



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Estimación de la incertidumbre hidrológica en modelo
hidrológico en la cuenca del Júcar

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Vélez Gallego, Isabel

Tutor/a: Francés García, Félix Ramón

Director/a Experimental: ECHEVERRIA MARTINEZ, CARLOS ANTONIO

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Trabajo Fin de Máster

Estimación de la incertidumbre hidrológica en modelo hidrológico en la cuenca del Júcar.

Intensificación: ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

ISABEL VÉLEZ GALLEGO

Tutor:

Dr. FÉLIX FRANCÉS GARCÍA

Director experimental:

Carlos Antonio Echeverría Martínez

Septiembre, 2023.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Agradecimientos

A mis padres, por ser mi apoyo incondicional en este proceso, sin ellos esto no sería posible. Gracias por confiar en mí.

A mi tutor Félix Francés García y cotutor Carlos Echeverría por su colaboración, consejos, ayuda y experiencia prestada en todo este proceso de formación.

A Camilo por ser mi compañero de esta y otras tantas otras aventuras, gracias por ser mi persona.

A mis amigos del Master, que hicieron mi estancia en España más amena, acogedora y alegre, sin mencionar las tantas veces que me ayudaron en este proyecto.

A Tatis, Lau, Fede y Maps que me dieron tanto apoyo y alegrías mientras recorría este camino.

Al Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental GIMHA por su colaboración en todo este proyecto.

Resumen del trabajo de fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Estimación de la incertidumbre hidrológica en modelo hidrológico en la cuenca del Júcar.

Título del TFM en inglés: Estimation of hydrological uncertainty in a hydrological model in the Júcar basin.

Título del TFM en Valenciano: Estimació de la incertesa hidrològica en model hidrològic en la conca del Xúquer

Alumno: Isabel Vélez Gallego

Tutor: Félix Francés García

Director experimental: Carlos Antonio Echeverría Martínez.

Fecha de Lectura: Septiembre, 2023

Resumen

En español:

Tanto los modelos como los pronósticos hidrológicos se han convertido en una herramienta clave en la planificación, gestión, prevención de desastre y toma de decisiones temprana en una cuenca. Aun así, cada uno de estos contiene un grado de incertidumbre, debido a la variabilidad de las variables hidrológicas, desde errores en la toma de medidas, el planteamiento conceptual, las condiciones iniciales o la estimación de parámetros, entre otros. Es por esto que para el adecuado uso de estas herramientas es importante cuantificar la incertidumbre asociada a sus pronósticos.

Esta investigación propone evaluar el desempeño de un modelo hidrológico implementado en TETIS para la cuenca del Júcar bajo los pronósticos subestacionales generados por el proyecto S2S del modelo ECMWF y dar una medida de la incertidumbre hidrológica de estos. Los pronósticos meteorológicos del S2S son por conjuntos, cada uno de ellos con 51 miembros, obteniendo no solo información del escenario más probable para cada evento, sino que posibilitando estudiar la incertidumbre asociada de manera cuantitativa. Haciendo uso de esta propiedad y con ayuda de herramientas estadísticas se puede comparar el comportamiento del conjunto de los caudales pronosticado con información meteorológica del S2S, frente los caudales observados, e identificar así las tendencias de las predicciones hidrológicas y su capacidad de pronóstico. Algunas de las herramientas estadísticas que se implementan son el uso de diagramas de cajas para ver el comportamiento de los diferentes miembros del conjunto, así como la evaluación del grado de acierto de las predicciones (skill) usando el indicador de Puntuación de probabilidad clasificada continua (CRPS).

Para el desarrollo del modelo en la cuenca de estudio se emplean diversas fuentes de información, como datos de entrada de precipitación y temperatura del proyecto ERA5 del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo Medio (ECMWM), datos de caudal observado e información de embalses de la Red Integrada de Estaciones de Aforos (SAIH-ROEA) y el anuario de aforos del CEDEX respectivamente. Para los mapas de

parámetros del modelo se parte de diferentes fuentes como la base de datos del 3D Soil Hydraulic, mapas del proyecto GLHYMPS y del Instituto Geográfico Nacional.

La calibración del modelo hidrológico se propone en la estación Pajaroncillo, debido a que su cuenca es la menos intervenida y los caudales observados se acercan más a los naturales generados por TETIS, mientras se realiza la validación espacial, y espacio-temporal en otras estaciones de la cuenca. Aun así se propone la calibración del parámetro de percolación profunda para cada embalse, considerando que las pérdidas pueden variar significativamente de un embalse a otro.

En valenciano:

Tant els models com els pronòstics hidrològics s'han convertit en una eina clau en la planificació, gestió, prevenció de desastres i presa de decisions primerenca en una conca. No obstant això, cadascun d'aquests conté un grau d'incertesa, a causa de la variabilitat de les variables hidrològiques, des d'errors en la presa de mesures, el plantejament conceptual, les condicions inicials o l'estimació de paràmetres, entre altres. És per això que per a l'adequat ús d'aquestes eines és important quantificar la incertesa associada als seus pronòstics.

Aquesta investigació proposa avaluar l'acompliment d'un model hidrològic implementat en TETIS per a la conca del Xúquer sota els pronòstics subestacionals generats pel projecte S2S del model ECMWF i donar una mesura de la incertesa hidrològica d'aquests. Els pronòstics meteorològics del S2S són per conjunts, cadascun d'ells amb 51 membres, obtenint no sols informació de l'escenari més probable per a cada esdeveniment, sinó que possibilitant estudiar la incertesa associada de manera quantitativa. Mitjançant l'ús d'aquesta propietat i amb l'ajuda d'eines estadístiques es pot comparar el comportament del conjunt dels cabals pronosticat amb informació meteorològica del S2S, front els cabals observats, i identificar així les tendències de les prediccions hidrològiques i la seua capacitat de pronòstic. Algunes de les eines estadístiques que s'utilitzen són l'ús de diagrames de caixes per a veure el comportament dels diferents membres del conjunt, així com l'avaluació del grau d'encert de les prediccions (skill) usant l'indicador de Puntuació de probabilitat classificada contínua (CRPS).

