre con las aportaciones mensuales, las aportaciones acumuladas durante los 12 meses previos son conocidas. Sin embargo, para el segundo mes de predicción, de las 12 aportaciones previas a la simulación solo se conocen 11, debiendo incluirse, por lo tanto, las aportaciones proyectadas del último mes. Para la proyección del mes siguiente, el tercero, la suma incluye 10 meses de aportaciones conocidas y 2 meses de aportaciones proyectadas. Así ocurre, sucesivamente, mientras se aumenta el horizonte de proyección, hasta que, finalmente, para el último mes de predicción, las aportaciones acumuladas incluyen 6 meses de aportaciones conocidas y 6 meses de aportaciones proyectadas, por lo que, esta variable posee, siempre, una componente conocida.

A) Resultados generales

A continuación, en la Figura 4.44, se presenta en color negro la acumulación, en 12 meses, de las aportaciones registradas históricamente, mientras que las líneas segmentadas representan

los resultados de las predicciones de esta variable, que incluyen la respectiva acumulación de las aportaciones mensuales proyectadas en el apartado anterior.

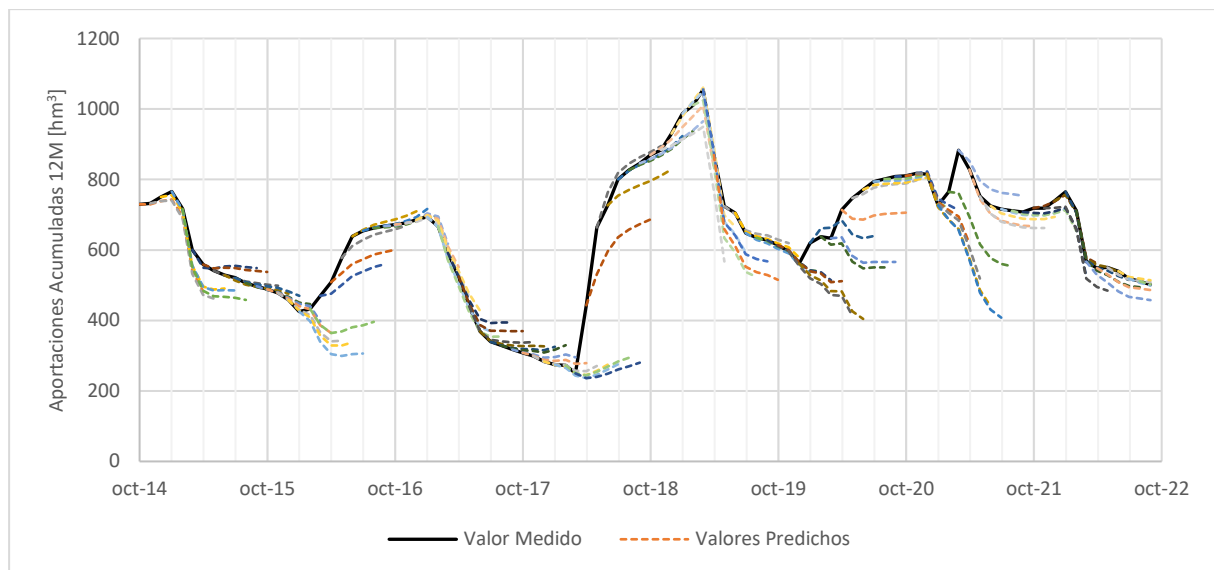


Figura 4.44. Predicción de Aportaciones Acumuladas en los últimos 12 meses.

La diferencia observada entre las líneas segmentadas y la curva continua representa el grado de error asociado a cada predicción, ya que, en un caso ideal, donde las predicciones fuesen totalmente certeras, dichas curvas quedarían superpuestas.

Para observar de mejor manera la tendencia que siguen las predicciones desarrolladas, se procede a reagrupar los resultados en la Figura 4.45, siguiendo el mismo procedimiento descrito para el análisis de la predicción de las aportaciones mensuales. En ésta, cada línea punteada representa el promedio de las aportaciones acumuladas predichas al considerar como mes inicial para la proyección los distintos meses del año. Además, a modo de referencia, se incluye una línea continua que indica la aportación acumulada media mensual registrada.

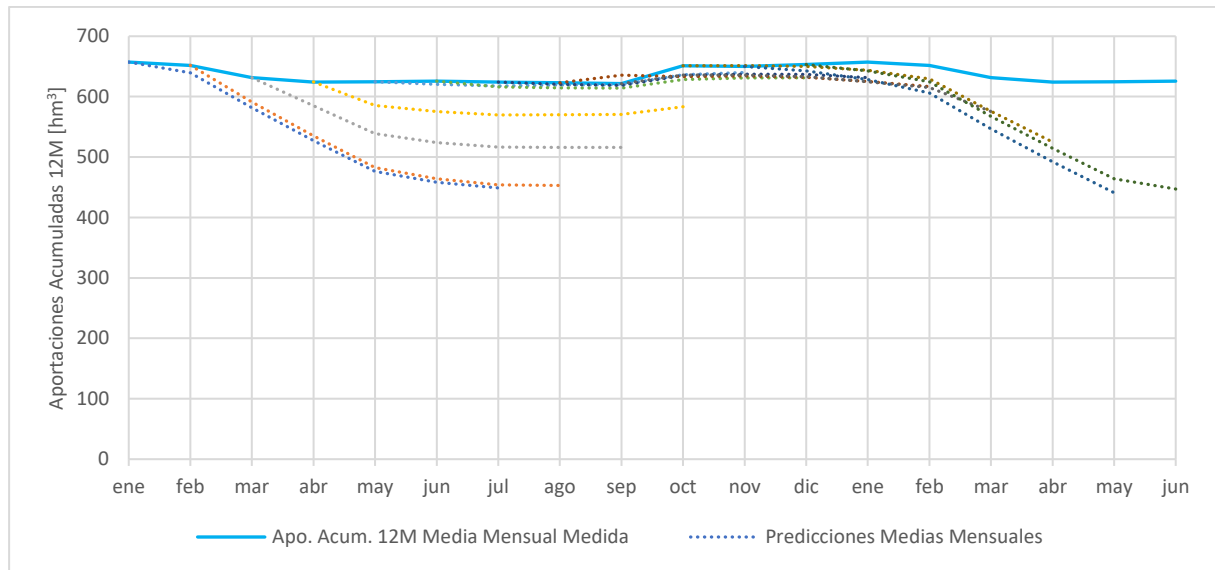


Figura 4.45. Predicciones medias mensuales de Aportaciones Acumuladas en los últimos 12 meses, según el mes en el que comienza la predicción.

De los dos gráficos anteriores se desprende, claramente, que el método de predicción considerado tiende a subestimar las precipitaciones acumuladas, especialmente luego de evidenciarse aumentos bruscos en la variable. Esto se condice con los resultados del modelo de predicción de aportaciones mensuales, que, en general, subestima las crecidas registradas.

Adicionalmente, a modo de síntesis de los resultados, se presenta la Figura 4.46, que expone una representación del valor medio de las predicciones realizadas para cada mes del año, independiente del mes de origen de su predicción, es decir, indica la que sería la aportación acumulada media mensual predicha.

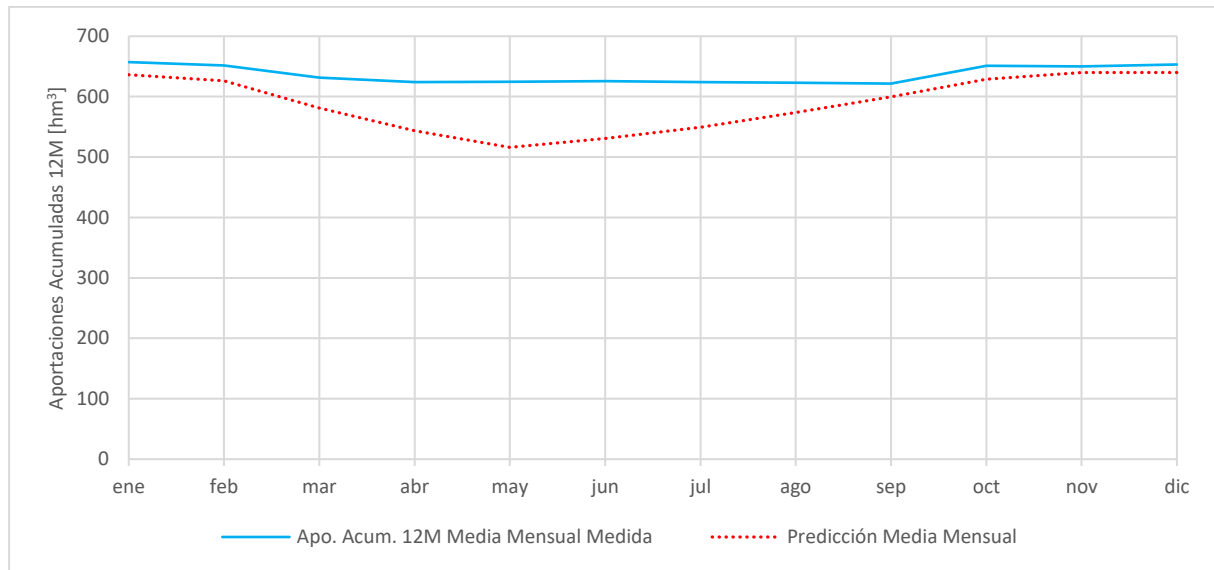


Figura 4.46. Predicción media mensual de Aportaciones Acumuladas en los últimos 12 meses, según el mes predicho.

Según los resultados promedio de la predicción, las aportaciones acumuladas durante los 12 meses previos a los comprendidos entre octubre y febrero se mantendrían relativamente constantes, con un valor aproximado de 630 [hm³]. En mayo, sin embargo, se presentarían los menores valores, bordeando los 516 [hm³].

B) Desempeño según el mes de inicio de la predicción

De forma análoga a la previa exhibición de las predicciones medias según el mes a partir del cual se desarrollan, en las Figuras 4.47 y 4.48 se presentan los promedios mensuales de los errores asociados a estas predicciones. En el primer gráfico se muestran los errores absolutos, con la aportación acumulada media mensual registrada como referencia, mientras que, en el segundo, se presentan los valores porcentuales de estos mismos errores, con respecto a los datos históricos.

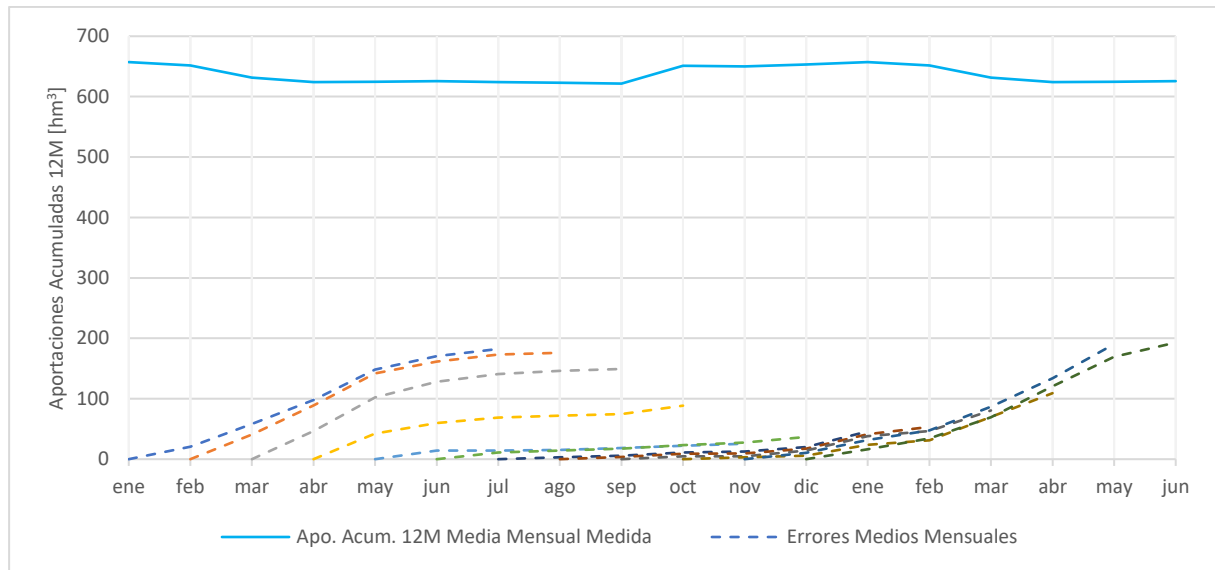


Figura 4.47. Errores medios mensuales de las predicciones de aportaciones acumuladas con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.

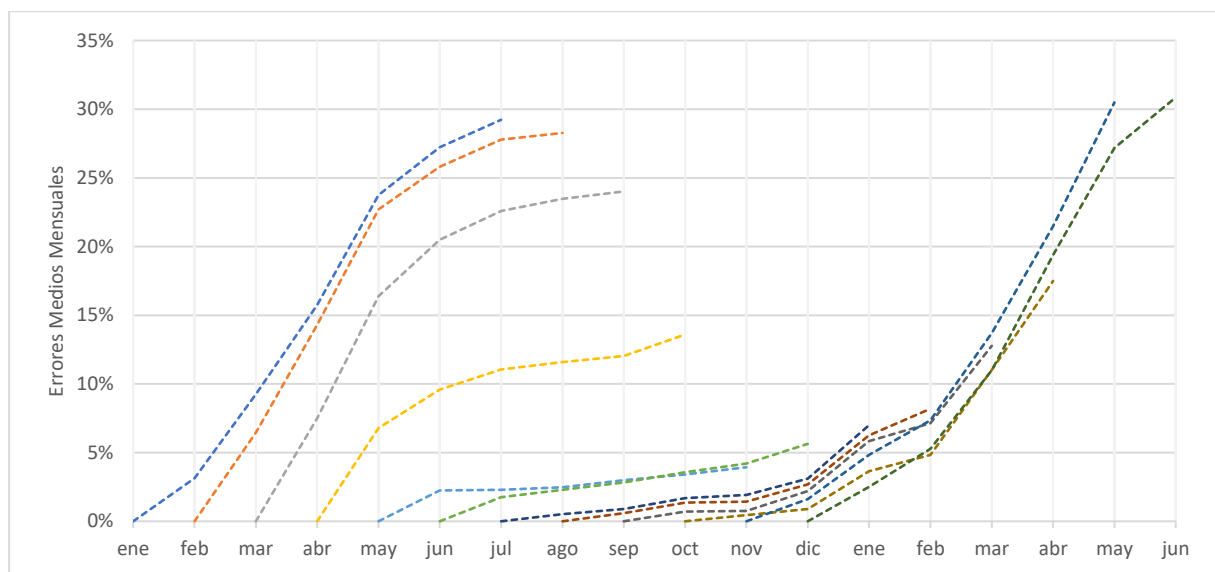


Figura 4.48. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de aportaciones acumuladas con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.

En concordancia con lo que ocurre con las aportaciones mensuales, las mejores predicciones de aportaciones acumuladas son las realizadas a partir de los datos registrados durante el mes de mayo, obteniéndose un error medio del 2%. Este buen comportamiento se mantiene durante los meses siguientes, sin llegar a superarse el 10% de error en las predicciones

realizadas a partir de los datos de mayo a agosto. Por el contrario, las predicciones que menos se asemejan a los valores observados corresponden a las realizadas tomando en cuenta como mes inicial los datos registrados en febrero, con errores medios del 18%.

C) *Desempeño según el mes predicho*

Promediando los errores asociados a las predicciones generadas para cada mes del año, se generan las curvas presentadas en las Figuras 4.49 y 4.50, que dan una idea de la calidad de la predicción de las aportaciones acumuladas, dependiendo del mes para el cual se están desarrollando.

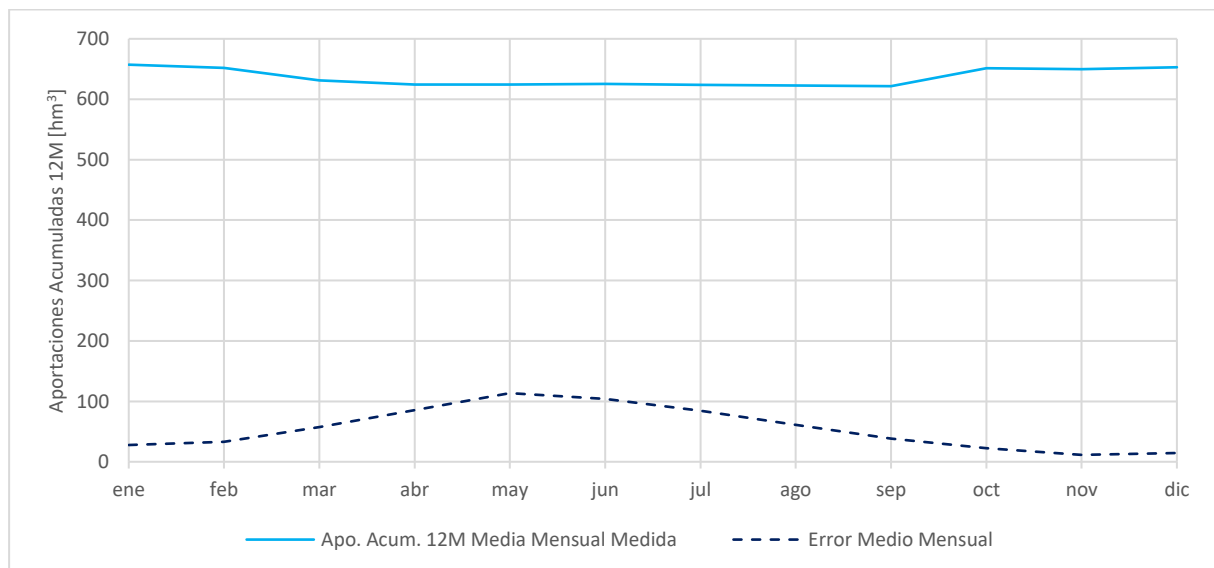


Figura 4.49. Error medio mensual de las predicciones de aportaciones acumuladas con respecto a los datos medidos, según el mes predicho.

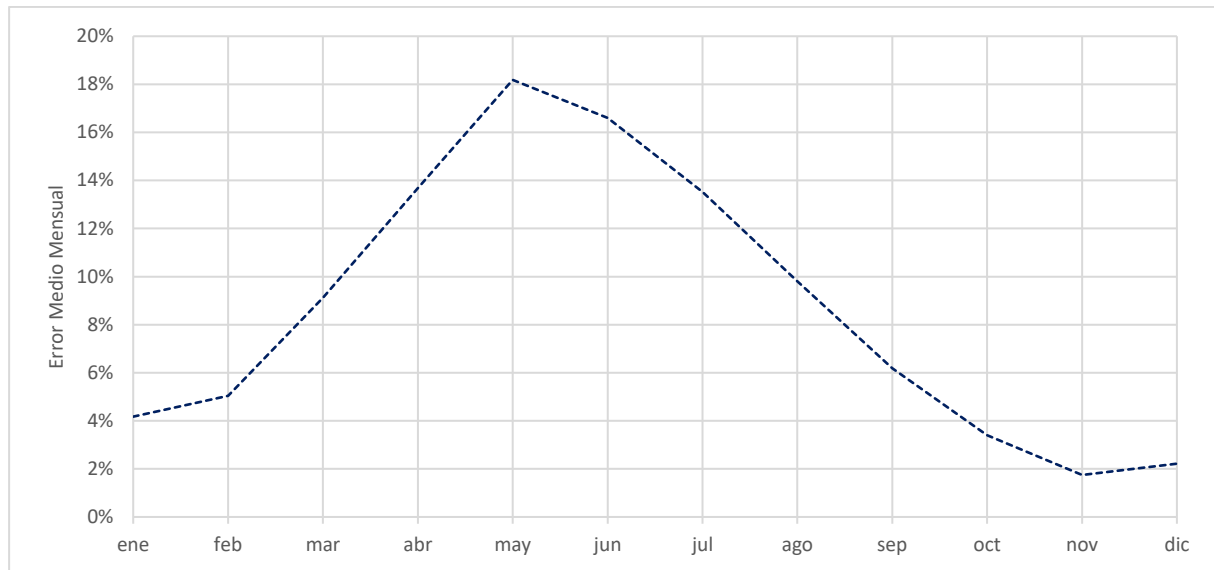


Figura 4.50. Error medio mensual porcentual de las predicciones de aportaciones acumuladas con respecto a los datos medidos, según el mes predicho.

A pesar de los significativos errores que puede llegar a presentar la predicción de aportaciones mensuales, la predicción de aportaciones acumuladas genera resultados bastante más favorables, gracias a que incorpora en su cálculo los datos de, a lo menos, 6 meses de precipitaciones reales medidas, disminuyéndose así la incertidumbre presente en los resultados.

Según lo observado, los mínimos errores se presentan al predecir las aportaciones acumuladas previas a los meses de noviembre y diciembre, obteniéndose errores medios del orden de 13 [hm³], que equivalen al 2% de las precipitaciones medias acumuladas registradas durante esos meses. Esto ocurre porque dichos valores incluyen la acumulación de aportaciones mensuales predichas durante los meses más secos del año, las cuales, según los resultados de su predicción, son las que mejor se proyectan. Por el contrario, las predicciones de las aportaciones acumuladas previas a los meses de mayo y junio incluyen la acumulación de las aportaciones mensuales predichas durante los meses más húmedos, que son las que peor se proyectan, por lo que, en estos casos, se obtienen errores medios del orden de 114 [hm³], que equivalen al 18% de las precipitaciones medias acumuladas registradas durante esos meses.

D) Desempeño según la antelación con la que se realiza la predicción

Ya que no es lo mismo predecir lo que ocurrirá durante el mes siguiente, que lo que ocurrirá en 6 meses más, se analiza, finalmente, la calidad de las predicciones en función de la antelación con la que éstas se desarrollan, es decir, qué tan certeros son los resultados luego de aumentar el horizonte de proyección.

A continuación, luego de promediar los errores obtenidos para las predicciones desarrolladas a distintos plazos de tiempo, se generan las curvas presentadas en las Figuras 4.51 y 4.52, que representan los errores medios absolutos y porcentuales, respectivamente.

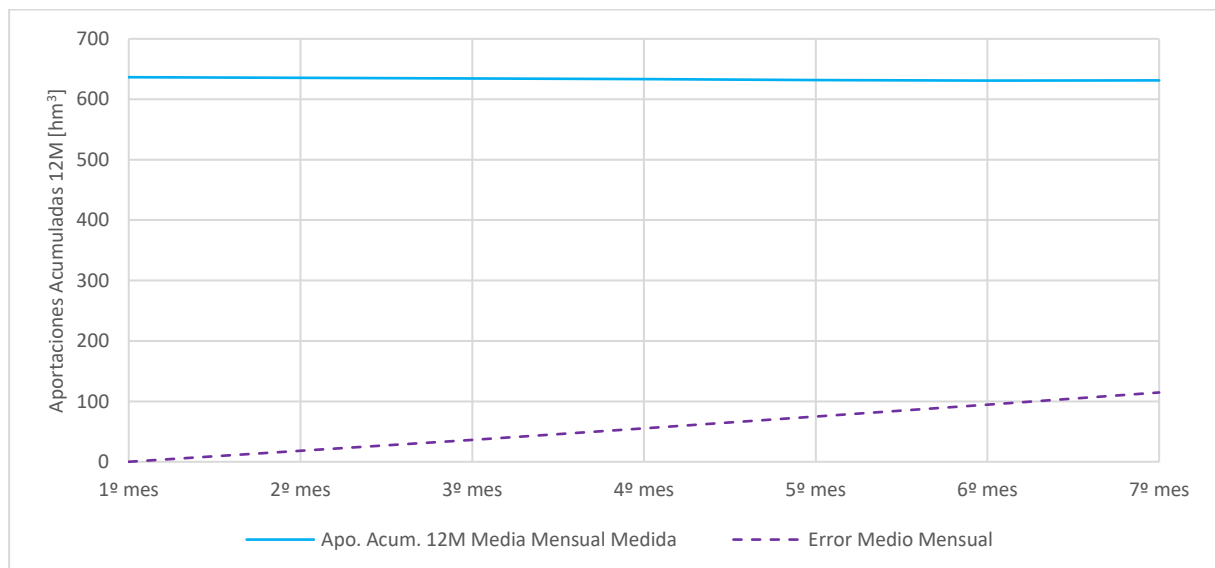


Figura 4.51. Error medio mensual de las predicciones de aportaciones acumuladas con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

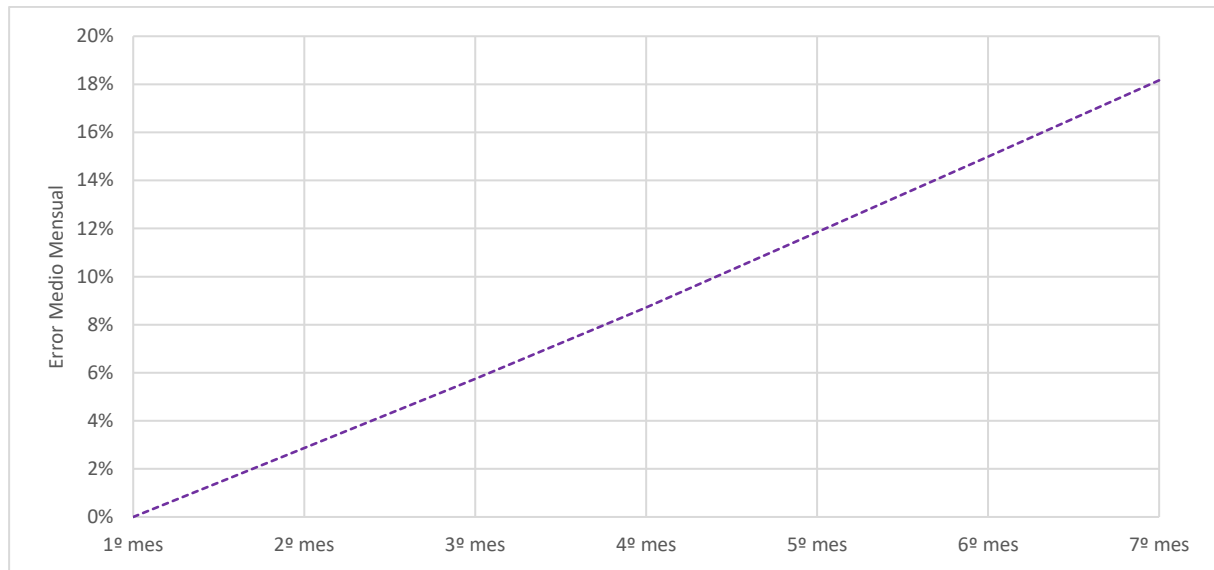


Figura 4.52. Error medio mensual porcentual de las predicciones de aportaciones acumuladas con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

El error asociado a la predicción de las aportaciones acumuladas previas al primer mes es nulo debido a que, como se ha mencionado con anterioridad, los modelos de sueltas desarrollados en este estudio simulan los trasvases y desembalses a partir de variables de entrada correspondientes al mes anterior a la simulación, por lo que, para realizar la predicción del primer mes de sueltas, las aportaciones acumuladas a considerar son las referentes a los 12 meses previos ya concluidos y, por lo tanto, son conocidas. Para las predicciones desarrolladas hacia más largo plazo, como cabe esperar, los errores van aumentando conforme crece el horizonte de predicción, hasta alcanzar, para la predicción del último mes, los máximos errores medios calculados. Cabe destacar que este aumento del error presenta una tendencia lineal debido a que, por corresponder a la acumulación de un año hidrológico completo, cualquier patrón hidrológico intraanual es laminado. Además, con cada iteración, se incorporan a la predicción de esta variable los errores asociados a la predicción de las aportaciones mensuales de un mes adicional.

4.2.3. *Predicción de volúmenes embalsados en la cabecera del Tajo*

Si bien el volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía corresponde a una variable de entrada para los modelos de simulación de sueltas desarrollados en este estudio, sus valores futuros pueden ser estimados, mediante un balance hídrico, a partir de los resultados generados por los mismos modelos. De esta manera, la proyección de los volúmenes embalsados en la cabecera del Tajo constituye, junto con los volúmenes trasvasados al Segura y los desembalses hacia el río Tajo, uno de los resultados del modelo integrado para la predicción de variables asociadas al ATS.

El proceso para la predicción de esta variable consiste en el cálculo sucesivo de los volúmenes proyectados, por medio de la aplicación mensual de la ley de conservación de masas. Esto significa que el volumen que se espera que los embalses de Entrepeñas y Buendía almacenen a fin de mes corresponde al volumen embalsado al término del mes anterior, sumado a las variaciones de volumen predichas durante el mes de simulación, específicamente, entradas menos salidas. En términos concretos, las entradas a los embalses corresponden a las aportaciones mensuales previstas según el método previamente indicado, mientras que las salidas quedan representadas por los volúmenes trasvasados hacia la cuenca del Segura, los desembalses realizados al río Tajo (calculados ambos empleando los sistemas lógicos difusos previamente descritos), y las evaporaciones que pudiesen producirse. Así, finalmente, la predicción de los volúmenes almacenados queda determinada en función de las proyecciones de cada una de las variables mencionadas, por lo que los errores en éstas influyen en su calidad final.

A) *Resultados generales*

A continuación, en la Figura 4.53, se presenta en color negro el registro histórico del volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía, mientras que las líneas segmentadas representan los resultados de las predicciones realizadas a partir de cada uno de estos datos.

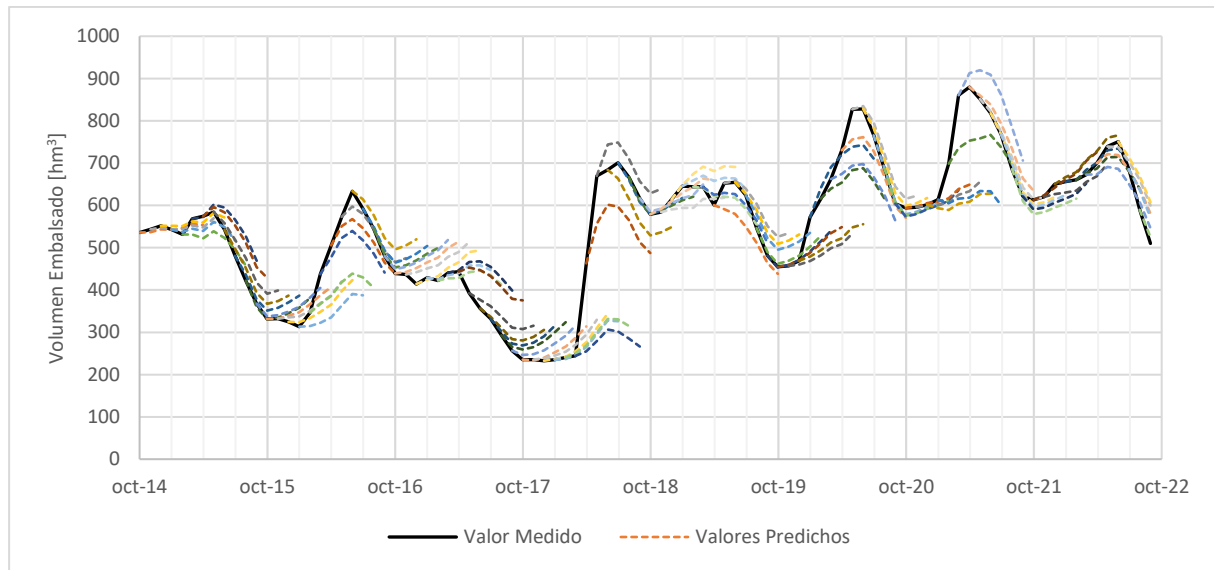


Figura 4.53. Predicciones de Volúmenes Embalsados en Entrepeñas y Buendía.

La separación existente entre la curva continua y las segmentadas representa el grado de error asociado a cada predicción, ya que, en un caso ideal, donde las predicciones fuesen totalmente certeras, dichas curvas quedarían superpuestas.

Para observar de mejor manera la tendencia que siguen las predicciones desarrolladas, se procede a reagrupar los resultados en la Figura 4.54, siguiendo el mismo procedimiento descrito para el análisis de las variables previamente detalladas. En ésta, cada línea punteada representa el promedio de los volúmenes predichos al considerar como mes inicial para la proyección los distintos meses del año. Además, a modo de referencia, se incluye una línea continua que indica el volumen medio mensual registrado.

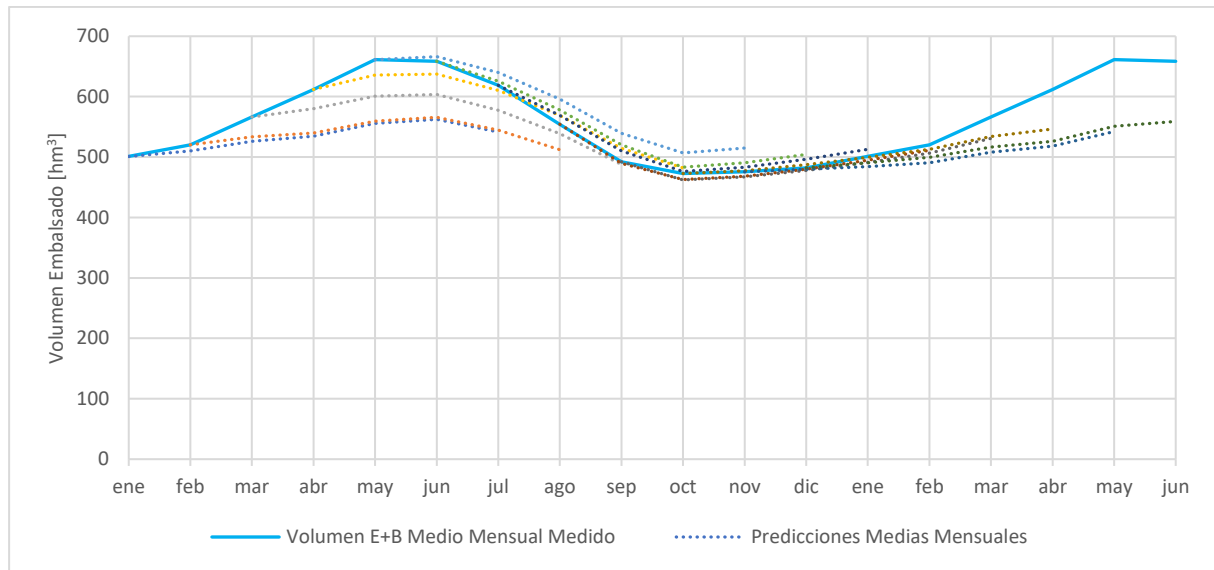


Figura 4.54. Predicciones medias mensuales de Volúmenes Embalsados en Entrepeñas y Buendía, según el mes en el que comienza la predicción.

En los gráficos anteriores se evidencia que el modelo tiene cierta capacidad para predecir la tendencia que seguirán los volúmenes registrados, es decir, acierta al indicar si es que estos volúmenes aumentarán o disminuirán en el tiempo. Sin embargo, suele subestimar la magnitud de estas variaciones, tendiendo a la proyección de volúmenes más estables que los realmente medidos. Esta subestimación es, sin duda, producto de la subestimación de las aportaciones previamente referida, que repercute directamente en el cálculo de los volúmenes.

Adicionalmente, a modo de síntesis de los resultados, se presenta la Figura 4.55, que expone una representación del valor medio de las predicciones realizadas para cada mes del año, independiente del mes de origen de su predicción, es decir, indica el que sería el volumen medio mensual predicho.

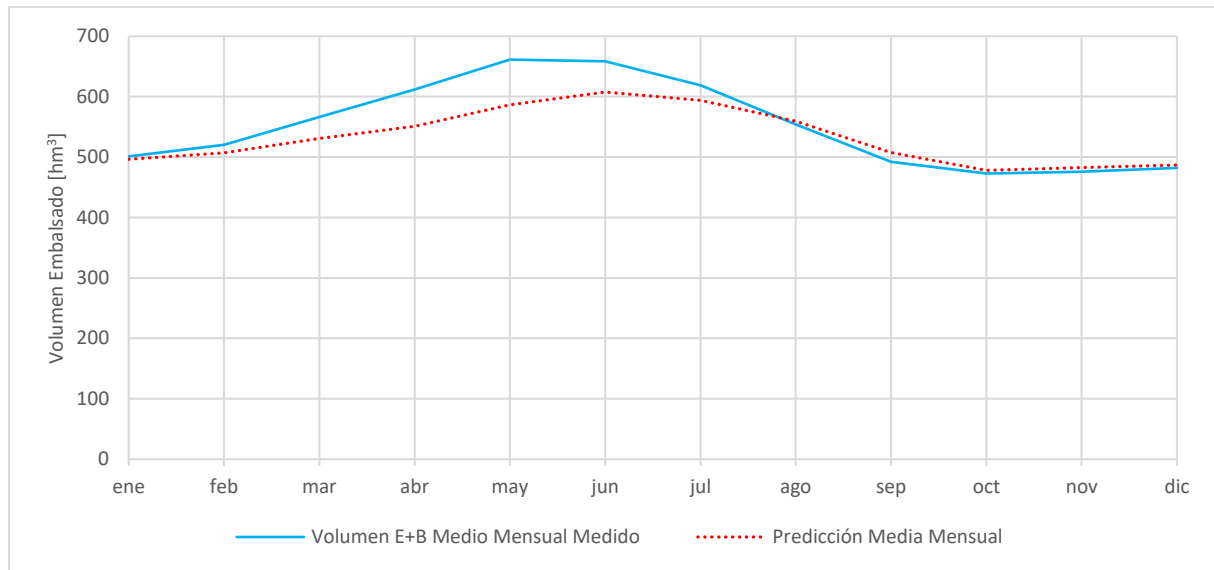


Figura 4.55. Predicción media mensual de Volúmenes Embalsados en Entrepeñas y Buendía, según el mes predicho.

Según los resultados promedio de la predicción, la mínima acumulación de los embalses se presentaría en octubre, llegando a 478 [hm³], lo que coincide con el fin del periodo estival, en el que el agua de los embalses se emplea para riego. Desde ese momento, el volumen se mantendría prácticamente constante hasta febrero, momento en el que, producto del aumento de las aportaciones medias, el volumen acumulado comenzaría su acenso, hasta llegar a un máximo de 608 [hm³] durante el mes de junio.

B) Desempeño según el mes de inicio de la predicción

De forma análoga a la previa exhibición de las predicciones medias según el mes a partir del cual se desarrollan, en las Figuras 4.56 y 4.57 se presentan los promedios mensuales de los errores asociados a estas predicciones. En el primer gráfico se muestran los errores absolutos, con el volumen medio mensual registrado como referencia, mientras que, en el segundo, se presentan los valores porcentuales de estos mismos errores, con respecto a los datos históricos.

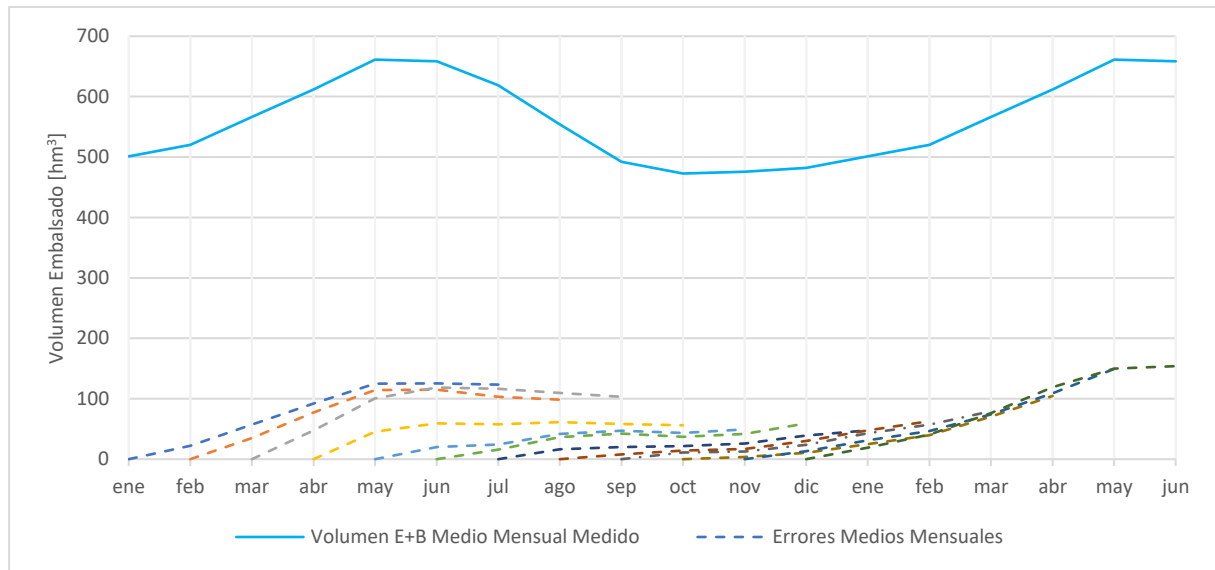


Figura 4.56. Errores medios mensuales de las predicciones de volúmenes embalsados en E+B con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.

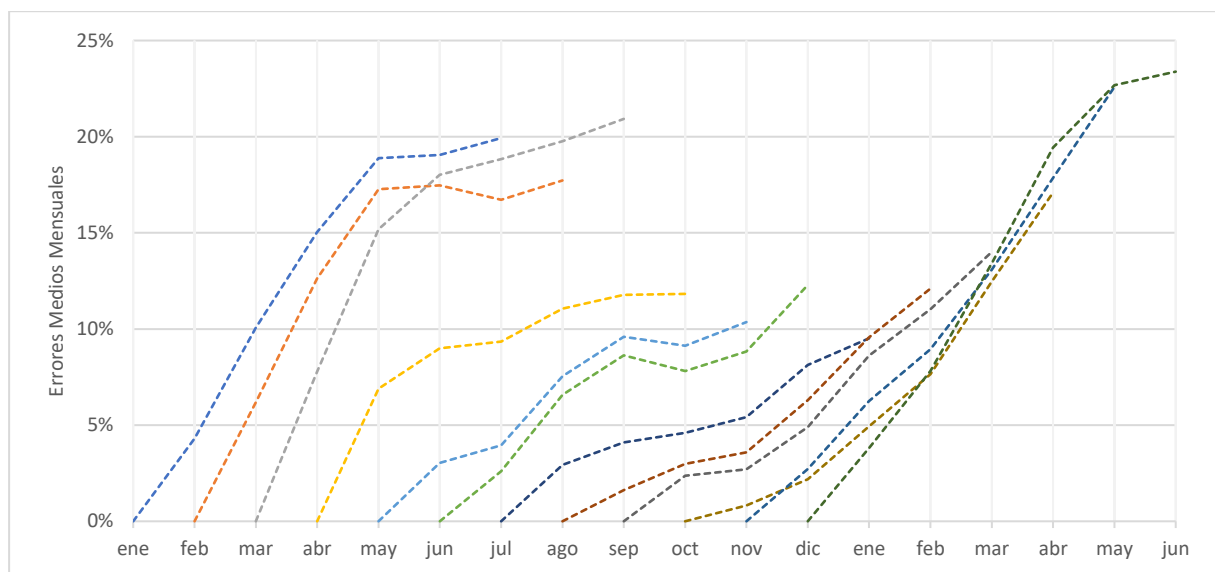


Figura 4.57. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de volúmenes embalsados en E+B con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.