Per al desenvolupament del model en la conca d'estudi s'empren diverses fonts d'informació, com a dades d'entrada de precipitació i temperatura del projecte ERA5 del Centre Europeu de Previsions Meteorològiques a mitjà termini Mitjà (ECMWM), dades de cabal observat i informació d'embassaments de la Xarxa Integrada d'Estacions d'Aforaments (SAIH-ROEA) i l'anuari d'aforaments del CEDEX respectivament. Per als mapes de paràmetres del model, es prenen com a base les diferents fonts com la base de dades del 3D Soil Hydraulic, mapes del projecte GLHYMPS i de l'Institut Geogràfic Nacional.

La calibració del model hidrològic es planteja a l'estació Pajaroncillo, ja que la seua conca és la menys intervenida i els cabals observats s'acosten més als naturals generats per TETIS, mentre es realitza la validació espacial i espaciotemporal en altres estacions de la conca. No obstant això, es planteja la calibració del paràmetre de percolació profunda per a cada embassament, considerant que les pèrdues poden variar significativament d'un embassament a un altre.

En inglés:

Both hydrological models and forecasts have become key tools in planning, management, disaster prevention, and early decision-making in a basin. However, each of these contains a degree of uncertainty due to the variability of hydrological variables, ranging from errors in measurements, conceptual approaches, initial conditions, or parameter estimation, among others. Therefore, for the proper utilization of these tools, quantifying the associated uncertainty with their forecasts is important.

This research proposes to assess the performance of a hydrological model implemented in TETIS for the Júcar basin under the subseasonal forecasts generated by the S2S project of the ECMWF model and to provide a measure of its hydrological uncertainty. The S2S weather forecasts are organized in groups, each consisting of 51 members. This not only provides information about the most probable scenario for each event but also allows for a quantitative analysis of the associated uncertainty. Utilizing this feature and employing statistical tools, it becomes possible to compare the behavior of the predicted set of flows with meteorological information from the S2S forecasts against observed flows. This helps identify trends in hydrological predictions and their forecasting capability. Some of the statistical tools employed include the use of box plots to observe the behavior of different members of the set, as well as the assessment of prediction accuracy (skill) using the Continuous Ranked Probability Score indicator (CRPS).

In developing the model for the study basin, various sources of information are utilized, including precipitation and temperature input data from the ERA5 project of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), observed flow data, and information from reservoirs in the Integrated Network of Gauging Stations (SAIH-ROEA) and the CEDEX gauging yearbook, respectively. For the model's parameter maps, diverse sources are drawn upon, such as the 3D Soil Hydraulic database, maps from the GLHYMPS project, and the National Geographic Institute.

The calibration of the hydrological model is proposed at the Pajaroncillo station due to its less intervened basin and the observed flows aligning more closely with the natural flows generated by TETIS. Meanwhile, spatial and spatiotemporal validation is carried out at other stations within the basin. Nonetheless, calibration of the deep percolation parameter is suggested for each reservoir, considering that losses can vary significantly from one reservoir to another.

Palabras clave español: Incertidumbre, modelo hidrológico, TETIS, Júcar.

Palabras clave valenciano: Incertesa, model hidrològic, TETIS, Xúquer.

Palabras clave inglés: Uncertainty, hydrological model, TETIS, Júcar.

Contenido

1	MARCO DE REFERENCIA	13
1.1	INTRODUCCIÓN	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.3	PREDICCIÓN.....	14
1.4	INCERTIDUMBRE PREDICTIVA	15
2	METODOLOGÍA	17
2.1	CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO JÚCAR.	17
2.2	Pronósticos Históricos de Precipitación y Temperatura (ECMWF)	19
2.3	MODELO HIDROLÓGICO: TETIS	20
2.3.1	Mapas de Parámetros	21
2.3.2	Factores Correctores.....	26
2.3.3	Calibración y Validación del Modelo TETIS.....	27
2.3.4	Variables Input	29
2.4	MEDIDA DE LA INCERTIDUMBRE HIDROLÓGICA.....	35
2.4.1	Corrección del Sesgo.....	35
2.4.2	Medidas de Desempeño y Estadísticos.....	37
2.4.3	Evaluación de Calidad de los Pronósticos Hidrológicos en el Júcar	38
2.4.4	Análisis Sensibilidad de la Agregación Temporal.	39
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
3.1	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE TETIS	41
3.1.1	Período de calibración en Pajaroncillo.	42
3.1.2	Validación temporal en Pajaroncillo.....	42
3.1.3	Validación espacial en estaciones de aforo de la CHJ.	43
3.1.4	Validación espacio-temporal en estaciones de aforo de la CHJ.	47
3.1.5	Calibración Flujo Subterráneo Profundo (FC7) En Los Embalses del Júcar. ...	52
3.1.6	Validación flujo subterráneo profundo (FC7) en los embalses del Júcar.....	57
3.2	ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE HIDROLÓGICA.....	62
3.2.1	Pajaroncillo	63
3.2.2	Alarcón.....	66
3.2.3	Bellús.....	69
3.2.4	Contreras.....	72
3.2.5	Forata.....	75
3.2.6	Tous.....	78

3.2.7	Huerto Mulet (Desembocadura)	82
3.3	ANÁLISIS SENSIBILIDAD DE LA AGREGACION TEMPORAL	85
3.3.1	Pajaroncillo	85
3.3.2	Contreras	89
3.3.3	Huerto Mulet (Desembocadura)	92
4	CONCLUSIONES.....	95
	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	97
	ANEXO	101