Según los resultados, las mejores predicciones de volúmenes embalsados son las realizadas a partir de los datos registrados durante julio, con un error medio del 5%. Este buen comportamiento se mantiene, en general, durante toda la época, sin llegar a superarse el 15% de error en las predicciones realizadas a partir de los datos de abril a septiembre. Por el

contrario, las proyecciones realizadas a partir de los datos registrados en marzo son las que menos se asemejan, de media, a los valores observados, obteniéndose errores medios del 14% y máximos del 21%.

C) *Desempeño según el mes predicho*

Promediando los errores asociados a las predicciones generadas para cada mes del año, se generan las curvas presentadas en las Figuras 4.58 y 4.59 , que dan una idea de la calidad de la predicción de los volúmenes almacenados en la cabecera del Tajo, dependiendo del mes para el cual se están desarrollando.

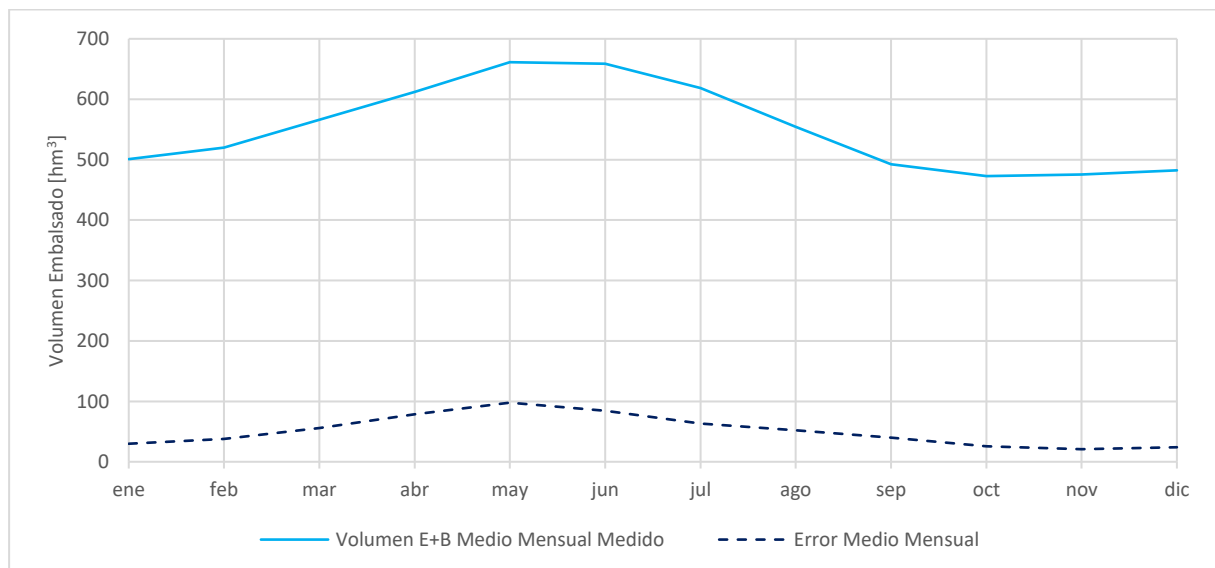


Figura 4.58. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes embalsados en E+B con respecto a los datos medidos, según el mes predicho.

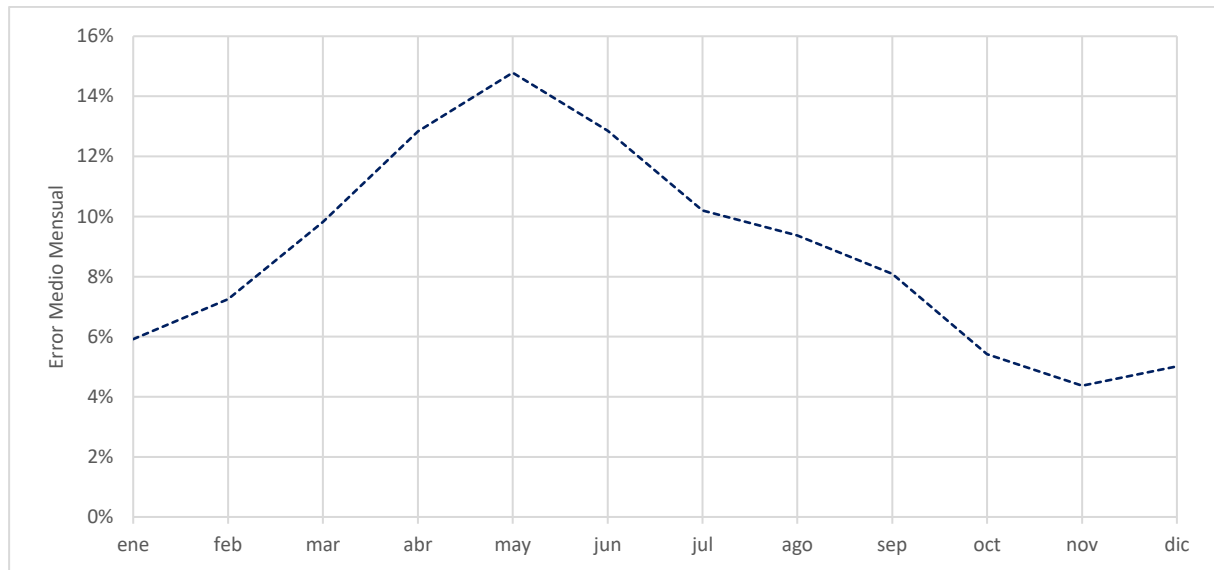


Figura 4.59. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes embalsados en E+B con respecto a los datos medidos, según el mes predicho.

En general, la calidad de los resultados es bastante favorable y muy similar a la de las predicciones de aportaciones acumuladas. Según lo observado, los mínimos errores se presentan al predecir los volúmenes almacenados en noviembre, obteniéndose errores medios de 21 [hm³], que equivalen al 4% del volumen medio registrado durante ese mes. Por el contrario, las peores proyecciones corresponden a las de los volúmenes embalsados en mayo, alcanzando errores medios de 98 [hm³], que, si bien es una magnitud enorme, solo representa el 15% del volumen medio registrado.

D) Desempeño según la antelación con la que se realiza la predicción

Ya que no es lo mismo predecir lo que ocurrirá durante el mes siguiente, que lo que ocurrirá en 6 meses más, se analiza, finalmente, la calidad de las predicciones en función de la antelación con la que éstas se desarrollan, es decir, qué tan certeros son los resultados luego de aumentar el horizonte de proyección.

A continuación, luego de promediar los errores obtenidos para las predicciones desarrolladas a distintos plazos de tiempo, se generan las curvas presentadas en las Figuras 4.60 y 4.61, que representan los errores medios absolutos y porcentuales, respectivamente.

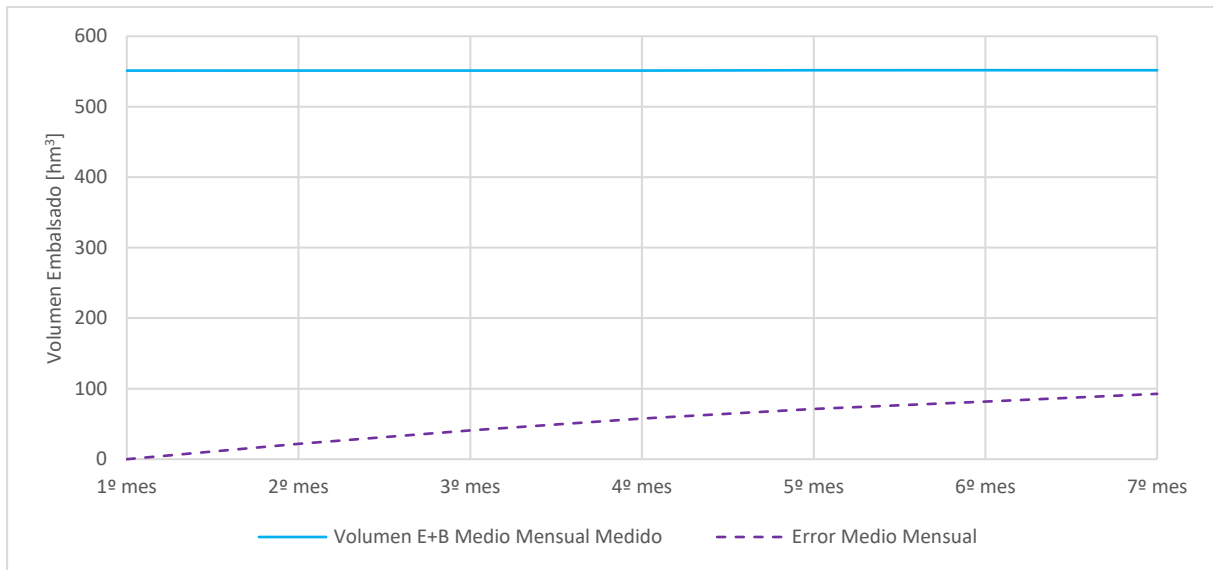


Figura 4.60. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes embalsados en E+B con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

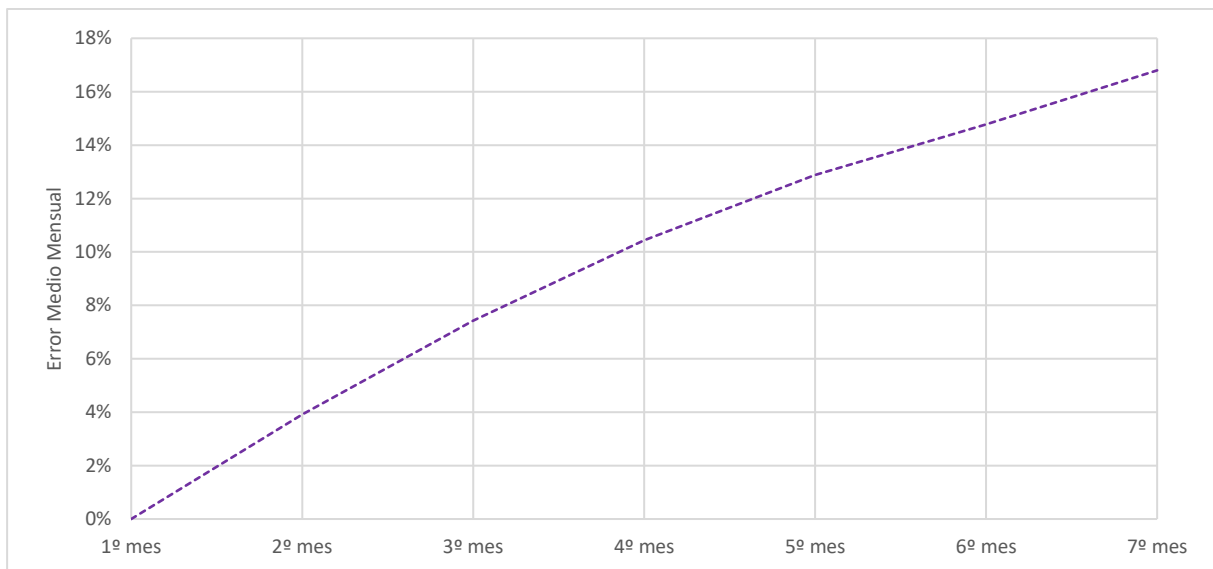


Figura 4.61. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes embalsados en E+B con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

El error asociado a la predicción de los volúmenes del primer mes es nulo debido a que, como se ha mencionado con anterioridad, los modelos de sueltas desarrollados en este estudio simulan los trasvases y desembalses a partir de variables de entrada correspondientes al mes

anterior a la simulación, por lo que, para realizar la predicción del primer mes de sueltas, los volúmenes a considerar son los referentes al mes recién concluido y, por lo tanto, son conocidos. Para las predicciones desarrolladas hacia más largo plazo, como cabe esperar, los errores van aumentando conforme crece el horizonte de predicción, hasta alcanzar, para la predicción del último mes, los máximos errores medios calculados.

4.2.4. Predicción de volúmenes trasvasados a la cuenca del Segura

La predicción de los volúmenes trasvasados a la cuenca del Segura implica la simulación de la variable utilizando el modelo de lógica difusa desarrollado, pero, en este caso, considerando como datos de entrada los valores predichos previamente, en vez que las respectivas series históricas de sus variables de entrada.

Por el mismo motivo, los resultados obtenidos presentan errores que son, en distinta medida, atribuibles a diversos factores. Comparar los resultados de la predicción con los datos históricos medidos resulta útil para analizar la robustez del modelo predictivo en su conjunto, incluyendo tanto el desempeño del propio modelo, como su capacidad para hacer frente a las incertidumbres provocadas por la proyección de las variables de entrada. No obstante, también quedan incluidos en el análisis los errores causados por las imprecisiones presentes en la calibración del modelo de simulación. Este último punto, sin embargo, ya fue abordado en la primera parte del capítulo de resultados, donde se analizó el desempeño de los modelos de lógica difusa con respecto a la serie histórica. Por lo tanto, con el objetivo de centrar el análisis en la capacidad predictiva del modelo, sin considerar los errores producto de su calibración, se presenta, también, la comparación de las predicciones con respecto a los datos modelados originalmente, es decir, los simulados a partir de las series históricas. De esta manera se realiza una distinción de los desempeños obtenidos. Por una parte, se presentan los errores generales, producidos tanto por las imprecisiones en la simulación como por la incertidumbre del proceso predictivo, mientras que, por otra, se presenta el desempeño asociado únicamente al proceso predictivo, sin considerar los errores de calibración del modelo. Esto permite evaluar la calidad que tendría el modelo aplicado (comparación con los datos históricos), así como estimar qué pérdida de calidad es debida a los errores de

calibración del modelo y cual es provocada por la calidad de las predicciones hidrológicas de las que se nutre (comparación con los resultados del modelo para la serie histórica).

A) Resultados generales

A continuación, en las Figuras 4.62 y 4.63, se presentan, como líneas segmentadas, los resultados de las predicciones realizadas a partir de la proyección de las variables de entrada. En el primer gráfico, la línea negra continua indica los trasvases reales registrados, mientras que, en el segundo, ésta representa los trasvases modelados a partir de datos históricos de las variables de entrada.

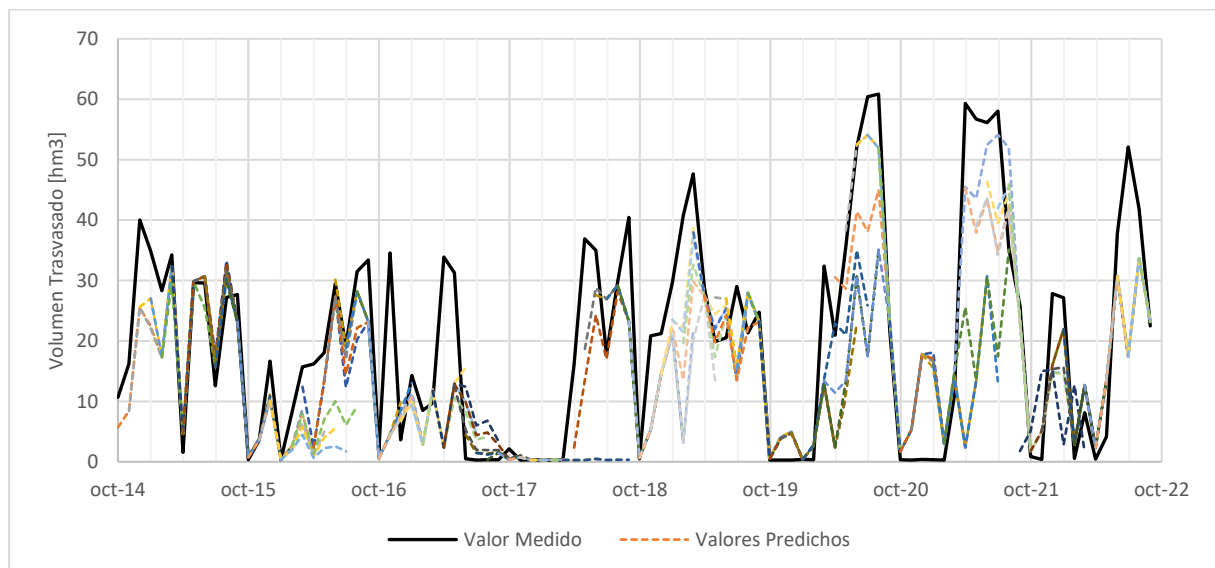


Figura 4.62. Predicciones de Volúmenes Trasvasados a la cuenca del Segura. Comparación con respecto a valores medidos.

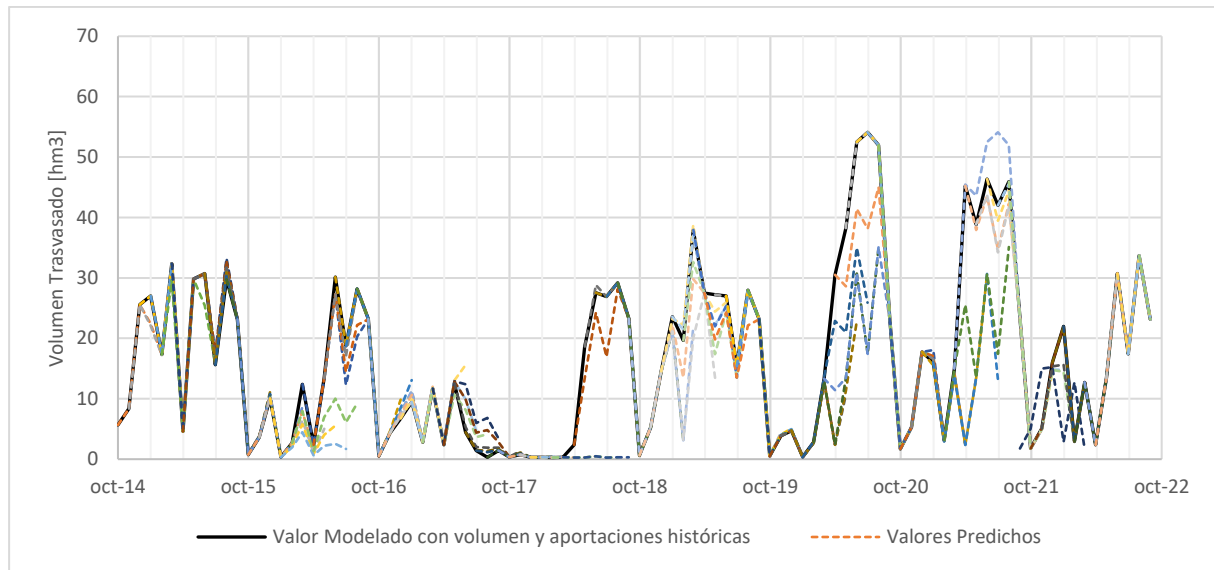


Figura 4.63. Predicciones de Volúmenes Trasvasados a la cuenca del Segura. Comparación con respecto a valores modelados.

La separación existente entre las curvas continuas y las segmentadas representa el grado de error asociado a cada predicción. Obviamente, las curvas de predicción se asemejan más a la curva de datos modelados que a la de datos históricos, ya que las dos primeras han sido generadas con el mismo modelo y, por lo tanto, sus diferencias se deben únicamente a las imprecisiones producto de la proyección de las variables de entrada.

Para observar de mejor manera la tendencia que siguen las predicciones desarrolladas, se procede a reagrupar los resultados en la Figura 4.64. En ésta, cada línea punteada representa el promedio de los trasvases mensuales predichos al considerar como mes inicial para la proyección los distintos meses del año, es decir, por ejemplo, la línea azul punteada que comienza en enero indica, para ese mes y los 6 siguientes, los promedios mensuales de todas las predicciones que se realizan tomando como mes inicial un mes de enero; la línea naranja punteada que comienza en febrero indica, para ese mes y los 6 siguientes, los promedios mensuales de todas las predicciones que se realizan tomando como mes inicial un mes de febrero; y así, sucesivamente, hasta llegar a la curva que representa las predicciones que se realizan tomando como mes inicial un mes de diciembre. Además, a modo de referencia, se incluyen dos líneas continuas que indican los trasvases medios mensuales registrados y los trasvases medios mensuales modelados, respectivamente.

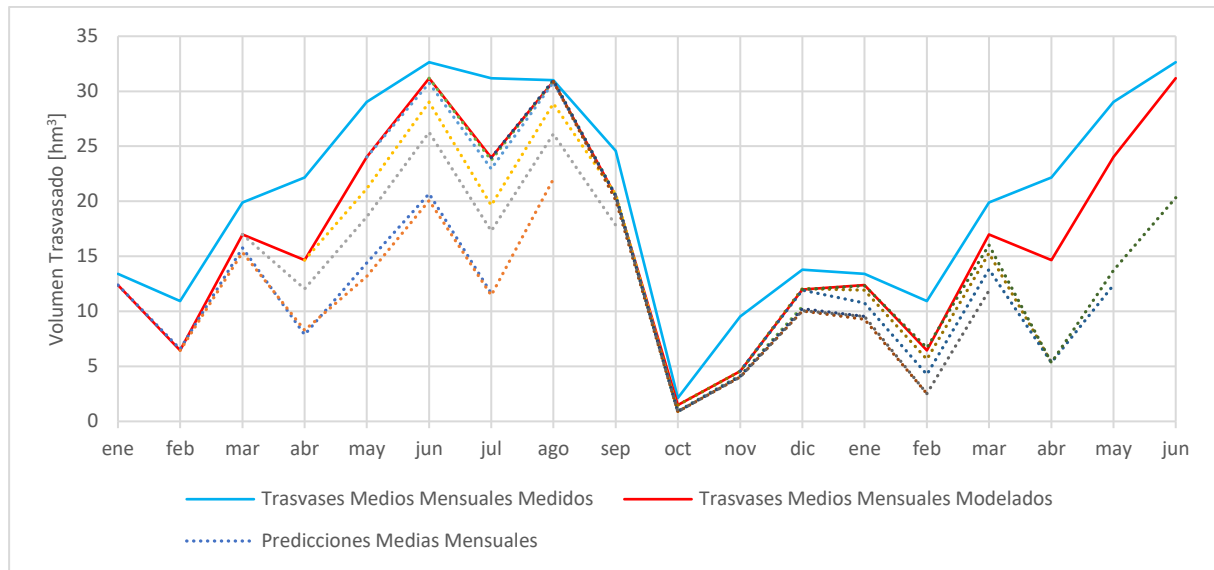


Figura 4.64. Predicciones medias mensuales de Volúmenes Trasvasados a la cuenca del Segura, según el mes en el que comienza la predicción. Comparación con respecto a valores medidos y modelados.

Tanto en las Figuras 4.62 y 4.63, como en la Figura 4.64, se observa que, si bien el modelo de simulación de las series históricas ya subestimaba los volúmenes trasvasados al Segura, el modelo predictivo los subestima aún más, especialmente en los picos. Esto tiene sentido considerando que las variables de entrada al modelo también han sido, en su mayoría, subestimadas. Se comprueba también, como era de esperar, que las predicciones se acercan más a los valores modelados que a los valores medidos. Esto ocurre especialmente entre septiembre y marzo, cuando el error provocado por la calibración es superior al error de la predicción hidrológica (las líneas azul y roja están más separadas que la roja de las discontinuas). Por el contrario, entre abril y agosto el error provocado por la predicción hidrológica es superior al error de calibración.

Adicionalmente, a modo de síntesis de los resultados, se presenta la Figura 4.65, que expone una representación del valor medio de las predicciones realizadas para cada mes del año, independiente del mes de origen de su predicción, es decir, indica el que sería el volumen trasvasado medio mensual predicho.

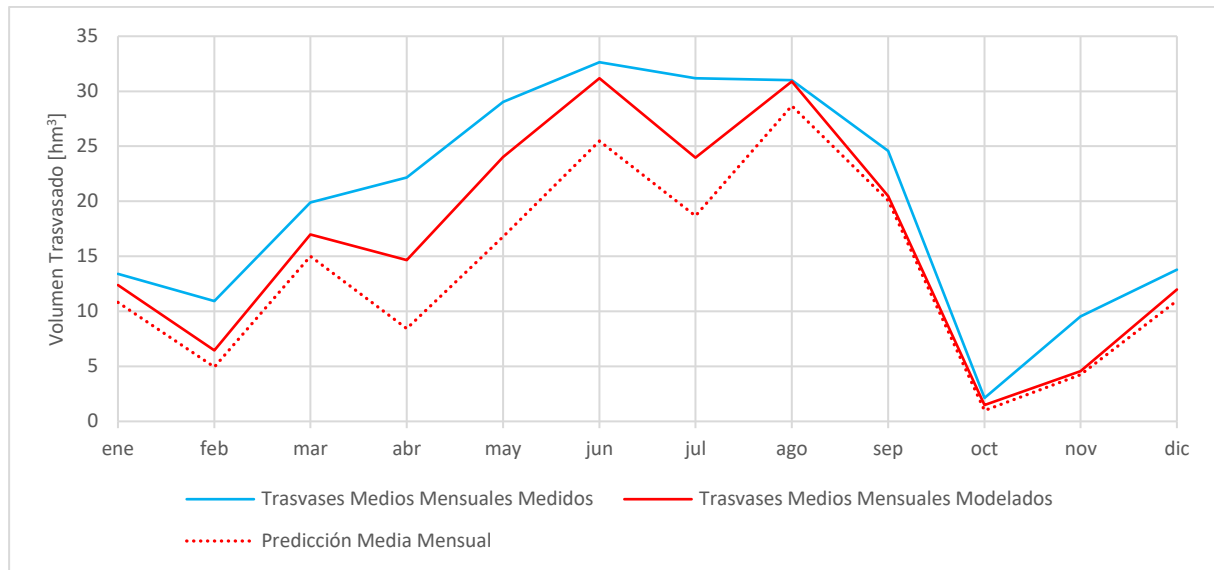


Figura 4.65. Predicción media mensual de Volúmenes Trasvasados a la cuenca del Segura, según el mes predicho. Comparación con respecto a valores medidos y modelados.

Según los resultados promedio de la predicción, los mínimos trasvases se realizarían durante octubre, rondando 1 [hm³], para luego, con una tendencia al alza, registrar los máximos valores durante agosto, con trasvases cercanos a 29 [hm³]. Es esperable que durante los meses invernales el valor trasvasado sea menor, debido a que esa época no se corresponde con la temporada de riego, y, por lo tanto, las demandas en el Segura son menores que durante los meses primaverales y estivales.

B) Desempeño según el mes de inicio de la predicción

De forma análoga a la previa exhibición de las predicciones medias según el mes a partir del cual se desarrollan, a continuación, en las Figuras 4.66, 4.67, 4.68 y 4.69, se presentan los promedios mensuales de los errores asociados a estas predicciones. Los primeros dos gráficos muestran, respectivamente, los errores absolutos y porcentuales obtenidos con respecto a los trasvases observados, mientras que los dos gráficos siguientes exponen los errores con respecto a los trasvases modelados.

a. Capacidad predictiva del modelo con respecto a las sueltas observadas

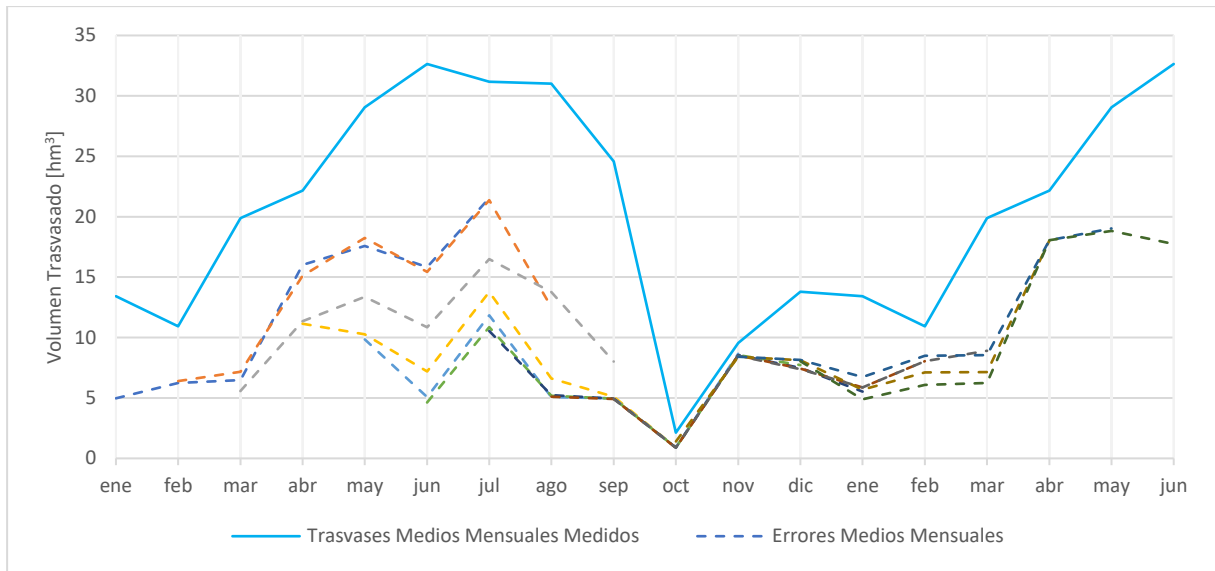


Figura 4.66. Errores medios mensuales de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.

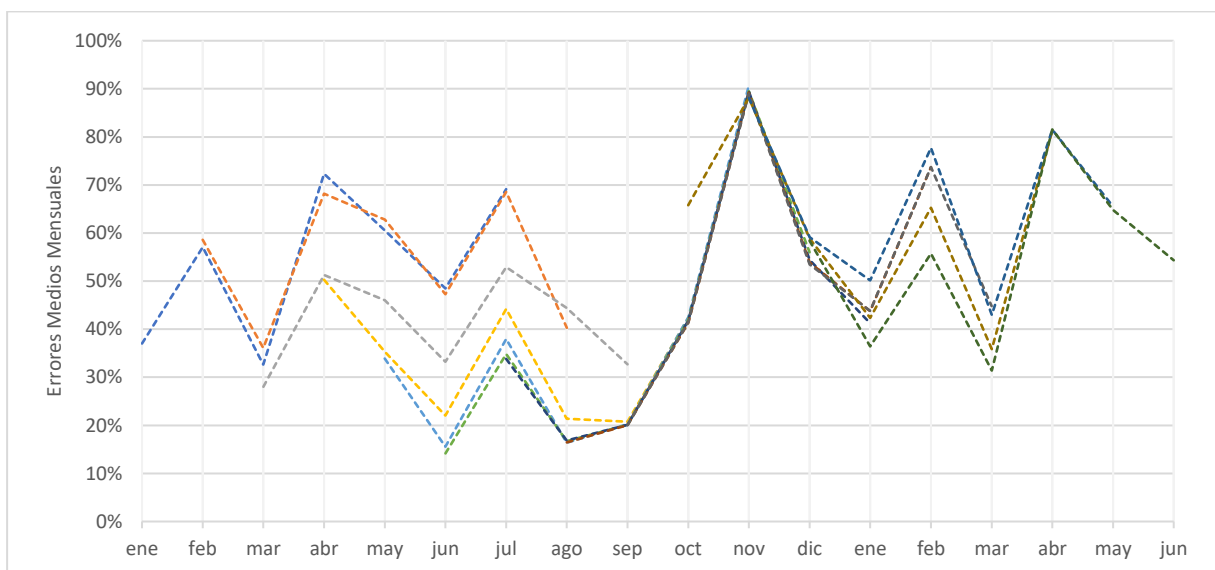


Figura 4.67. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.

Según los resultados, las mejores predicciones de volúmenes trasvasados, con respecto a los trasvases medidos, son las realizadas a partir de los datos registrados durante abril, con un

error medio del 34%. Por el contrario, las proyecciones realizadas a partir de los datos registrados en noviembre son las que menos se asemejan a los valores observados, obteniéndose errores medios del 66%.

b. Capacidad predictiva del modelo con respecto a las sueltas modeladas

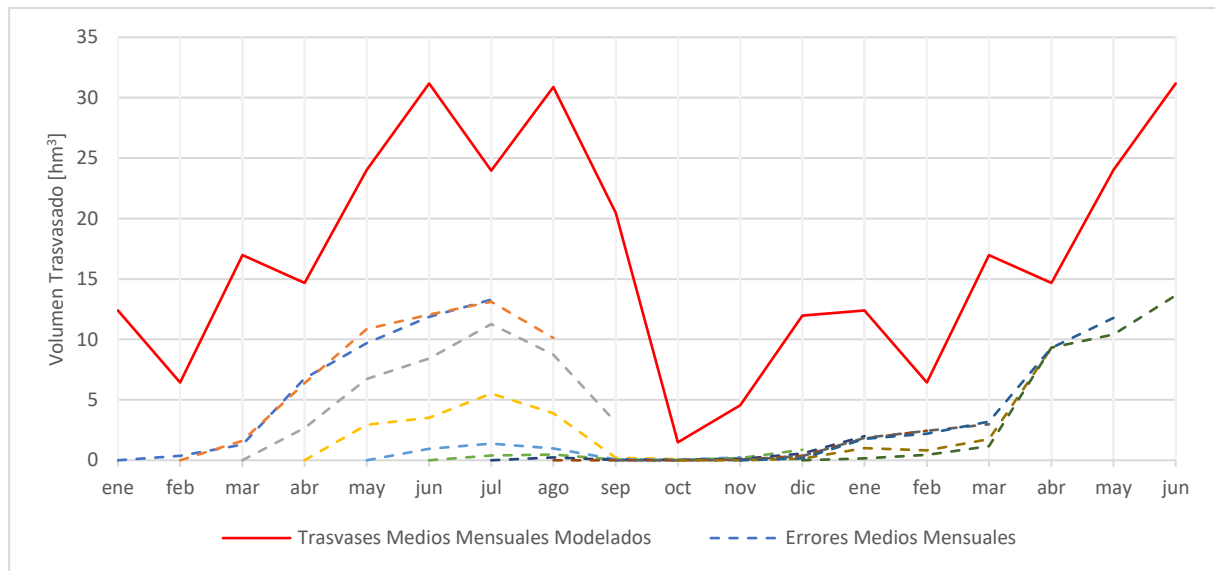


Figura 4.68. Errores medios mensuales de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos modelados, según el mes en el que comienza la predicción.

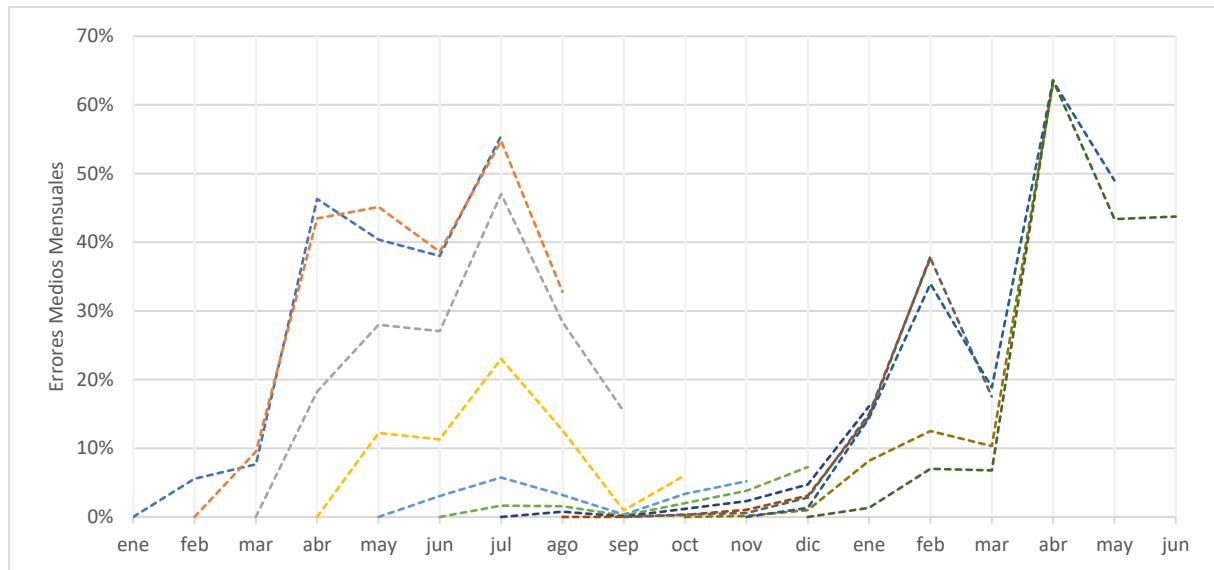


Figura 4.69. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos modelados, según el mes en el que comienza la predicción.

Al comparar los resultados con respecto a los datos modelados, no solo se reducen los errores, sino que también cambia su distribución. En este caso, las mejores predicciones de volúmenes trasvasados son las realizadas a partir de los datos registrados durante junio, con un error medio del 2%, mientras que las peores corresponden a las realizadas a partir de los datos de febrero, obteniéndose errores medios del 32%.

C) Desempeño según el mes predicho

Promediando los errores asociados a las predicciones para cada mes del año, se generan las curvas presentadas en las Figuras 4.70, 4.71, 4.72 y 4.73, que dan una idea de la calidad de la predicción de los volúmenes trasvasados en relación con el mes para el cual se están desarrollando. Los primeros dos gráficos muestran, respectivamente, los errores absolutos y porcentuales obtenidos con respecto a los trasvases observados, mientras que los dos gráficos siguientes exponen los errores con respecto a los trasvases modelados.

a. Capacidad predictiva del modelo con respecto a las sueltas observadas

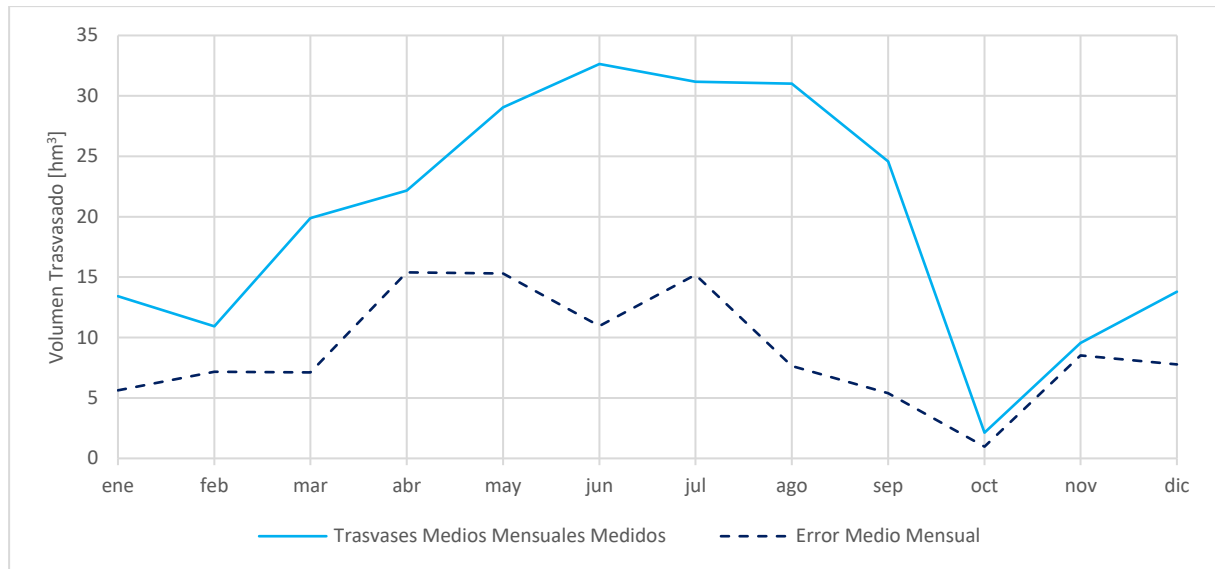


Figura 4.70. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos medidos, según el mes predicho.

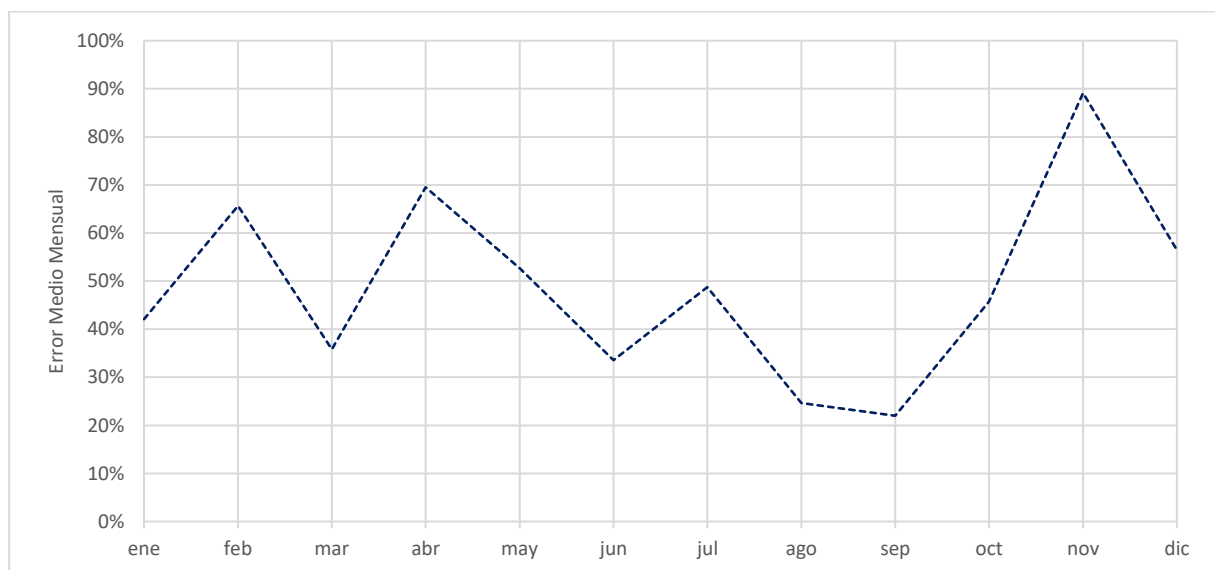


Figura 4.71. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos medidos, según el mes predicho.

Los gráficos indican que los mínimos errores, en términos absolutos, se presentan al predecir los trasvases de octubre, cuyas predicciones presentan un error medio de solo 1 [hm³]. Sin embargo, en términos relativos, el mes que mejor se predice es septiembre, con un error

medio del 22%, equivalente a 5 [hm³]. Ambos resultados son relativamente favorables y su diferencia se debe a la notable disparidad entre los trasvases medios mensuales medidos.