Lista de figuras

Figura 1. Fundamento principal para la estimación de la incertidumbre predictiva. Fuente: - Francés (2018) adaptado de -Todini (2008b).	16
Figura 2. Red hidrográfica del Río Júcar con estaciones de medición de aforo y salidas de embalses.....	17
Figura 3. Modelo de elevación digital de la cuenca del Júcar.	18
Figura 4. Curva Hipsométrica cuenca del Júcar.....	18
Figura 5. Esquema conceptual del modelo de producción de escorrentía en TETIS. Fuente: adaptado de GIMHA (2014)	20
Figura 6. Mapas derivados del MDE de la cuenca del Júcar.....	22
Figura 7. Mapas de parámetros hidrológicos.	24
Figura 8. Mapa de coberturas de CORINE Land Cover 2018 asociado con el ID de TETIS.	25
Figura 9. Ubicación datos de precipitación y temperatura extraídos del ERA5.	30
Figura 10. Precipitación media anual 2014-2019 extraído del ERA5.	30
Figura 11. Temperatura media anual 2014-2019 extraído del ERA5.	32
Figura 12. Ubicación estaciones de aforo (SAIH-ROEA) y cuenca Pajaroncillo.	32
Figura 13. Ubicación embalses utilizados en la modelación con sus coordenadas en salida del embalse.....	34
Figura 14. Flujo de postprocesamiento estadístico para la predicción por conjuntos hidrometeorológicos. Fuente: Li et al. (2017).....	36
Figura 15. Ubicación datos pronosticados de precipitación y evapotranspiración procesados del modelo ECMWF del proyecto S2S.	37
Figura 16. Hidrograma de caudales observados y simulados en Pajaroncillo para el periodo de calibración.	42
Figura 17. Hidrograma de caudales observados y simulados en Pajaroncillo para el periodo de validación	43
Figura 18. Hidrograma de caudales observados y simulados en Alcalá del Júcar para el periodo de calibración.	44
Figura 19. Hidrograma de caudales observados y simulados en Belmontejo para el periodo de calibración.	44
Figura 20. Hidrograma de caudales observados y simulados en El Castellar para el periodo de calibración.	45
Figura 21. Hidrograma de caudales observados y simulados en Huerce mes para el periodo de calibración.	45
Figura 22. Hidrograma de caudales observados y simulados en Villora para el periodo de calibración.	46
Figura 23. Hidrograma de caudales observados y simulados en Requena - Forata para el periodo de calibración.	46
Figura 24. Hidrograma de caudales observados y simulados en Huerto Mulet para el periodo de calibración.	47
Figura 25. Hidrograma de caudales observados y simulados en Alcalá del Júcar para el periodo de validación	48
Figura 26. Hidrograma de caudales observados y simulados en Belmontejo para el periodo de validación.	48

Figura 27. Hidrograma de caudales observados y simulados en El Castellar para el periodo de validación.	49
Figura 28. Hidrograma de caudales observados y simulados en Huerce mes para el periodo de validación.	49
Figura 29. Hidrograma de caudales observados y simulados en Villora para el periodo de validación.	50
Figura 30. Hidrograma de caudales observados y simulados en Requena para el periodo de validación.	50
Figura 31 Hidrograma de caudales observados y simulados en Huerto Mulet para el periodo de validación.	51
Figura 32. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Alarcón en calibración del FC7.	52
Figura 33. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Bellús en calibración del FC7.	53
Figura 34. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Contreras en calibración del FC7.	53
Figura 35. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Cortes en calibración del FC7.	54
Figura 36. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Escalona en calibración del FC7.	54
Figura 37. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Forata en calibración del FC7.	55
Figura 38. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse La Toba en calibración del FC7.	55
Figura 39. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Tous en calibración del FC7.	56
Figura 40. Hidrograma de caudales observados y simulados en estación Huerto Mulet (Desembocadura) en calibración del FC7.	57
Figura 41. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Alarcón en validación del FC7.	57
Figura 42. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Bellus en validación del FC7.	58
Figura 43. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Contreras en validación del FC7.	58
Figura 44. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Cortes en validación del FC7.	59
Figura 45. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Escalona en validación del FC7.	59
Figura 46. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Forata en validación del FC7.	60
Figura 47. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Toba en validación del FC7.	60
Figura 48. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Tous en validación del FC7.	61
Figura 49. Hidrograma de caudales observados y simulados en estación Huerto Mulet (Desembocadura) en validación del FC7.	61

Figura 50. Predicciones de caudal en la estación Pajaroncillo para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.....	63
Figura 51. Comparación precipitación total diaria del ERA5 vs predicciones de precipitación S2S, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Pajaroncillo.....	64
Figura 52. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en Pajaroncillo.	65
Figura 53. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en Pajaroncillo bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.	65
Figura 54. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Pajaroncillo.....	66
Figura 55. Predicciones de caudal en la entrada del embalse Alarcón para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.	67
Figura 56. Comparación lluvia ERA5 vs predicciones de precipitación, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Alarcón.....	67
Figura 57. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales de entrada de Alarcón.....	68
Figura 58. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en la entrada de Alarcón bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.	68
Figura 59. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Alarcón.....	69
Figura 60. Predicciones de caudal en la entrada del embalse Bellús para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.	70
Figura 61. Comparación lluvia ERA5 vs predicciones de precipitación, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Bellús.	70
Figura 62. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales de entrada de Bellús.	71
Figura 63. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en la entrada de Bellús bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.....	71
Figura 64. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Bellús.	72
Figura 65. Predicciones de caudal en la entrada del embalse Contreras para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.	73
Figura 66. Comparación lluvia ERA5 vs predicciones de precipitación, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Contreras.	73
Figura 67. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales de entrada de Contreras.....	74
Figura 68. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en la entrada de Contreras bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.....	74
Figura 69. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Contreras.	75
Figura 70. Predicciones de caudal en la entrada del embalse Forata para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.	76
Figura 71. Comparación lluvia ERA5 vs predicciones de precipitación, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Forata.	76
Figura 72. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales de entrada de Forata.	77
Figura 73. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en la entrada de Forata bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.....	78
Figura 74. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Forata.....	78
Figura 75. Predicciones de caudal en la entrada del embalse Tous para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.....	79

Figura 76. Comparación lluvia ERA5 vs predicciones de precipitación, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Tous.	80
Figura 77. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales de entrada de Forata.	80
Figura 78. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en la entrada de Tous bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.	81
Figura 79. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Tous.	81
Figura 80. Predicciones de caudal en la estación Huerto Mulet (Desembocadura) para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.	82
Figura 81. Comparación lluvia ERA5 vs predicciones de precipitación, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Huerto Mulet (Desembocadura).	83
Figura 82. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en Huerto Mulet (Desembocadura).	83
Figura 83. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales Huerto Mulet (Desembocadura) bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.	84
Figura 84. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Huerto Mulet (Desembocadura).	84
Figura 85. Porcentaje de acierto del CRPSS para valores diarios de Caudal, Escenario de Modelo Perfecto y Precipitación en la cuenca de Pajaroncillo.	86
Figura 86. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones de valores de caudal en la cuenca de Pajaroncillo.	87
Figura 87. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones en el escenario de Modelo Perfecto en la cuenca de Pajaroncillo.	88
Figura 88. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones de valores de precipitación total en la cuenca de Pajaroncillo.	88
Figura 89. Porcentaje de acierto del CRPSS para valores diarios de Caudal, Escenario de Modelo Perfecto y Precipitación en la cuenca de Contreras.	89
Figura 90. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones de valores de caudal en la entrada del embalse de Contreras.	90
Figura 91. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones en el escenario de Modelo Perfecto en la cuenca de Contreras.	91
Figura 92. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones de valores de precipitación total en la cuenca del embalse de Contreras.	91
Figura 93. Porcentaje de acierto del CRPSS para valores diarios de Caudal, Escenario de Modelo Perfecto y Precipitación en la cuenca de Huerto Mulet (Desembocadura).	92
Figura 94. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones de valores de caudal en la cuenca de Huerto Mulet (Desembocadura).	93
Figura 95. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones en el escenario de Modelo Perfecto en la cuenca de Huerto Mulet (Desembocadura).	94
Figura 96. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones de valores de precipitación total en la cuenca de Huerto Mulet (Desembocadura).	94

Lista de tablas

Tabla 1. Uso y capacidad de los embalses considerados de la cuenca del Júcar.(CHJ, s. f.-a)	19
Tabla 2. Resumen de las categorías y valores utilizados para la consideración de la interceptación y el almacenamiento por rugosidad del suelo. Fuente: Grupo GIHMA.....	23
Tabla 3. Valores de factor de vegetación o cubierta del suelo (λ_v) e I_{max}	25
Tabla 4. Factores correctores (GIMHA, 2014).....	27
Tabla 5. Valores recomendados mensuales de R0 para la latitud 40° (Allen et al., 1998)....	31
Tabla 6. Estaciones de aforo de la Red Integrada de Estaciones de Aforos (SAIH-ROEA) usadas en la modelación.....	33
Tabla 7. Coordenadas embalses utilizados en la modelación con sus coordenadas en salida del embalse.....	34
Tabla 8. Estaciones de aforo de la Red (SAIH-ROEA) usadas en el chequeo del balance en los embalses.	35
Tabla 9. Valores de los factores correctores tras el proceso de calibración en la estación Pajaroncillo.....	41
Tabla 10. Resumen de los índices de bondad en la validación espacial y espaciotemporal.	51
Tabla 11. Resumen índices de bondad en calibración y Validación del FC7.....	62

1 MARCO DE REFERENCIA

1.1 INTRODUCCIÓN

Los pronósticos hidrológicos se han convertido en una herramienta clave en la planeación, gestión, prevención de desastres y toma de decisiones temprana en una cuenca. Aun así, cada pronóstico contiene gran grado de incertidumbre, debido a la incertidumbre en las propias observaciones hidrometeorológicas y de las predicciones de las variables meteorológicas, errores desde el planteamiento conceptual, las condiciones iniciales o la estimación de parámetros, entre otros. Es por esto que para el adecuado uso de estas herramientas es importante cuantificar la incertidumbre asociada a sus pronósticos.

En consecuencia, actualmente en el campo de la Hidrología cobra gran importancia medir incertidumbre de los modelos desarrollados: no basta con ofrecer un valor obtenido por un modelo físicamente basado, si no que se debe asociar una probabilidad de ocurrencia este. Es ahí donde usar las predicciones por conjuntos en un modelo físicamente basado puede ser realmente útil, ya que, al tener varios miembros o predicciones individuales, es posible ver tanto el escenario más probable y cuantificar su incertidumbre. Esta investigación busca a partir de las predicciones meteorológicas por conjuntos del proyecto S2S del modelo ECMWF, obtener la incertidumbre de los caudales generados por un modelo hidrológico del Júcar desarrollado en TETIS. Para cada conjunto de predicciones meteorológicas, se obtiene un abanico de resultados de caudales, los cuales se pueden analizar con herramientas estadísticas y ofrecer a diferentes valores de caudal una banda de equiprobabilidad de frecuencia.

En concreto, la implementación del modelo hidrológico se realiza en cuenca del río Júcar (España) en el período 2010-2018, con datos meteorológicos del reanálisis ERA5 del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo Medio (ECMWM) y valores observados de caudales de la Red Integrada de Estaciones de Aforos (SAIH-ROEA).

Los pronósticos a evaluar son los generados por el modelo el ECMWF en el proyecto S2S. Este genera predicciones por conjuntos (ensemble) con de 51 componentes, con una resolución espacial original de 1.5° y un periodo de anticipación de 0-46 días con 6 horas de periodo de acumulación, lanzado dos veces por semana (ECMWF, 2022). En el presente estudio se utiliza la versión reescalada espacialmente por el ECMWF a 0.25° y un periodo de acumulación para las variables de 24 horas.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general es estimar la incertidumbre de los caudales generados por un modelo hidrológico del Júcar montado en TETIS, a partir de predicciones las predicciones por conjunto del proyecto S2S del modelo ECMWF.

Con el fin de cumplir el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Elaborar y calibrar un modelo hidrológico en TETIS para la cuenca del Júcar, que reproduzca los caudales en régimen natural de la cuenca del Júcar de manera satisfactoria.
- Analizar el comportamiento las predicciones hidrológicas generadas con información meteorológica provenientes del ECMWF para los diferentes tiempos de antelación, asumiendo equiprobabilidad de todas las predicciones.