Por otro lado, en términos relativos, las peores predicciones corresponden a las de los trasvases efectuados durante noviembre, con errores medios del 89%. Sin embargo, estos errores equivalen a solo 9 [hm³], mientras que, durante abril, mayo y junio, se registran errores de 15 [hm³] para cada mes, lo cual representa un 69%, 53% y 49% de los trasvases medios mensuales respectivos.

b. Capacidad predictiva del modelo con respecto a las sueltas modeladas

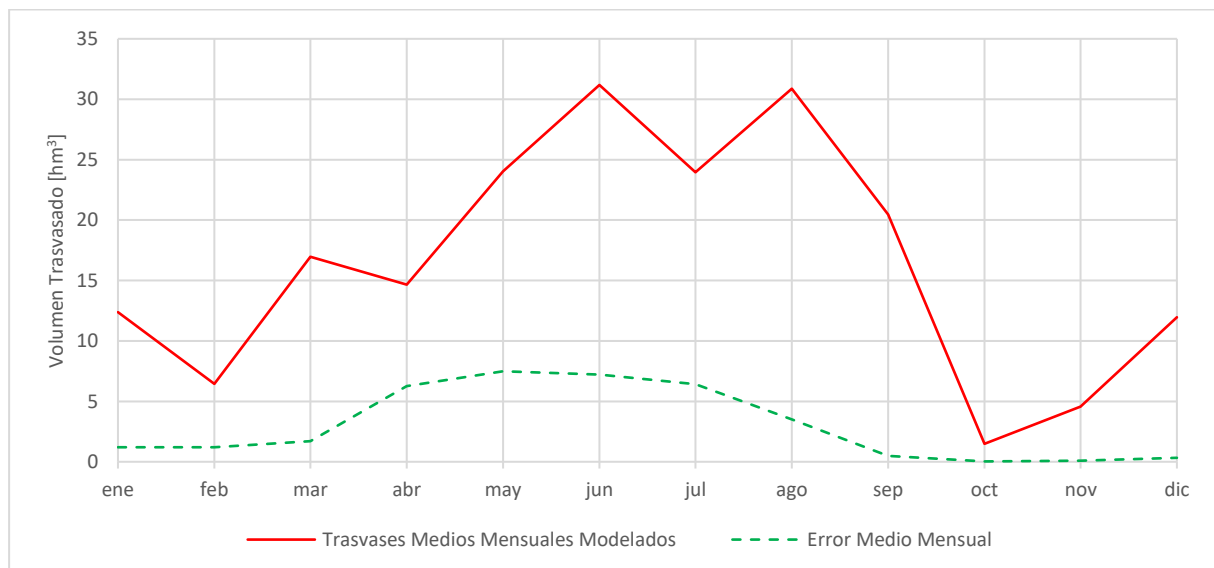


Figura 4.72. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos modelados, según el mes predicho.

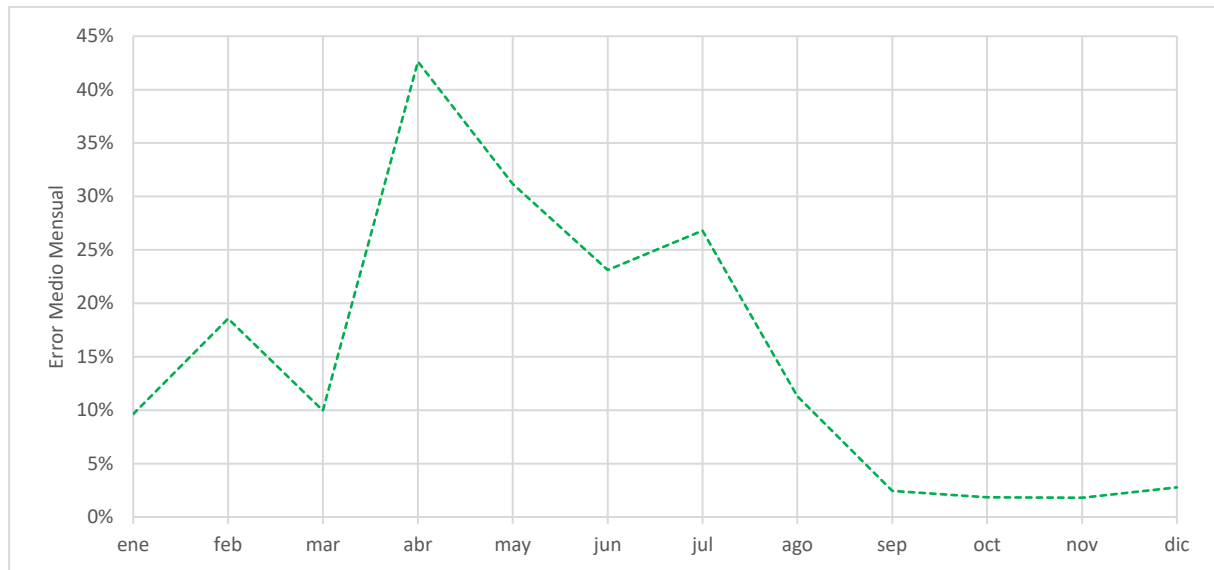


Figura 4.73. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos modelados, según el mes predicho.

Al comparar los resultados de las predicciones con respecto a los datos modelados, nuevamente, no solo se reduce la magnitud de los errores, sino que también se observan leves cambios en su distribución.

En este caso, los gráficos indican que los mínimos errores se presentan al predecir los trasvases modelados en el período comprendido entre septiembre y diciembre, cuyas predicciones presentan errores porcentuales de entre el 2% y el 3%, pero que, en términos absolutos, son prácticamente nulos. Entre enero y agosto, en cambio, estos errores aumentan al rango 10%-43%, siendo abril el peor mes predicho en términos relativos, con 43% de error relativo y 6 [hm³] de error absoluto, y mayo el peor en términos absolutos, con casi 8 [hm³], equivalentes al 31% con respecto al valor medio mensual modelado.

D) Desempeño según la antelación con la que se realiza la predicción

Ya que no es lo mismo predecir lo que ocurrirá durante el mes siguiente, que lo que ocurrirá en 6 meses más, se analiza, finalmente, la calidad de las predicciones en función de la antelación con la que éstas se desarrollan, es decir, qué tan certeros son los resultados luego de aumentar el horizonte de proyección.

A continuación, luego de promediar los errores obtenidos para las predicciones desarrolladas a distintos plazos de tiempo, se generan las curvas presentadas en las Figuras 4.74, 4.75, 4.76 y 4.77 . Los primeros dos gráficos muestran, respectivamente, los errores absolutos y porcentuales obtenidos con respecto a los trasvases observados, mientras que los dos gráficos siguientes exponen los errores con respecto a los trasvases modelados.

a. Capacidad predictiva del modelo con respecto a las sueltas observadas

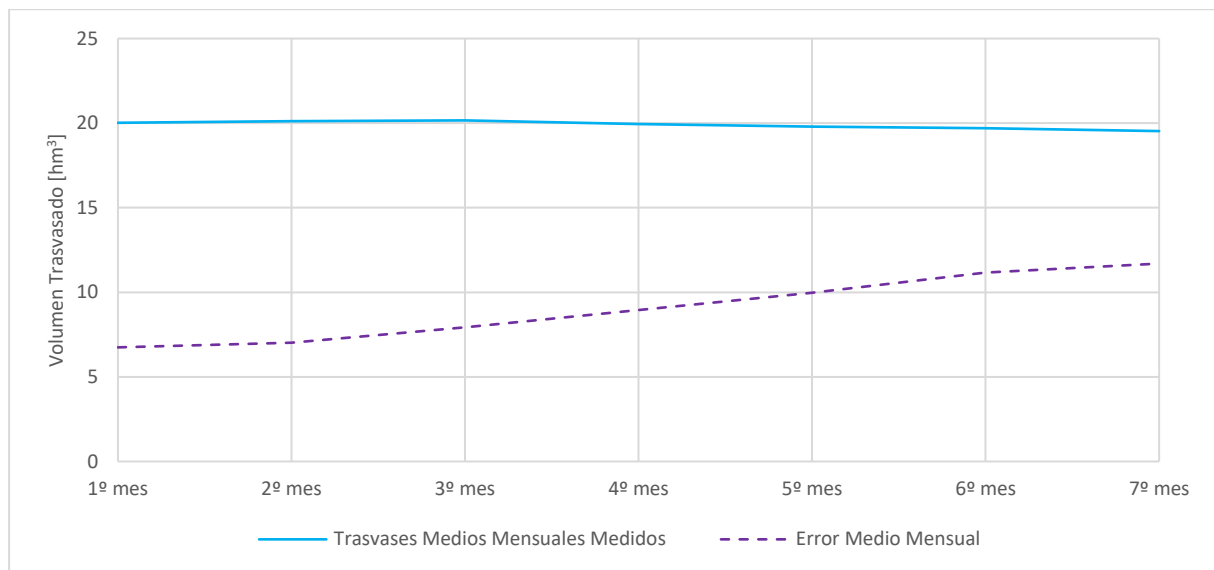


Figura 4.74. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

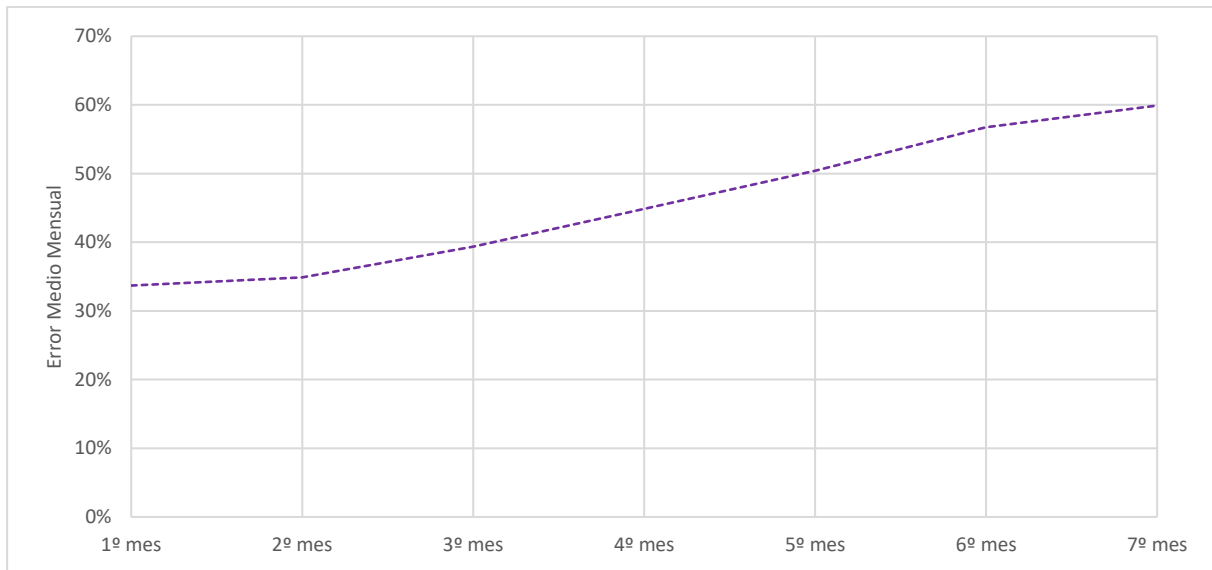


Figura 4.75. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

En este caso, a diferencia de lo que ocurre con las variables de entrada, el error asociado a la predicción del primer mes de volúmenes trasvasados no es nulo. Éste corresponde al generado por las imprecisiones en la calibración del modelo de simulación, y su valor, de media, alcanza casi 7 [hm³], equivalentes al 34% de los trasvases medios medidos. Para las predicciones desarrolladas hacia más largo plazo, como cabe esperar, los errores van aumentando conforme crece el horizonte de predicción, alcanzando, en el plazo de siete meses, errores medios de 12 [hm³], o, lo que es lo mismo, un 60% de los trasvases medios medidos.

b. Capacidad predictiva del modelo con respecto a las sueltas modeladas

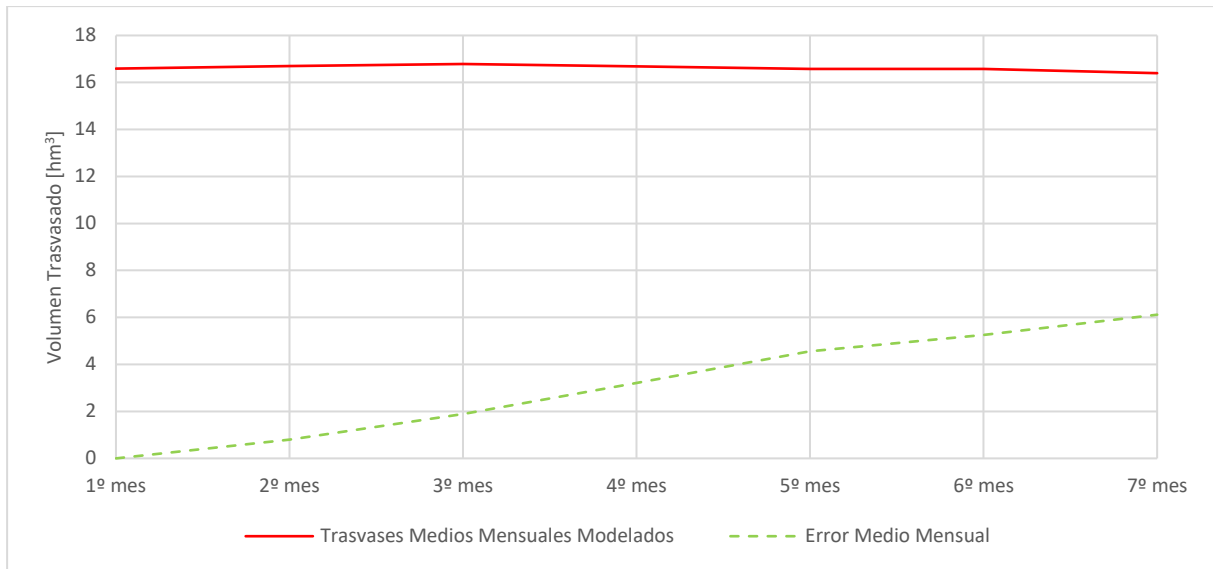


Figura 4.76. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos modelados, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

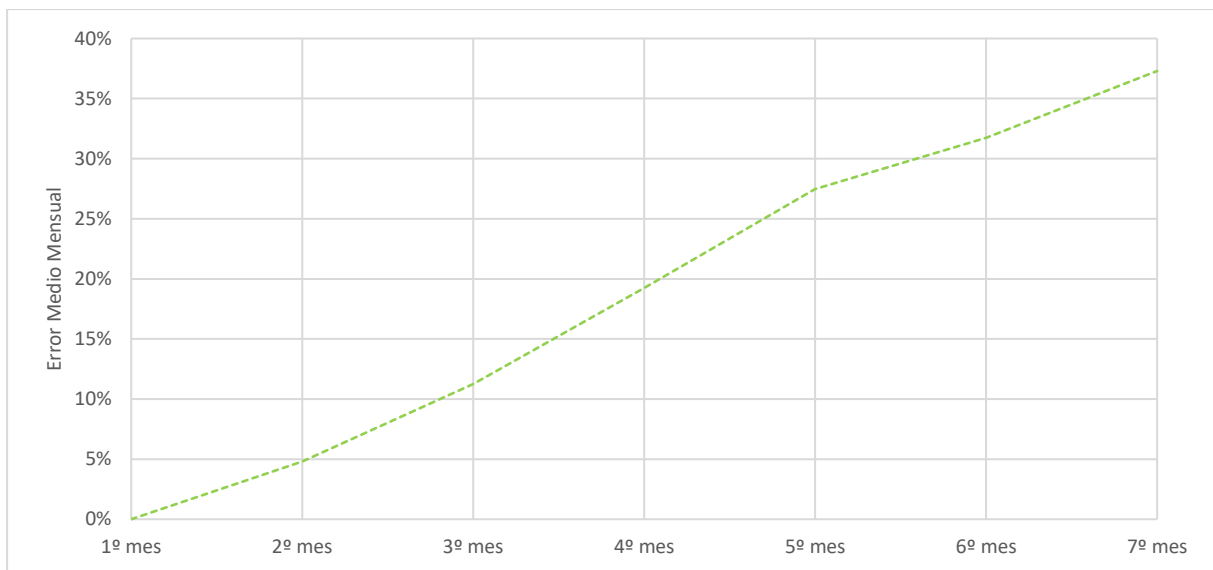


Figura 4.77. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes trasvasados al Segura con respecto a los datos modelados, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

Al comparar los resultados de las predicciones con los valores modelados y no con los valores medidos, se eliminan del análisis las implicancias que pudiesen generar las imprecisiones en

la calibración del modelo de simulación, por lo cual, los errores asociados a la predicción del primer mes de volúmenes trasvasados vuelven a ser nulos. De igual forma, para las predicciones desarrolladas hacia más largo plazo, los errores van aumentando conforme crece el horizonte de predicción, alcanzando, en el plazo de siete meses, errores medios de tan solo 6 [hm³], o, lo que es lo mismo, un 37% de los trasvases medios modelados.

4.2.5. Predicción de volúmenes desembalsados a la cuenca del Tajo

La predicción de los volúmenes desembalsados hacia la cuenca del Tajo implica la simulación de la variable utilizando el modelo de lógica difusa desarrollado, pero, en este caso, considerando como datos de entrada los valores predichos previamente, en vez que las respectivas series históricas de sus variables de entrada.

Por dicho motivo, los resultados obtenidos presentan errores que son, en distinta medida, atribuibles a diversos factores, haciéndose necesaria una distinción de los desempeños obtenidos. Por una parte, se presentan los errores generales, producidos tanto por las imprecisiones en la simulación como por la incertidumbre del proceso predictivo, mientras que, por otra, se presenta el desempeño asociado únicamente al proceso predictivo, sin considerar los errores de calibración del modelo. Esto permite evaluar la calidad que tendría el modelo aplicado (comparación con los datos históricos), así como estimar qué pérdida de calidad es debida a los errores de calibración del modelo y cual es provocada por la calidad de las predicciones hidrológicas de las que se nutre (comparación con los resultados del modelo para la serie histórica).

A) Resultados generales

A continuación, en las Figuras 4.78 y 4.79, se presentan, como líneas segmentadas, los resultados de las predicciones realizadas a partir de la proyección de las variables de entrada. En el primer gráfico, la línea negra continua indica los desembalses reales registrados, mientras que, en el segundo, ésta representa los desembalses modelados a partir de datos históricos de las variables de entrada.

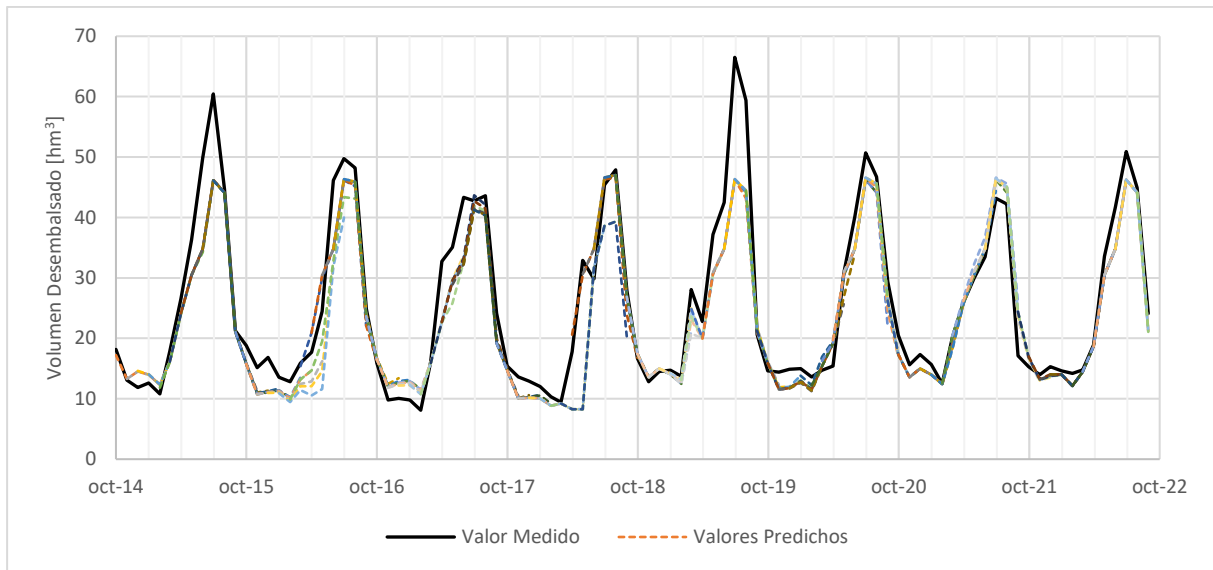


Figura 4.78. Predicciones de Volúmenes Desembalsados a la cuenca del Tajo. Comparación con respecto a valores medidos.

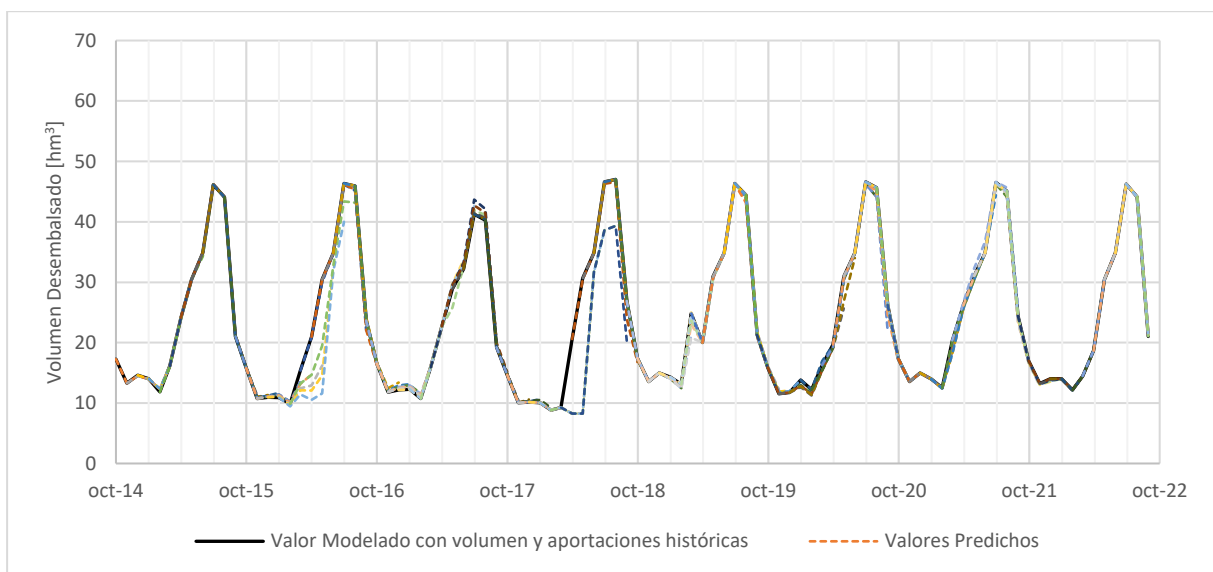


Figura 4.79. Predicciones de Volúmenes Desembalsados a la cuenca del Tajo. Comparación con respecto a valores modelados.