1.3 PREDICCIÓN

Comprender la naturaleza ha hecho que las personas intenten predecir su comportamiento para anticipar diferentes fenómenos y sus efectos, tanto negativos como positivos, en la sociedad. En materia de agua, el clima y la previsión hidrológica ha cobrado importancia para brindar información en las siguientes áreas: prevención de desastres, agricultura, electricidad, turismo y activos ambientales; anticipar el posible impacto de estos eventos en estas áreas económicas y así reducir los daños al en la población, tanto materiales como no materiales. Esto se ve enfatizado por el impacto del cambio climático, que ha aumentado la necesidad de predecir y anticipar eventos extremos, lo que hace que la previsión sea importante en Hidrología.

Todos los fenómenos hidrometeorológicos están fuertemente influenciados por la escala, tanto en el tiempo como en el espacio, debido a la no linealidad de los procesos involucrados. Es por esto que las predicciones se clasifican según su horizonte de pronósticos, desde períodos de que pueden considerar fracciones de hora o unos cuantos días, considerados de corto plazo, o períodos mayores como horizontes mensuales, estacionales, anuales y/o hasta predicciones decadales, entrando ya en predicciones de largo plazo. En este proyecto nos enfocaremos en el pronóstico subestacional, concentrado en antelaciones de hasta 47 días.

Aun así, estas predicciones presentan un abanico de posibilidades asociadas a una probabilidad, ya que es imposible dar un valor exacto para una zona con meses de antelación.

Las predicciones climáticas no pretenden predecir el día tras día del sistema, sino la evolución en términos de algún estadístico climático como los promedios y desviaciones para diferentes escalas de tiempo, ya sea para una localidad en particular o un promedio global o regional (*Pastor Saavedra et al. , 2018*). Es por esto que el otorgar una medida de incertidumbre a la estimación de una variable de interés (caudal, precipitación, temperatura, etc.) es clave para obtener una probabilidad con la que se pueda verificar su ocurrencia. La aproximación probabilística parte del hecho que cualquier modelo hidrológico, sea físicamente basado o basado en datos, puede tener mayor o menor grado de acierto sobre la variabilidad temporal

de la serie histórica. Cada modelo puede tener mayor o menor habilidad para representar los mecanismos de respuesta de la cuenca al ocurrir una tormenta, ya sea por sus parámetros, condiciones iniciales, el modelo conceptual, entre otros factores que influyen en la dinámica hidrológica altamente no lineal (Múnera et al., 2011).

Cada una de las variables de interés a predecir en Hidrología, sea temperatura, precipitación, evapotranspiración o caudal, dependen a su vez de otras variables con una incertidumbre asociada. Por ejemplo, para el caso de interés de este proyecto de predecir la variable caudal, entran en juego el conocimiento sobre las variables precipitación y evapotranspiración, con toda su variabilidad espacial y temporal debidamente descrita, además de las condiciones geomorfológicas de la cuenca, como su topografía, geología, suelos y usos de estos. Por la gran cantidad de información involucrada en el proceso de pronóstico, la propagación de errores de la información de entrada o parámetros puede ser significativa de considerar. Es por esto que tener una medida de la incertidumbre es fundamental cuando se habla de pronósticos.

1.4 INCERTIDUMBRE PREDICTIVA

La incertidumbre predictiva (IP) se puede definir como “*la probabilidad de cualquier valor futuro (real) condicionado a todo el conocimiento y la información, disponible hasta el presente, que pudimos adquirir a través de un proceso de aprendizaje inferencial*” (Todini, 2008). Esta incertidumbre al estar vinculada a todo el conocimiento e información presente, está asociada a su vez a las limitaciones propias del modelo escogido o errores en las condiciones iniciales, influyendo también la aleatoriedad del fenómeno es sí, o la antelación de la predicción, ya que las predicciones a largo plazo suelen tener una incertidumbre mayor frente a las de corto plazo, al ser más sensibles a las condiciones iniciales (Pastor Saavedra et al., 2018). Si bien muchas fuentes de error se pueden señalar a la hora de predecir, otras no, lo que suele ser una dificultad a la hora de cuantificar el error.

Es por esto que el ver la incertidumbre predictiva como una función de distribución de probabilidad (PDF, de sus siglas en inglés) tiene sus ventajas, aprovechando el aspecto probabilístico de esta, ya que aporta una base matemática que permite estimar la incertidumbre en función del tiempo. En la Figura 1, la incertidumbre predictiva representada como una PDF de la realidad no observada aún (pertenece al futuro), condicionada a la predicción realizada. Esta predicción se basa en la información observada.

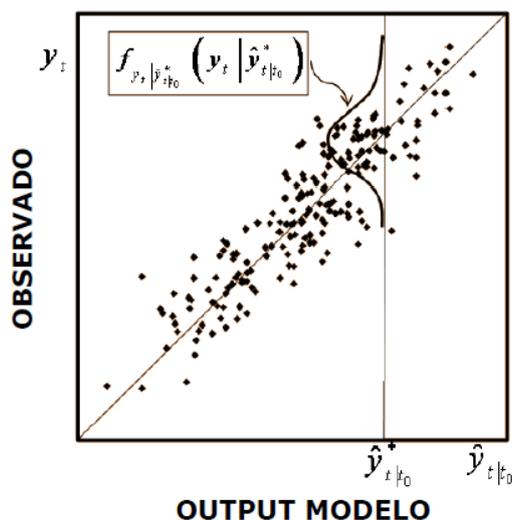


Figura 1. Fundamento principal para la estimación de la incertidumbre predictiva. Fuente: -Francés (2018) adaptado de -Todini (2008b).

Aquí, los pronósticos por conjunto se han hecho un lugar, especialmente en el pronóstico meteorológico, ya que es fácil asociarle una incertidumbre predictiva. El pronóstico por conjuntos consiste en ejecutar diferentes modelos individuales asumidos como equiprobables y representativos de una solución real, llamada miembros, donde cada uno de ellos se diferencia entre sí por tener una configuración diferente pero igualmente válida (METEOGALICIA, s. f.). Cada miembro de un conjunto o ensemble es una estimación discreta de la PDF que permite idear diferentes escenarios según las diversas condiciones iniciales y el modelo, ofreciendo información cuantitativa, detallada y explícita de la incertidumbre en la predicción y con ello de la predictibilidad, así como del potencial de fenómenos adversos, que aparecerán normalmente en la cola de la distribución de la PDF (Santos Burguete, 2018).

Los predicciones por conjuntos se pueden trabajar como variables aleatorias, por lo que al implementarlos en modelos deterministas les confiere a estos ventajas de los modelos probabilistas, cómo medir la incertidumbre con herramientas estadísticas. En esta investigación se parte de esto y se mide la incertidumbre hidrológica de un modelo determinista con la ayuda de pronósticos por conjuntos.

2 METODOLOGÍA

2.1 CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO JÚCAR.

La cuenca del Júcar posee una superficie de 21874 km² hasta la estación de aforo Huerto Mulet, punto que se tomará como desembocadura en el proceso de implementación del modelo, y está situada geográficamente en el extremo central-este de la Península Ibérica. Su extensión incluye territorios en las comunidades autónomas españolas de Castilla La Mancha y la Comunidad Valenciana (Figura 2).

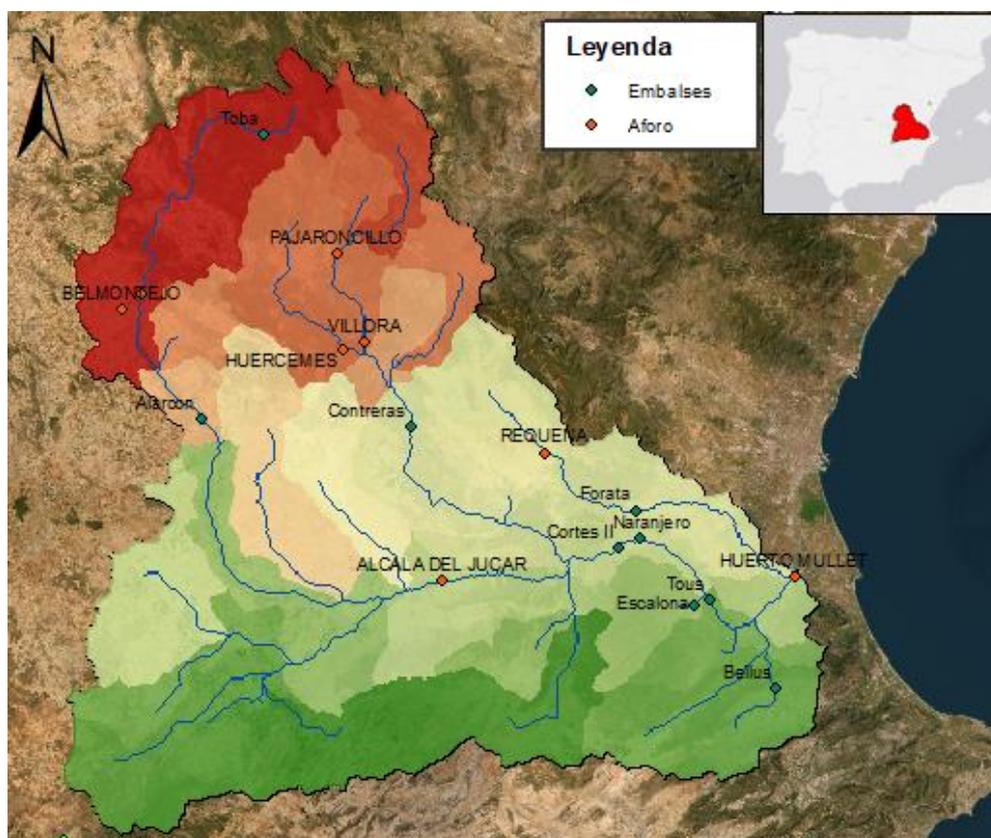


Figura 2. Red hidrográfica del Río Júcar con estaciones de medición de aforo y salidas de embalses.

La elevación de la cuenca del Júcar varía desde 1791 m.s.n.m en la parte más alta, hasta los 0 m.s.n.m. en su desembocadura en el mar en el municipio de Cuellar, en la provincia de Valencia, donde ya ha recolectado a sus principales afluentes como lo son los ríos Albaida, Cabriel, Magro y Sellent (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022a). Según la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ), la red fluvial del río Júcar aporta 3100 hm³/año, de los que un 26% (820 hm³/año) proviene de la escorrentía superficial directa, y el restante 74% (2270 hm³/año) de la escorrentía subterránea. Aunque el valor medio de 3100 hm³/año se ha visto reducido en los últimos diez años a 2500 hm³/año (CHJ, 2007). También reporta que la precipitación media anual en la cuenca es de 500 mm/año, pero que puede descender hasta los 300 mm/año en las regiones más meridionales y alcanzar los 750 mm/año en otros sectores más afectados por la denominada “Gota fría”, eventos de precipitación intensa y corta

duración que se suelen presentar en los meses de octubre y noviembre (CHJ, s. f.-b). En general la cuenca posee un clima mediterráneo, con veranos cálidos y con inviernos suaves.

En la Figura 4 se observa la curva hipsométrica de la cuenca del Júcar desde su cabecera hasta el punto de desagüe de la modelación, en la estación de aforo Huerto Mulet. La altura media de la cuenca es de 824 m.s.n.m, y el 50% del área acumulada está sobre 869 m.s.n.m. (Figura 3).