La separación existente entre las curvas continuas y las segmentadas representa el grado de error asociado a cada predicción. Obviamente, las curvas de predicción se asemejan más a la curva de datos modelados que a la de datos históricos, ya que las dos primeras han sido generadas con el mismo modelo y, por lo tanto, sus diferencias se deben únicamente a las

imprecisiones producto de la proyección de las variables de entrada. De todas maneras, cabe destacar que, para esta variable, el nivel de ajuste de las predicciones resulta sumamente satisfactorio.

Para observar de mejor manera la tendencia que siguen las predicciones desarrolladas, se procede a reagrupar los resultados en la Figura 4.80. En ésta, cada línea punteada representa el promedio de los desembalses mensuales predichos al considerar como mes inicial para la proyección los distintos meses del año, es decir, por ejemplo, la línea azul punteada que comienza en enero indica, para ese mes y los 6 siguientes, los promedios mensuales de todas las predicciones que se realizan tomando como mes inicial un mes de enero; la línea naranja punteada que comienza en febrero indica, para ese mes y los 6 siguientes, los promedios mensuales de todas las predicciones que se realizan tomando como mes inicial un mes de febrero; y así, sucesivamente, hasta llegar a la curva que representa las predicciones que se realizan tomando como mes inicial un mes de diciembre. Además, a modo de referencia, se incluyen dos líneas continuas que indican los desembalses medios mensuales registrados y los desembalses medios mensuales modelados, respectivamente.

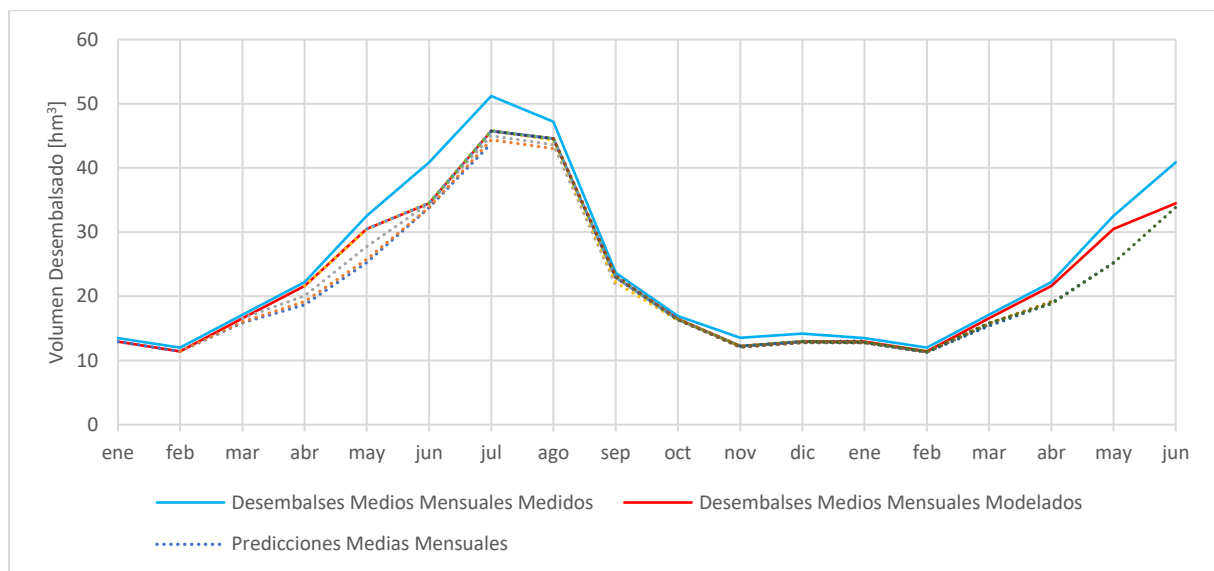


Figura 4.80. Predicciones medias mensuales de Volúmenes Desembalsados a la cuenca del Tajo, según el mes en el que comienza la predicción. Comparación con respecto a valores medidos y modelados.

Tanto en las Figuras 4.78 y 4.79, como en la Figura 4.80, se observa que, en general, las predicciones son muy similares a los valores modelados. Si bien el modelo de simulación de las series históricas subestima los volúmenes desembalsados al Tajo, igual como ocurre con los resultados de la proyección, las diferencias en comparación con los datos históricos son bastante pequeñas y afectan casi exclusivamente a los picos. Entre junio y agosto, además de noviembre y diciembre, el error lo provoca principalmente la calibración, más que la predicción.

Adicionalmente, a modo de síntesis de los resultados, se presenta la Figura 4.81, que expone una representación del valor medio de las predicciones realizadas para cada mes del año, independiente del mes de origen de su predicción, es decir, indica el que sería el volumen desembalsado medio mensual predicho.

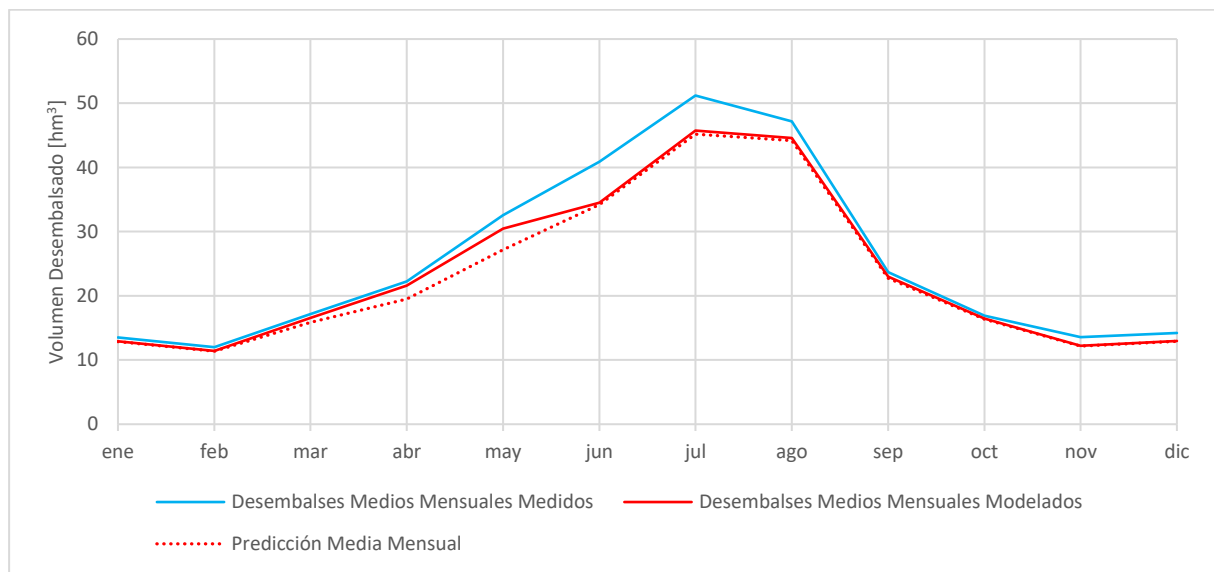


Figura 4.81. Predicción media mensual de Volúmenes Desembalsados a la cuenca del Tajo, según el mes predicho. Comparación con respecto a valores medidos y modelados.

Según los resultados promedio de la predicción, los mínimos desembalses se realizarían durante el período comprendido entre noviembre y febrero, rondando los 12 [hm³] mensuales, para luego, con una tendencia al alza, registrar los máximos valores durante julio, con desembalses cercanos a 45 [hm³].

B) Desempeño según el mes de inicio de la predicción

De forma análoga a la previa exhibición de las predicciones medias según el mes a partir del cual se desarrollan, a continuación, en las Figuras 4.82, 4.83, 4.84 y 4.85, se presentan los promedios mensuales de los errores asociados a estas predicciones. Los primeros dos gráficos muestran, respectivamente, los errores absolutos y porcentuales obtenidos con respecto a los desembalses observados, mientras que los dos gráficos siguientes exponen los errores con respecto a los desembalses modelados.

a. Capacidad predictiva del modelo con respecto a las sueltas observadas

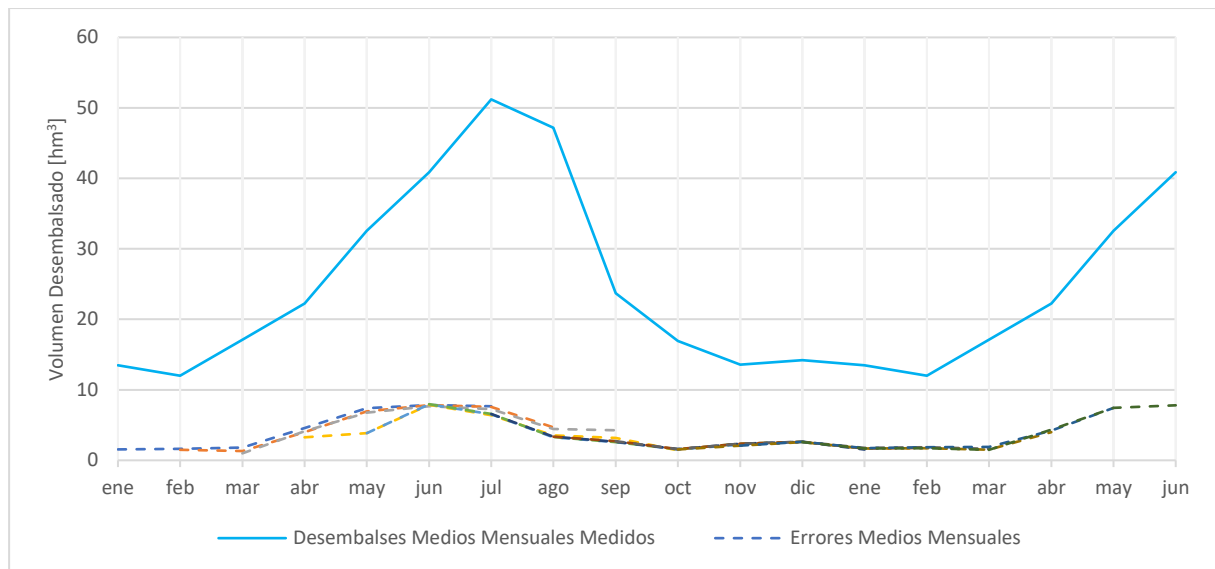


Figura 4.82. Errores medios mensuales de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.

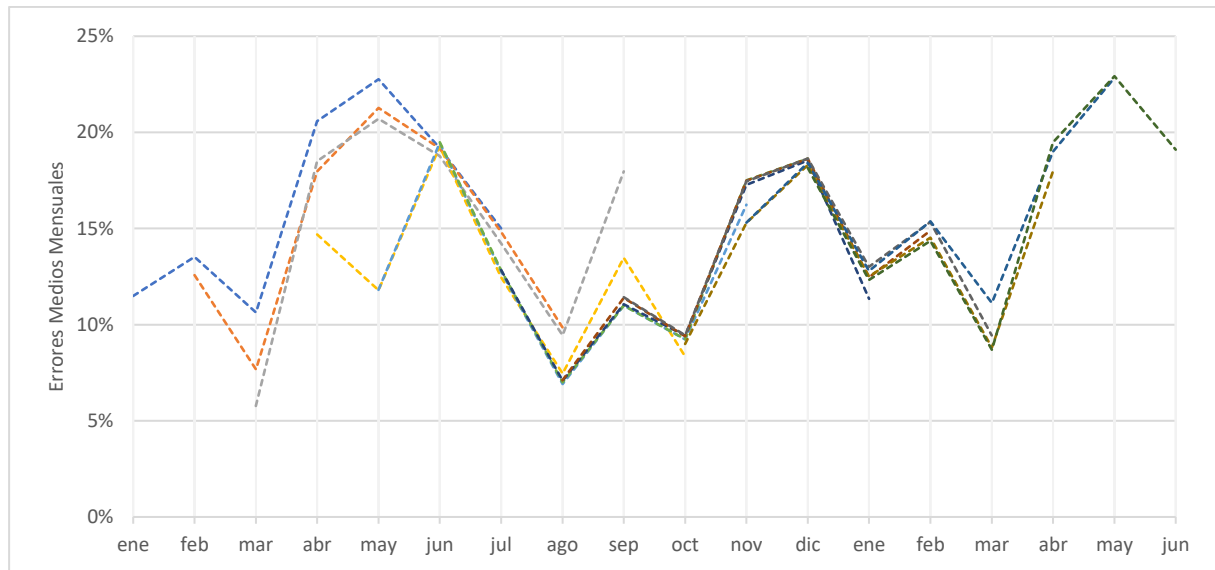


Figura 4.83. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos medidos, según el mes en el que comienza la predicción.

Según los resultados, las mejores predicciones de volúmenes desembalsados, con respecto a los desembalses medidos, son las realizadas a partir de los datos registrados durante mayo, con un error medio del 12%. También se destacan los períodos predichos entre julio y octubre y entre enero y marzo, cuyo error no pasa, prácticamente, del 15%. Por el contrario, las proyecciones realizadas a partir de los datos registrados en diciembre son las que menos se asemejan a los valores observados, obteniéndose errores medios del 16% pero con máximos del 23%.

b. Capacidad predictiva del modelo con respecto a las sueltas modeladas

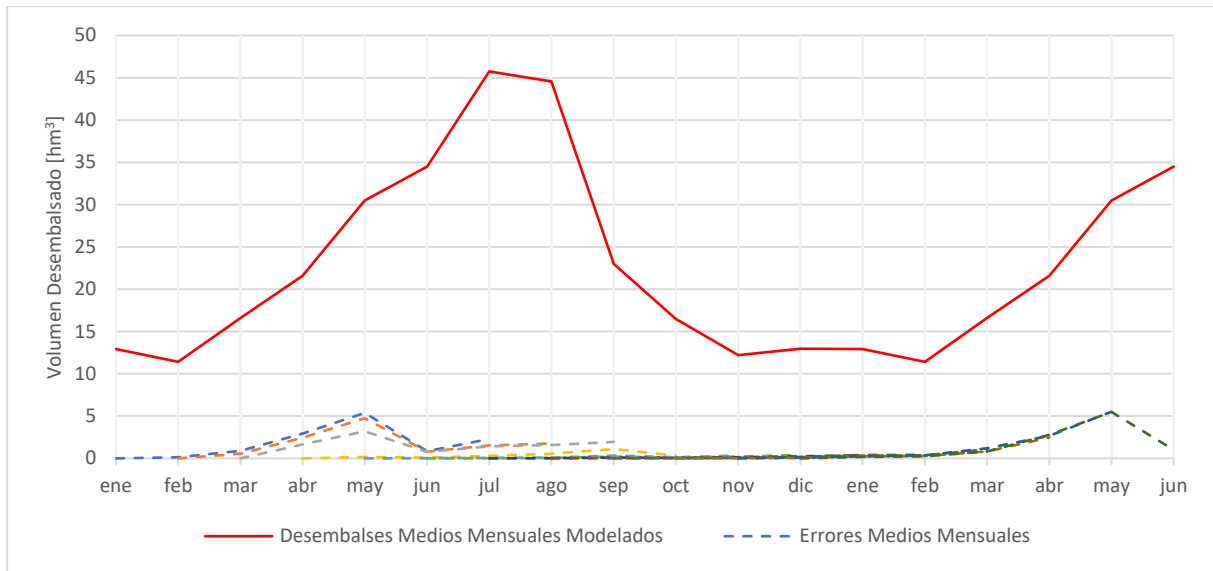


Figura 4.84. Errores medios mensuales de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos modelados, según el mes en el que comienza la predicción.

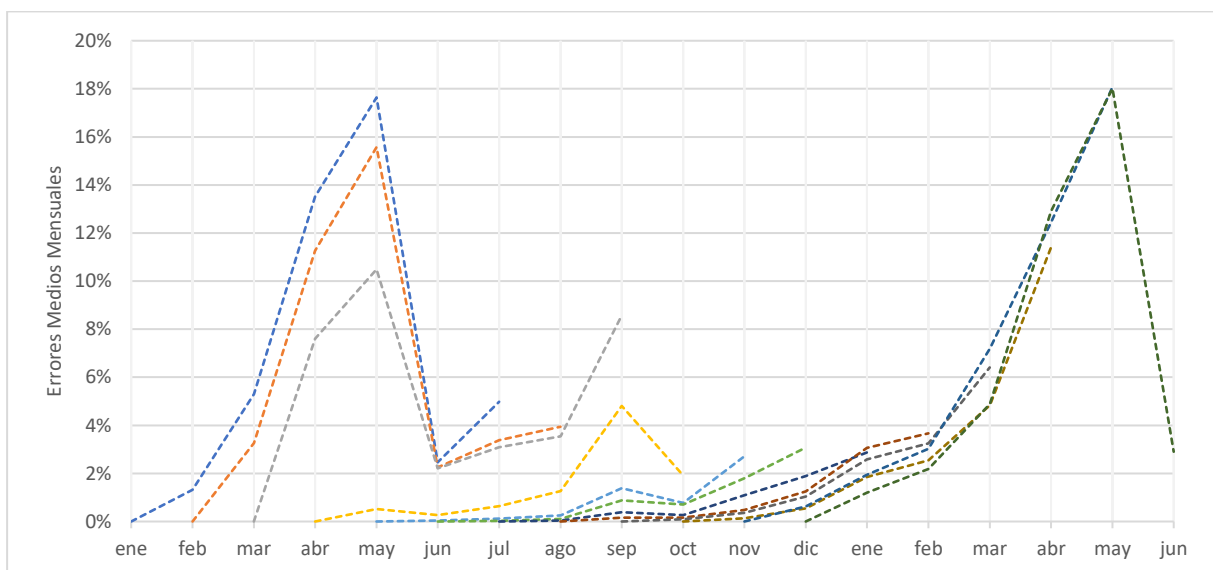


Figura 4.85. Errores medios mensuales porcentuales de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos modelados, según el mes en el que comienza la predicción.

Al comparar los resultados con respecto a los datos modelados, no solo se reducen los errores, sino que también cambia su distribución. En este caso, las mejores predicciones de volúmenes

trasvasados siguen siendo las realizadas a partir de los datos registrados durante mayo, con un error medio del 1%, mientras que las peores corresponden, en este caso, a las realizadas a partir de los datos de enero, obteniéndose errores medios del 6%.

C) *Desempeño según el mes predicho*

Promediando los errores asociados a las predicciones para cada mes del año, se generan las curvas presentadas en las Figuras 4.86 , 4.87, 4.88 y 4.89, que dan una idea de la calidad de la predicción de los volúmenes desembalsados en relación con el mes para el cual se están desarrollando. Los primeros dos gráficos muestran, respectivamente, los errores absolutos y porcentuales obtenidos con respecto a los desembalses observados, mientras que los dos gráficos siguientes exponen los errores con respecto a los desembalses modelados.

a. *Capacidad predictiva del modelo con respecto a las sueltas observadas*

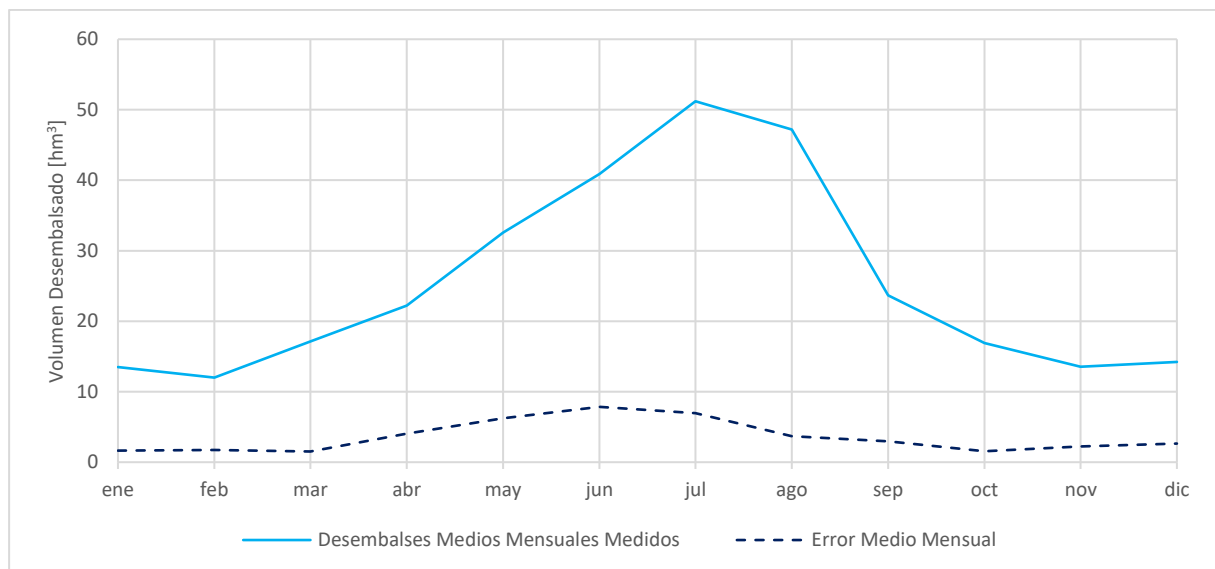


Figura 4.86. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos medidos, según el mes predicho.