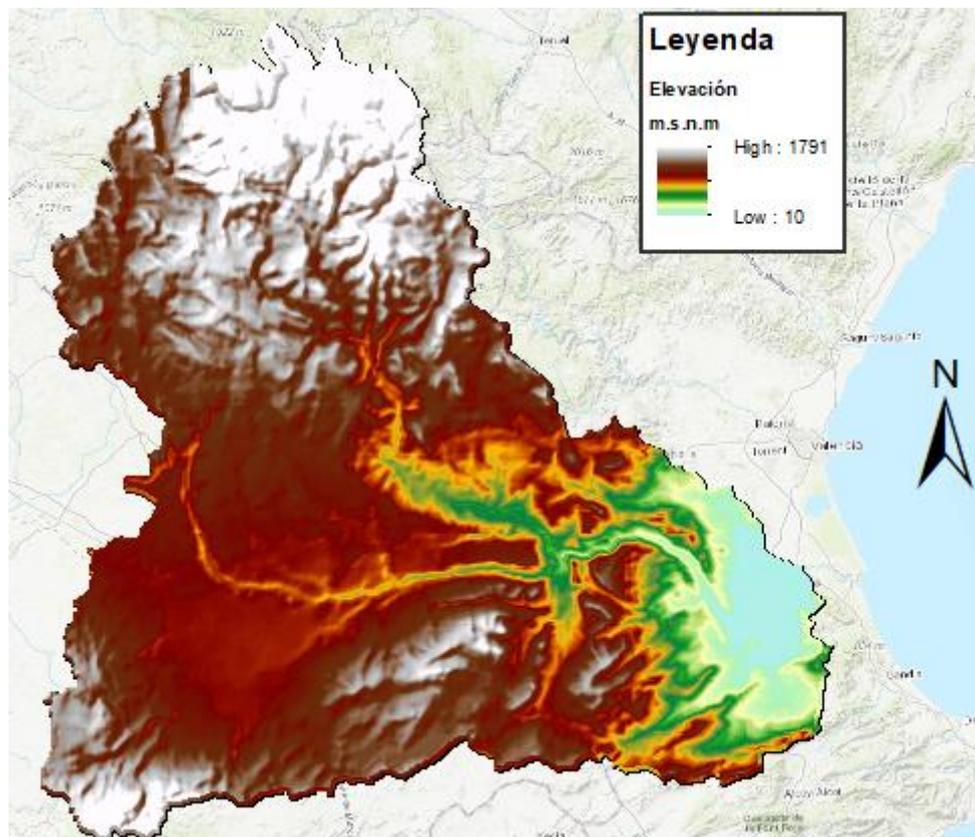


Figura 3. Modelo de elevación digital de la cuenca del Júcar.

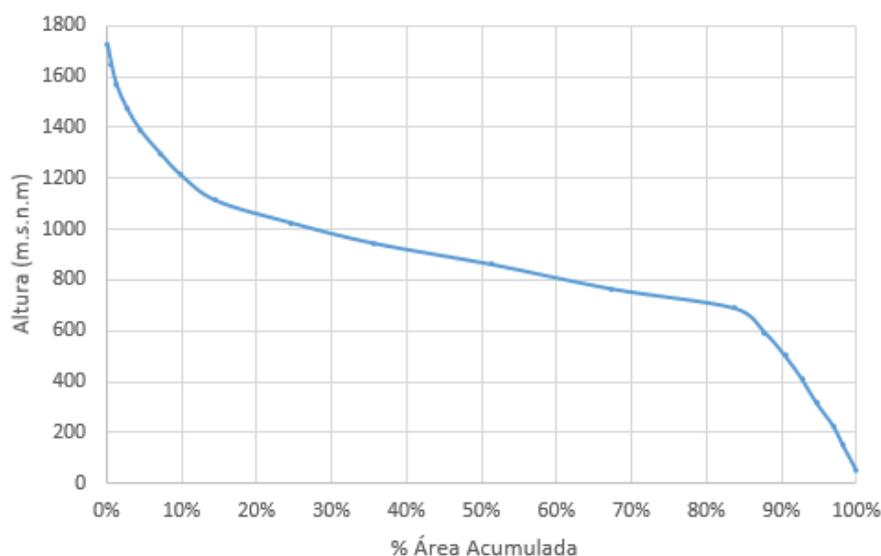


Figura 4. Curva Hipsométrica cuenca del Júcar.

Con respecto a la Hidrogeología, el Instituto Geológico y Minero De España (IGME) describe en el sector norte la cuenca del Júcar zonas carbonatadas sobre otras formaciones, las cuales poseen grados de permeabilidad entre medio y alto. A lo largo del litoral describe en su mayoría la formación detrítica (cuaternario), la cual posee permeabilidades medias. Cabe destacar que en la CHJ existen un total de 90 masas de agua subterráneas, de las cuales 26 de ellas son impermeables.

Con respecto al uso del suelo, la información provista por la CHJ informa que el uso dominante es el de cultivo, siendo este el 84% del área total en jurisdicción de la confederación. Este 84% de cultivos está conformado por un 31% en los cultivos de secano, un 29% hortaliza y un 24% en cultivos frutales. El resto del territorio en su mayoría se compone por matorrales con un 31.6% del área y solo un 2.5% es de uso urbano.

Actualmente, la cuenca del Júcar se encuentra altamente intervenida, con diferentes embalses a lo largo de su cauce principal y afluentes, los cuales alteran el régimen natural. En la Tabla 1 se mencionan los embalses que se considerarán en este estudio debido a su impacto en la hidrología de la cuenca, junto con la capacidad y uso.

Tabla 1. Uso y capacidad de los embalses considerados de la cuenca del Júcar. (CHJ, s. f.-a)

Embalse	Uso	Río	Capacidad (Hm ³)
Alarcón	Regulación y riego	Júcar	1118.0
Bellús	Laminación de avenidas y riego	Albaida	69.2
Contreras	Abastecimiento, hidroeléctrica y riego	Cabriel	852.0
Cortes	Riego e hidroeléctrica	Júcar	118.0
Escalona	Laminación de avenidas	Escalona	98.7
Forata	Riego	Magro	37.3
Naranjero	Riego y hidroeléctrica	Júcar	29.0
Tous	Laminación de avenidas, abastecimiento y riego	Júcar	378.6
Toba	Hidroeléctrica	Júcar	9.7

2.2 Pronósticos Históricos de Precipitación y Temperatura (ECMWF)

Para poder analizar la incertidumbre de las diferentes variables hidrológicas es necesario contar tanto con la información histórica observada disponible, como las predicciones realizadas por uno o más modelos. En este caso las variables predichas se tomarán del modelo del ECMWF desarrollado para el proyecto S2S, proyecto que fue impulsado a partir del 2013 por el World Climate Research program (WCRP) y el World Weather Research program (WWRP) en busca de una mejor comprensión y mejora de la habilidad en la predicción subestacional (Vitart & Robertson, 2018).