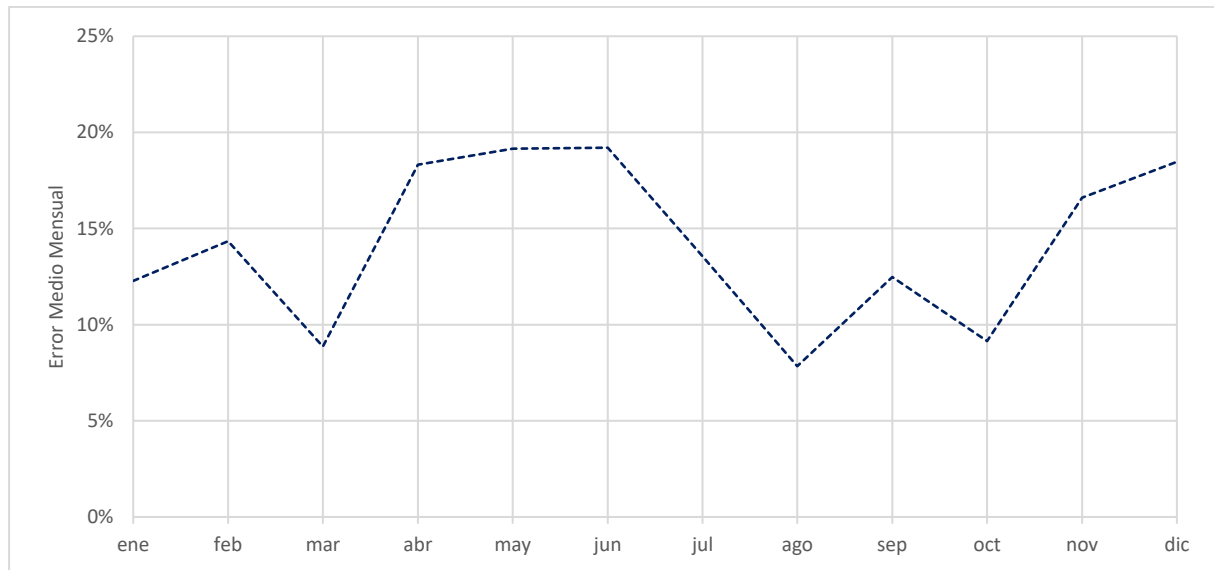


Figura 4.87. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos medidos, según el mes predicho.

Los gráficos indican que los mínimos errores, en términos absolutos, se presentan al predecir los desembalses durante el período comprendido entre octubre y marzo, cuyas predicciones presentan un error medio de aproximadamente 2 [hm³] para cada mes. Sin embargo, en términos relativos, el mes que mejor se predice es agosto, con un error medio del 8%, equivalente a 4 [hm³]. Ambos resultados son relativamente favorables y su diferencia se debe a la notable disparidad entre los desembalses medios mensuales medidos.

Por otro lado, las peores predicciones corresponden a las de los desembalses efectuados durante junio, que alcanzan errores medios de 8 [hm³], equivalentes al 19% de los desembalses medios mensuales medidos.

b. Capacidad predictiva del modelo con respecto a las sueltas modeladas

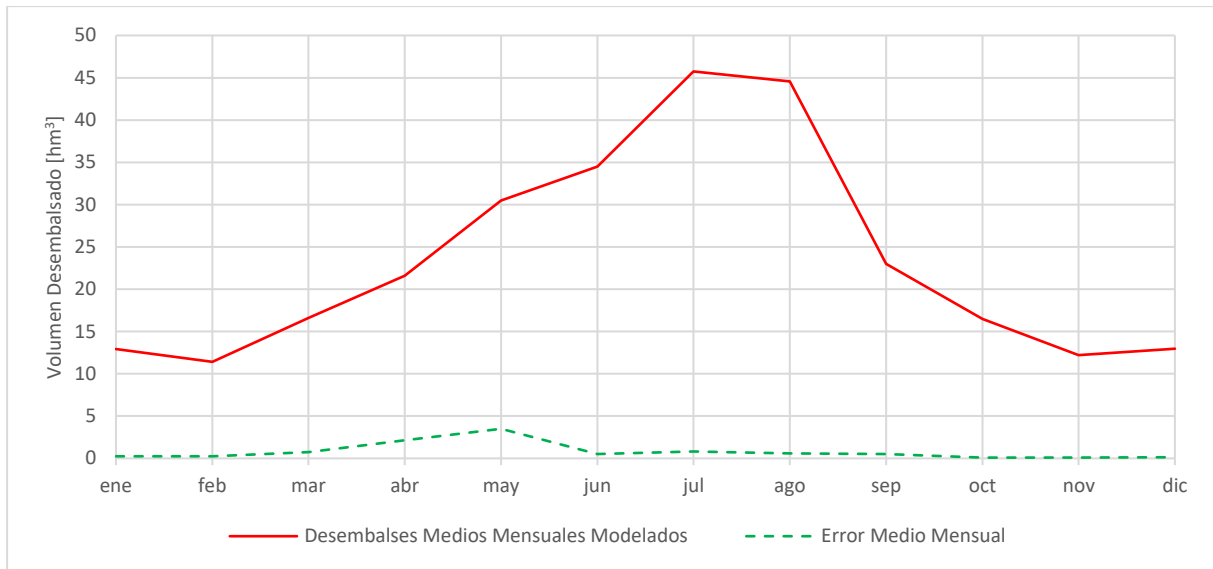


Figura 4.88. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos modelados, según el mes predicho.

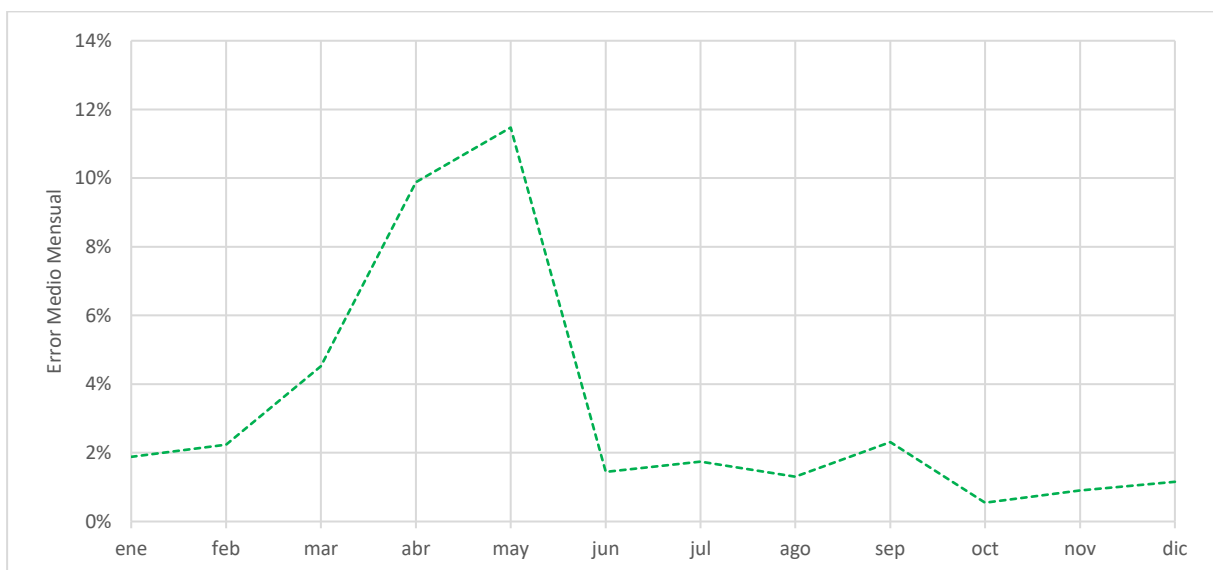


Figura 4.89. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos modelados, según el mes predicho.

Al comparar los resultados de las predicciones con respecto a los datos modelados, nuevamente, no solo se reduce la magnitud de los errores, sino que también se observan cambios en su distribución.

En este caso, los gráficos indican que los mínimos errores se presentan al predecir los desembalses modelados en el período comprendido entre junio y febrero, cuyas predicciones presentan errores porcentuales de entre el 1% y el 2%, pero que, en términos absolutos, son prácticamente nulos.

Por otro lado, las peores predicciones corresponden a las de los desembalses efectuados durante mayo, con errores medios de 3 [hm³], que equivalen al 11% de los desembalses medios mensuales modelados.

D) Desempeño según la antelación con la que se realiza la predicción

Ya que no es lo mismo predecir lo que ocurrirá durante el mes siguiente, que lo que ocurrirá en 6 meses más, se analiza, finalmente, la calidad de las predicciones en función de la antelación con la que éstas se desarrollan, es decir, qué tan certeros son los resultados luego de aumentar el horizonte de proyección.

A continuación, luego de promediar los errores obtenidos para las predicciones desarrolladas a distintos plazos de tiempo, se generan las curvas presentadas en las Figuras 4.90, 4.91, 4.92 y 4.93. Los primeros dos gráficos muestran, respectivamente, los errores absolutos y porcentuales obtenidos con respecto a los desembalses observados, mientras que los dos gráficos siguientes exponen los errores con respecto a los desembalses modelados.

a. Capacidad predictiva del modelo con respecto a las sueltas observadas

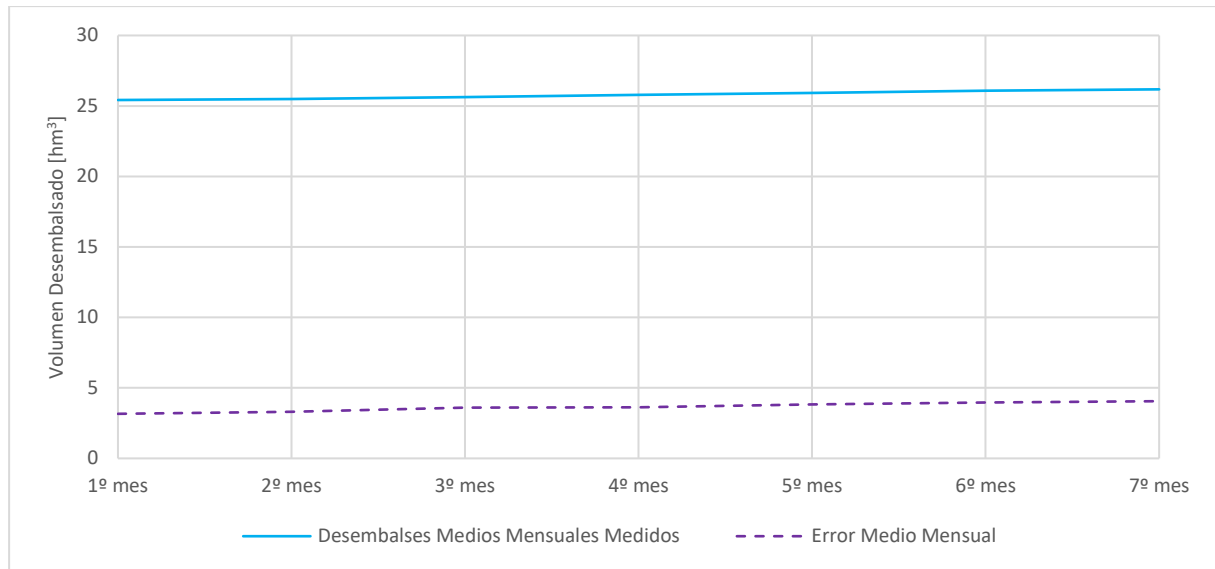


Figura 4.90. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

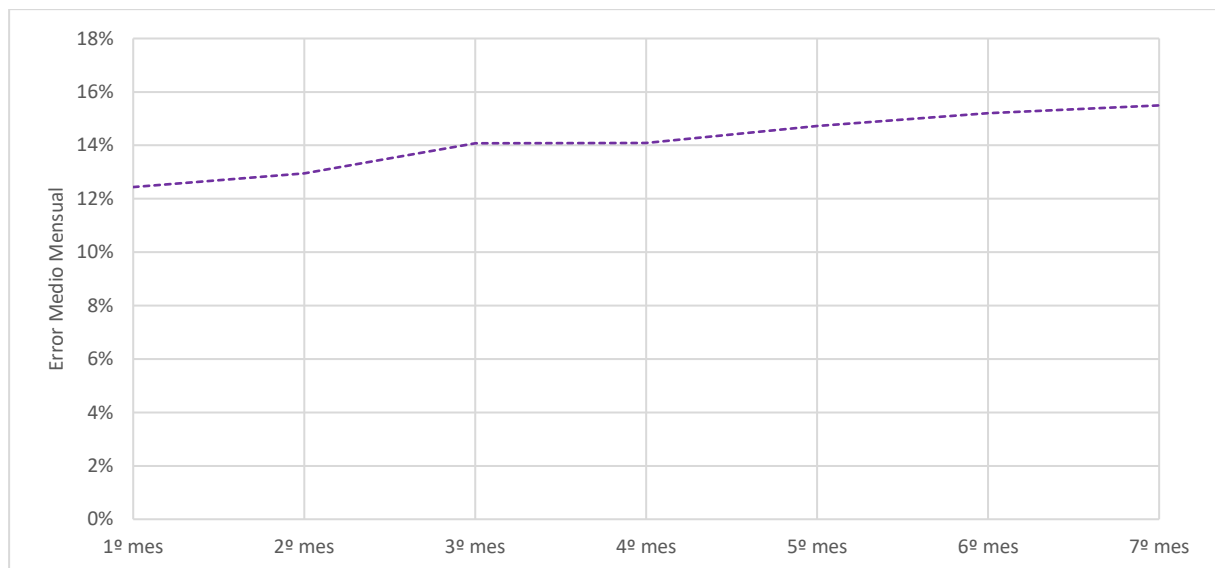


Figura 4.91. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos medidos, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

En este caso, a diferencia de lo que ocurre con las variables de entrada, el error asociado a la predicción del primer mes de volúmenes desembalsados no es nulo. Éste corresponde al

generado por las imprecisiones en la calibración del modelo de simulación, y su valor, de media, alcanza 3 [hm³], equivalentes al 12% de los desembalses medios medidos. Para las predicciones desarrolladas hacia más largo plazo, como cabe esperar, los errores van aumentando conforme crece el horizonte de predicción, aunque esto ocurre muy levemente. En el plazo de siete meses, los errores medios aumentan, de los 3 [hm³] iniciales, a 4 [hm³], o, en términos relativos, del 12% inicial a un 15% de los desembalses medios medidos.

b. Capacidad predictiva del modelo con respecto a las sueltas modeladas

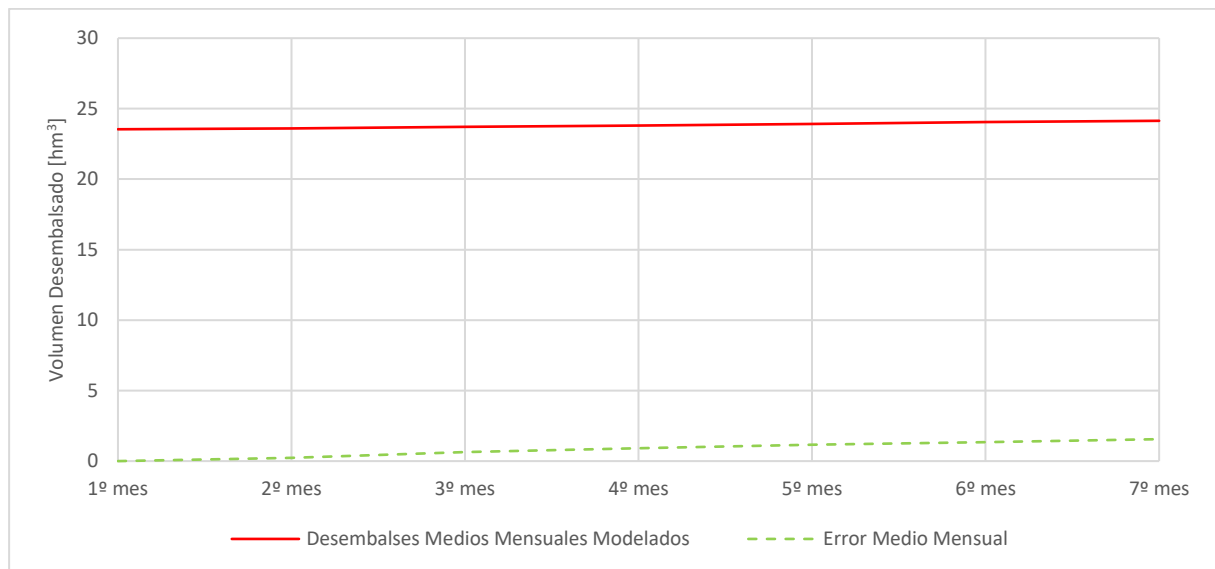


Figura 4.92. Error medio mensual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos modelados, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

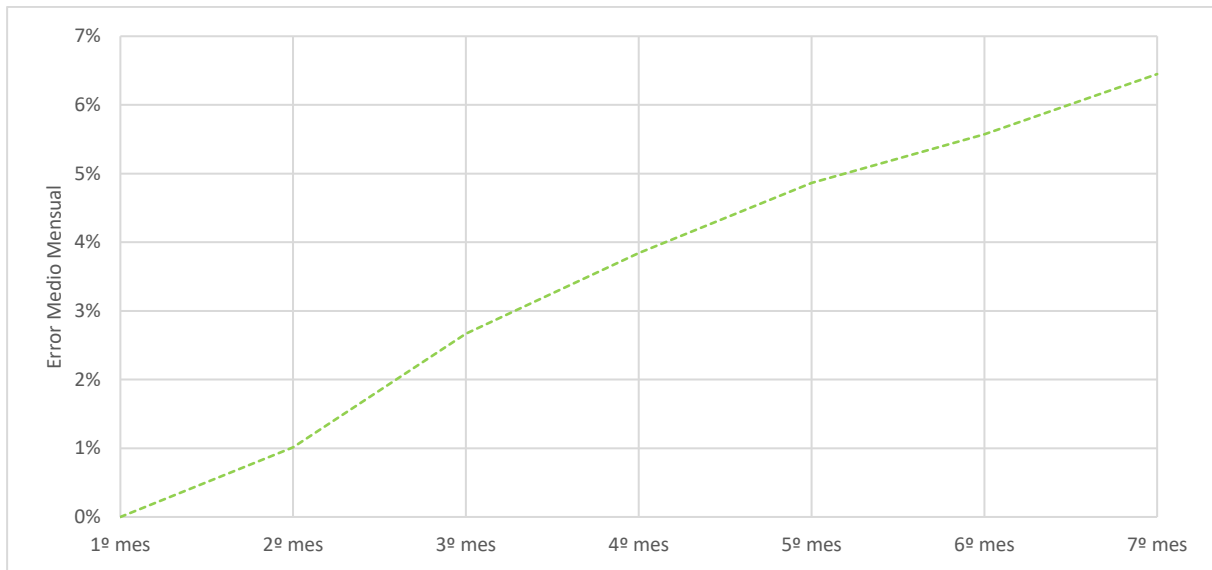


Figura 4.93. Error medio mensual porcentual de las predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo con respecto a los datos modelados, según los meses de antelación con la que se realiza la predicción.

Al comparar los resultados de las predicciones con los valores modelados y no con los valores medidos, se eliminan del análisis las implicancias que pudiesen generar las imprecisiones en la calibración del modelo de simulación, por lo cual, los errores asociados a la predicción del primer mes de volúmenes desembalsados vuelven a ser nulos. De igual forma, para las predicciones desarrolladas hacia más largo plazo, los errores van aumentando conforme crece el horizonte de predicción, alcanzando, en el plazo de siete meses, errores medios de tan solo 2 [hm³], o, lo que es lo mismo, un 6% de los desembalses medios modelados.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Luego de desarrollados los contenidos que componen este estudio, se presenta a continuación una síntesis de los principales resultados y las conclusiones recabadas. Además, considerando que éste corresponde a un trabajo de orientación investigativa, se plantean sus limitaciones y se proponen líneas de investigación que podrían ampliar su desarrollo.

5.1. Síntesis y conclusiones

En este trabajo se exponen las dificultades que los gestores de una de las obras hidráulicas de mayor relevancia para España, el Trasvase Tajo-Segura, han debido enfrentar durante los más de cuarenta años en los que el acueducto ha estado en operación. La oposición de los intereses políticos, económicos y ambientales por los que velan los representantes de las cuencas involucradas no facilita la tarea de definir mecanismos de gestión capaces de satisfacer íntegramente los usos y demandas existentes. Numerosas normativas se han esmerado en definir criterios que garanticen el uso racional y sostenible del recurso hídrico. Sin embargo, las condiciones hidrológicas desfavorables, el aumento de las demandas y la ampliación de los requerimientos ambientales han motivado la incorporación de límites cada vez más restrictivos al trasvase. A pesar de esto, la decisión de qué volumen transferir cada mes desde la cabecera del Tajo hacia la cuenca del Segura no obedece únicamente a la normativa, sino que incorpora múltiples criterios no explícitamente fijados, como pueden ser, por ejemplo, la estacionalidad o la disponibilidad hídrica de la cuenca receptora; cuya ponderación evoluciona de acuerdo con la situación particular en la que se encuentren estas variables. Esta discrecionalidad dificulta en gran medida la predictibilidad de la gestión del trasvase y obstaculiza, por lo tanto, la planificación de los productores de la región.

Para hacer frente a esta problemática, se propone la formulación de un modelo predictivo basado en técnicas de lógica difusa, la cual tiene la capacidad de definir reglas de operación a partir de la integración de distintas variables que influyen en la toma de decisiones, sean estas conocidas explícitamente o no. Además, dichas reglas tienen la ventaja de no requerir el conocimiento de los valores exactos que adquieren las variables de entrada del modelo

formulado, sino que incorporan expresiones imprecisas del lenguaje cotidiano, como “muy bajo” o “muy alto”, y entregan resultados a partir de ellas, facilitando en gran medida su uso y entendimiento por parte de los interesados.

Como resultado directo de la aplicación de las técnicas propuestas, se elaboran dos modelos lógicos difusos del tipo Takagi-Sugeno de orden cero para la simulación de sueltas históricas en función de indicadores de disponibilidad hídrica en los sistemas asociados. El primero simula los volúmenes mensuales trasvasados desde la cabecera del Tajo hacia la cuenca del Segura en función de las existencias en los embalses de Entrepeñas y Buendía (en la cabecera del Tajo), las aportaciones acumuladas en esos embalses durante los últimos 12 meses, los volúmenes almacenados en los principales embalses de la cuenca del Segura y el mes del año en el que se realiza dicho trasvase. El segundo modelo, en cambio, simula los volúmenes mensuales desembalsados hacia el río Tajo en función, también, de las existencias en Entrepeñas y Buendía, las aportaciones acumuladas en esos embalses durante los últimos 12 meses y el mes del año en el que se realiza el desembalse, pero incorpora los volúmenes almacenados en los principales embalses de la cuenca del Tajo en lugar del Segura. Ambos modelos describen las decisiones de gestión tomadas entre los años hidrológicos 2014/15-2021/22, por medio de reglas difusas contenidas en mapas asociativos con 1500 reglas lógicas cada uno, las cuales fueron formuladas mediante una modificación del método de inferencia difusa descrito por Russell y Campbell (1996).

Del proceso de formulación, calibración y validación de los modelos descritos, junto con los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El modelo de simulación de volúmenes trasvasados a la cuenca del Segura reproduce la serie histórica de trasvases con un desempeño adecuado, representado por un índice de Nash-Sutcliffe igual a 0.689. Para el período correspondiente a las últimas reglas de explotación del trasvase lo hace con un índice de Nash-Sutcliffe igual a 0.575, ligeramente inferior pero asimismo adecuado.

- Por otra parte, el modelo de simulación de volúmenes desembalsados al río Tajo reproduce la serie histórica de desembalses con un desempeño mejor, representado por un índice de Nash-Sutcliffe igual a 0.886. Para el período correspondiente a las últimas reglas de explotación del trasvase lo hace con un índice de Nash-Sutcliffe aún más alto, igual a 0.953.
- Ambos modelos difusos son capaces de reproducir sus correspondientes datos de salida de manera satisfactoria, evidenciándose la capacidad que presentan los sistemas difusos de incorporar en su formulación las relaciones lógicas que determinan las reglas de gestión del sistema hídrico; a pesar de que éstas sean, a priori, desconocidas.
- Si bien los resultados son satisfactorios, se evidencia que ambos modelos tienden a subestimar los valores pico.
- El modelo de trasvases al Segura es tremendamente sensible a la sobreestimación de las aportaciones acumuladas, mientras que es poco sensible a la variación de los valores de volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía y en los embalses principales de la cuenca del Segura.
- El modelo de desembalses al Tajo, en cambio, es sumamente insensible a las variables de entrada difusas consideradas, siendo la más influyente de ellas el volumen acumulado en los principales embalses de la cuenca del Tajo. Los resultados de este modelo se rigen principalmente por los desembalses de referencia descritos en la normativa del trasvase, por lo que su variable más influyente es, sin duda, la estacionalidad.
- El proceso de calibración-validación cruzada empleado logra homogeneizar los efectos que los cambios en las reglas producen en las decisiones de gestión, por lo que permite mejorar el desempeño general de los modelos en comparación con un proceso de calibración y validación estándar.

Como paso posterior al desarrollo de los modelos de simulación previamente indicados, éstos se integran en un modelo predictivo que permite estimar, a siete meses vista y en función de variables previamente conocidas, los volúmenes que serán trasvasados al Segura, los volúmenes que serán desembalsados al río Tajo y los volúmenes que permanecerán embalsados en Entrepeñas y Buendía. Para la ejecución de este modelo, que consiste en un cálculo consecutivo de los valores de cada mes en función de los valores del mes anterior, se incorporan métodos de predicción de aportaciones mensuales y evaporaciones descritos en las reglas de explotación del trasvase. Sin embargo, para los volúmenes almacenados en los principales embalses de las cuencas del Segura y del Tajo no se dispone en este estudio de modelos predictivos, por lo que, en estos casos, se considera directamente la utilización de los registros históricos correspondientes.

Del proceso de elaboración del modelo predictivo, junto con los resultados obtenidos, se han podido extraer las siguientes afirmaciones clave:

- El procedimiento de predicción de aportaciones mensuales, indicado en las reglas de explotación del trasvase, tiende a pronosticar valores relativamente constantes para las distintas épocas del año, además de subestimar consistentemente las crecidas.
- Si bien las aportaciones acumuladas tienden a laminar, en parte, los errores de la predicción de las aportaciones mensuales mediante la incorporación de aportaciones medidas en su formulación, se sigue observando una subestimación de sus valores, producto de las subestimaciones de las crecidas a nivel mensual.
- El modelo predictivo es capaz de predecir la tendencia de variación de los volúmenes embalsados en los embalses de Entrepeñas y Buendía, aunque subestima su magnitud exacta. Debido a la subestimación de las aportaciones, el modelo predice, en general, volúmenes embalsados más estables que los medidos.
- Las mejores predicciones de volúmenes embalsados en E+B corresponden a las desarrolladas a partir de los datos de abril a septiembre, para predecir los volúmenes

entre mayo y marzo, con errores que no superan el 15%. Las peores, por el contrario, corresponden a las desarrolladas a partir de los datos de noviembre a marzo, con errores que superan el 20%.

- Con respecto a la predicción de los volúmenes trasvasados a la cuenca del Segura, si bien esta variable ya era subestimada por el modelo de simulación de series históricas, la subestimación de las variables de entrada amplifica dicho efecto. A demás, el modelo predictivo se ajusta mejor a los volúmenes modelados para el período histórico que a los valores medidos, lo que indica que la principal incertidumbre radica en la calibración. Esto ocurre sobre todo entre septiembre y marzo, cuando el error de calibración es mayor que el de predicción. Entre abril y agosto, por el contrario, el error de la predicción hidrológica es mayor que el de la calibración.
- Las mejores predicciones de volúmenes trasvasados al Segura corresponden a las desarrolladas a partir de los datos de marzo a agosto, para predecir los trasvases entre mayo y septiembre, con errores que rondan el 30% con respecto a los valores medidos. Sin embargo, al comparar las predicciones con los valores simulados, no con los medidos, las mejores predicciones pasan a desarrollarse a partir de los datos de mayo a noviembre, para predecir los trasvases modelados de junio a diciembre, con errores que no superan el 8%. Con esto se evidencia que una parte considerable del error se debe a la calibración del modelo.
- Con respecto a la predicción de los volúmenes desembalsados al río Tajo, se observa que los valores predichos son sumamente similares a los valores modelados, aunque levemente inferiores a ellos, producto de la subestimación de las variables de entrada al modelo.
- Las mejores predicciones de volúmenes desembalsados al Tajo corresponden a las desarrolladas a partir de los datos de junio a septiembre y de diciembre a febrero, para predecir los desembalses entre julio y octubre, y entre enero y marzo, respectivamente, ya que no superan el 15% con respecto a los valores medidos. Sin

embargo, al comparar las predicciones con los valores simulados, las mejores predicciones se desarrollan a partir de los datos de mayo a enero, para predecir los desembalses modelados de junio a febrero, con errores que no superan el 4%. Si bien existe una reducción porcentual considerable entre un análisis y el otro, los errores en ambos casos se consideran bastante pequeños, por lo que se considera que la predicción de esta variable es muy exitosa. Esto se debe a que, como ya se ha mencionado, esta variable obedece principalmente al patrón de volúmenes de referencia presentados en las reglas de explotación del trasvase, y no es particularmente sensible frente a variaciones de las variables de entrada.

- Todos los resultados obtenidos representan un límite máximo de calidad del modelo predictivo, ya que en la evaluación se consideraron las series históricas de volúmenes almacenados en los principales embalses de las cuencas del Segura y del Tajo, y no modelos predictivos para su estimación.

5.2. Limitaciones y líneas de investigación futuras

Durante la elaboración de este trabajo se constataron las siguientes problemáticas que limitaron el desarrollo de la investigación:

- Los múltiples cambios producidos en la normativa de explotación del trasvase, que repercuten en modificaciones en los criterios de gestión, dificultando la correcta determinación de las reglas y su consiguiente modelación.
- Al considerarse una serie de datos de corta duración, no se incorpora en la formulación del modelo un abanico suficientemente amplio de escenarios de gestión y, por lo tanto, la gran mayoría de las reglas difusas quedan indeterminadas, debiendo ser rellenadas. Esto reduce, finalmente, la capacidad del modelo de adaptarse a nuevos escenarios. Esta limitante podría ser solventada empleando el criterio de expertos, como el de los gestores, sin embargo, no ha sido posible acceder a los mismos en la realización de este estudio.

- El desarrollo del modelo predictivo fue limitado por la deficiente calidad del modelo predictivo de aportaciones mensuales considerado. Este modelo fue escogido por ser el utilizado por las autoridades para la definición de las autorizaciones de trasvase en situaciones hidrológicas excepcionales.
- La falta de modelos de predicción de volúmenes almacenados en los principales embalses de las cuencas del Segura y del Tajo dificultó la real estimación de la calidad de las predicciones del modelo desarrollado, además de mermar su utilidad práctica de predicción en tiempo real.

A modo de superación de las dificultades presentadas, además de posibilidades de ampliar o profundizar los objetivos del presente estudio, se proponen las siguientes líneas de investigación futuras:

- Incorporar la experiencia de expertos, mediante encuestas focalizadas o talleres, en las reglas difusas que incorporan los criterios de gestión en el modelo. De esta manera se podría mejorar el modelo difuso en cuanto a su desempeño en la reproducción de los trasvases.
- Recalibrar periódicamente el modelo desarrollado, incluyendo nuevos datos que representen la aplicación actual de las reglas de gestión. De esta manera el modelo iría incorporando nuevos escenarios de gestión.
- Desarrollar una optimización de los criterios de gestión mediante algún algoritmo de optimización, para luego incorporar estos resultados en el modelo de lógica difusa. De esta manera sería posible presentar a los operadores los criterios optimizados de forma simple y concreta, en términos de sentencias lógicas difusas.
- Un estudio más refinado de la calidad del modelo de predicción se podría realizar incorporando mejores modelos predictivos de las variables de entrada,

específicamente de aportaciones. De esta manera los errores se reducirían a los de la propia modelación desarrollada, con menor interferencia de variables externas.

- Se podría desarrollar, mediante modelación estocástica o mediante modelación de sistemas de recursos hídricos combinado con predicciones hidrológicas, un modelo predictivo de los volúmenes embalsados en los principales embalses de las cuencas del Segura y del Tajo, para lograr el desarrollo completo del modelo de predicciones del trasvase. De esta forma se podría dar paso a su aplicación en tiempo real.

6. REFERENCIAS

- Ahmadianfar, I., Adib, A., & Taghian, M. (2017). Optimization of multi-reservoir operation with a new hedging rule: application of fuzzy set theory and NSGA-II. *Applied Water Science, Volume 7*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-016-0434-z>
- Amat Rodrigo, J. (2016). *Validación de modelos predictivos: Cross-validation, OneLeaveOut, Bootstrapping*. Obtenido de https://www.cienciadedatos.net/documentos/30_cross-validation_oneleaveout_bootstrap
- Campbell, P. F. (1993). *Applications of Fuzzy Set Theory in reservoir operations*. Technical University of Nova Scotia, Department of Civil Engineering. Obtenido de <https://open.library.ubc.ca/media/stream/pdf/831/1.0050434/1>
- Cavallo, A., Di Nardo, A., Di Maria, G., & Di Natale, M. (2013). Automated fuzzy decision and control system for reservoir management. *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua, Volume 62*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/245542881_Automated_Fuzzy_Decision_and_Control_System_for_Reservoir_Management
- CEDEX. (2017-2022). *Informe de situación ATS*. Obtenido de <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/Trasvase-Tajo-Segura/>
- CEDEX. (2020). *Nota técnica sobre la propuesta de actualización parcial de la regla de explotación del Trasvase Tajo-Segura*. Obtenido de <https://www.senado.es/web/expedientappendixblobservelet?legis=14&id1=52567&id2=1>
- CEDEX. (2022). *Anuario de Aforos 2018-2019*. Obtenido de <https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/afo/embalse-nombre.asp>
- Confederación Hidrográfica del Segura. (2019-2022). *Consulta de series de embalses*. Obtenido de <https://www.chsegura.es/es/cuenca/redes-de-control/estadisticas-hidrologicas/visor-de-embalses/>
- Confederación Hidrográfica del Segura. (2022). *Parte Global de Trasvase*. Obtenido de <https://www.chsegura.es/es/cuenca/redes-de-control/estadisticas-hidrologicas/parte-diario/index.html>

- Confederación Hidrográfica del Segura. (s. f.). *Descripción de la Infraestructura del Trasvase Tajo-Segura*. Obtenido de <https://www.chsegura.es/es/cuenca/infraestructuras/postrasvase-tajo-segura/infraestructura/trasvase/>
- Confederación Hidrográfica del Tajo. (1999). Plan Hidrológico del Tajo. Obtenido de <https://www.boe.es/boe/dias/1999/08/30/pdfs/A31958-31994.pdf>
- Confederación Hidrográfica del Tajo. (2022). *Sistema Automático de Información Hidrológica. SAIH Tajo*. Obtenido de <http://saihtajo.chtajo.es/index.php>
- de Lucas Sepúlveda, A. (2019). *Concepto, análisis histórico y determinación de excedentes de la cuenca del Tajo: aplicación al trasvase Tajo-Segura*. Universidad de Alcalá. Obtenido de https://www.fundacionaquae.org/wp-content/uploads/2021/03/doc4-als_tesiscahdet_abril2019.pdf
- Dubrovin, T., Jolma, A., & Turunen, E. (2002). Fuzzy Model for Real-Time Reservoir Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management, Volume 128*. Obtenido de <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/%28ASCE%290733-9496%282002%29128%3A1%2866%29>
- Fontane, D. G., Gates, T. K., & Moncada, E. (1997). Planning reservoir operations with imprecise objectives. *Journal of Water Resources Planning and Management, Volume 123*. Obtenido de <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/%28ASCE%290733-9496%281997%29123%3A3%28154%29>
- Gallego Bernard, M., & Sánchez Pérez, M. (2006). *La destrucción ambiental del río Tajo: orígenes, porcesos y consecuencias*. V Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua. Obtenido de http://www.justiciambiental.es/home.php/trabajos/La_destruccion_ambiental_del_rioTajo.pdf
- Ley 21/1971, de 19 de junio, sobre el aprovechamiento conjunto Tajo-Segura. (22 de junio de 1971). Boletín Oficial del Estado número 148, España. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/l/1971/06/19/21>
- Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. (11 de diciembre de 2013). Boletín Oficial del Estado número 296, España. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/l/2013/12/09/21/con>
- Ley 52/1980, de 16 de octubre, de Regulación del Régimen Económico de la explotación del acueducto Tajo-Segura. (24 de octubre de 1980). Boletín Oficial del Estado número 256, España. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/l/1980/10/16/52>

- Lorenzo Pardo, M. (1933). *Plan Nacional de Obras Hidráulicas*. Ministerio de Obras Públicas. Centro de Estudios Hidrográficos. Obtenido de http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CEH/Documentos_Descargas/PNOH_1933.htm
- Macián Sorribes, H. (2012). *Utilización de lógica difusa en la gestión de embalses. Aplicación a los ríos Sorbe, Esla y Mijares*. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Obtenido de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27861/2_TFM.pdf?sequence=1
- Mamdani, E. H. (1974). *Application of fuzzy algorithm for control of simple dynamic plant*. Obtenido de <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/piee.1974.0328>
- Martín Mendiluce, J., & Pliego Gutiérrez, J. (1967). *Anteproyecto general de aprovechamiento conjunto de los recursos hidráulicos del centro y sureste de España. Complejo Tajo-Segura*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Obras Hidráulicas. Obtenido de http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/03AEB7E3-7D1E-48AD-8207-595752C1CDD4/130037/TTS_TOMOI_MEMORIA.pdf
- MITECO. (2022). *Boletín Hidrológico Semanal*. Obtenido de <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/boletin-hidrologico/default.aspx>
- Morales Gil, A., Rico Amorós, A., & Hernández Hernández, M. (2005). *El trasvase Tajo-Segura*. Universidad de Alicante, Departamento de Análisis Geográfico Regional. Observatorio Medioambiental. Obtenido de <https://revistas.ucm.es/index.php/OBMD/article/view/OBMD0505110073A>
- Morote Seguido, Á. F., Olcina Cantos, J., & Rico Amorós, A. M. (2017). Un trasvase cuestionado: El Tajo-Segura. Repercusiones socio-económicas en el sureste español e incertidumbre ante el cambio climático. *Revista de Estudios Regionales*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6920009>
- Nourzad, S. H., Ghodsi, R., & Kashef, M. (2009). Management of Reservoir Operation by Fuzzy Logic Decision Making. *Collaboration and Integration in Engineering, Management and Technology*, 5. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/270897242_Management_of_Reservoir_Operation_by_Fuzzy_Logic_Design_Making
- Panigrahi, D. P., & Mujumdar, P. P. (2000). Reservoir Operation Modelling with Fuzzy Logic. *Water Resources Management, Volume 14*. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008170632582>

- Payán Villarrubia, F. (2018). *Diseño de una nueva regla de explotación hiperanual para los embalses de cabecera del Tajo*. Universidad de Zaragoza. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/76196?ln=es#>
- Rajendra, S. R., Kanade, G. N., & Patil, A. B. (2020). Analysis of use of Fuzzy Logic in real time reservoir operation management. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, Volume 2*. Obtenido de https://www.irjmets.com/uploadedfiles/paper/volume2/issue_10_october_2020/4411/1628083172.pdf
- Ramani Bai, V., & Rom Tamjis, M. (2007). Fuzzy Logic Model on Operation and Control of Hydro-Power Dams in Malaysia. *The International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, 4*. Obtenido de <https://www.techscience.com/icces/v4n1/32227>
- Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de cuenca. (11 de agosto de 1998). Boletín Oficial del Estado número 191, España. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/1998/07/24/1664>
- Real Decreto 1982/1978, de 26 de julio, sobre la organización de los servicios encargados de gestionar la explotación de la infraestructura hidráulica «Trasvase Tajo-Segura». (22 de agosto de 1978). Boletín Oficial del Estado número 200, España. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/1978/07/26/1982>
- Real Decreto 2530/1985, de 27 de diciembre, sobre régimen de explotación y distribución de funciones en la gestión técnica y económica del acueducto Tajo-Segura. (3 de enero de 1986). Boletín Oficial del Estado número 3, España. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/1985/12/27/2530>
- Real Decreto 638/2021, de 27 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 773/2014, de 12 de septiembre, por el que se aprueban diversas normas reguladoras del trasvase por el acueducto Tajo-Segura. (28 de julio de 2021). Boletín Oficial del Estado número 179, España. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/07/27/638>
- Real Decreto 773/2014, de 12 de septiembre, por el que se aprueban diversas normas reguladoras del trasvase por el acueducto Tajo-Segura. (13 de septiembre de 2014). Boletín Oficial del Estado número 223, España. Obtenido de <https://www.boe.es/eli/es/rd/2014/09/12/773>
- Russell, S. O., & Campbell, P. F. (1996). Reservoir operating rules with Fuzzy Programming. *Journal of Water Resources Planning and Management, Volume 122*. Obtenido de <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/%28ASCE%290733-9496%281996%29122%3A3%28165%29>

- Shrestha, B. P., Duckstein, L., & Stakhiv, E. Z. (1996). Fuzzy Rule-Based Modeling of Reservoir Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management, Volume 122*.
Obtenido de <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/%28ASCE%290733-9496%281996%29122%3A4%28262%29>
- Simonovic, S. P. (2009). *Managing water resources: Methods and tools for a systems approach*. UNESCO Publishing. Obtenido de <https://www.vodoprivreda.net/wp-content/uploads/2014/08/managing.pdf>
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Volume 15*. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6313399>
- Tilmant, A., Faouzi, E. H., & Vanclooster, M. (2001). Optimal operation of multipurpose reservoirs using flexible stochastic dynamic programming. *Applied Soft Computing, Volume 2 (2002)*. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494602000297?casa_token=4mFgN3pY4tcAAAAA:8-GROI58-gfSYqwMJPmu1VtOgi0ljrM75ciAhNeaUSA_v9KXve_c7aA8CfkS43yxjBh3Hf52CA
- Villarroya Gil, F. (2006). Los conflictos sobre el trasvase del Ebro y del Tajo. *M+A. Revista Electrónica de Medioambiente*. Obtenido de <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-41377/2006%202%20villarroya.pdf>
- Zadeh, L. (1965). *Fuzzy Sets*. University of California, Berkley, Department of Electrical Engineering and Electronics Research Laboratory. Information and Control. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X>