El S2S del ECMWF es un modelo de predicción por conjuntos o ensemble, donde cada pronóstico muestra una posibilidad de la variable a pronosticar al introducir variaciones

aleatorias en las condiciones iniciales, obteniendo así un abanico de potenciales estados futuros, que permiten no solo establecer el escenario más probable si no también estudiar la incertidumbre asociada de manera cuantitativa. El ensemble producido del modelo ECMWF es de 51 componentes, cuenta con una resolución espacial original de 1.5° y un periodo de anticipación de 0 a 46 días con 6 horas de periodo de acumulación y es ejecutado dos veces por semana (ECMWF, 2022). Pero en este estudio se partirán de las predicciones procesadas por Sergio Romero en su tesis (Romero, 2023) donde el sesgo se ha corregido mediante Quantile-Mapping y se utiliza la versión reescalada espacialmente por el ECMWF a 0.25° y un periodo de acumulación para las variables de 24 horas.

2.3 MODELO HIDROLÓGICO: TETIS

TETIS es un modelo hidrológico distribuido que permite obtener los caudales en la cuenca del Júcar, utilizando principalmente información de precipitación como dato de entrada meteorológico. Este modelo usa parámetros físicamente basados y genera un balance de masa en cada celda, asumiendo que el agua se distribuye en 7 tanques conectados entre sí, como se muestra en la Figura 5. Convirtiendo así a la precipitación (nieve o lluvia) en escorrentía.

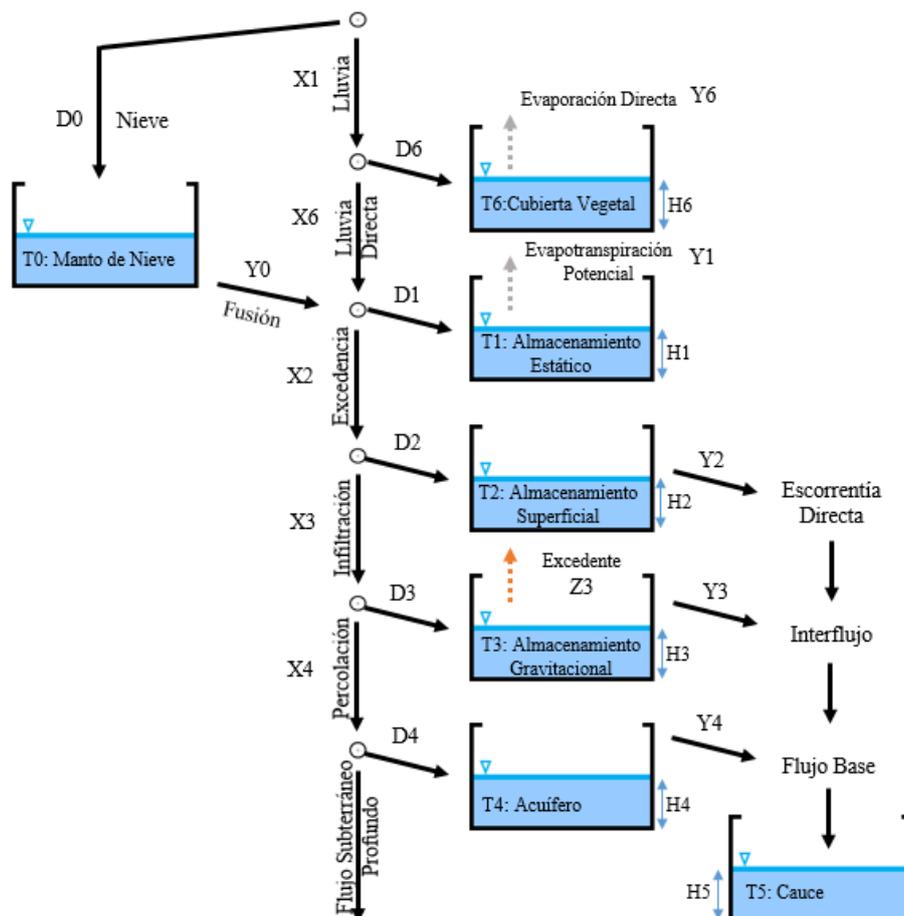


Figura 5. Esquema conceptual del modelo de producción de escorrentía en TETIS. Fuente: adaptado de GIMHA (2014)

Cada tanque (T) representa un almacenamiento en la cuenca, por ejemplo el tanque T0 es el aporte al sistema debido a la fusión de nieve, pero este tanque no se implementará en este modelo. Los tanques T1 y T6 representan el recurso hídrico que no entra a hacer parte de la escorrentía y salen por medio de la evapotranspiración o la evaporación directa, como el agua atrapada en forma de charcos en el caso de T1 que es almacenamiento estático o el agua atrapada en la cobertura vegetal como es el tanque T6, que representa la intercepción.

El tanque T2 es el agua que se mueve por las laderas en dirección al cauce, o almacenamiento en superficie, que da pie a la escorrentía directa pero con la posibilidad de infiltrarse en el subsuelo y hacer parte del tanque T3. El tanque T3 es la capacidad de almacenamiento de agua gravitacional de la celda, el agua en este tanque puede convertirse en interflujo y llegar al cauce, se puede percolar y avanzar hasta alcanzar el acuífero de la cuenca o, en caso de determinar una capacidad máxima en este tanque, puede retornar al tanque T2 por saturación del subsuelo. El tanque T4 indica el estado del acuífero, cuyos recursos pueden aflorar en los cauces como flujo base o pueden seguir adentrándose en el suelo, formando parte del flujo profundo. Finalmente está el tanque T5 representa la escorrentía recogida en los cauces (GIMHA, 2014).

En la Figura 5 además de los tanques se presentan las interacciones de flujo entre ellos, (letras X, Y,Z) representan los diferentes procesos hidrogeológicos presentes en la cuenca que definen el ciclo hidrológico, alguno ya descritos anteriormente. Los flujos que entran en cada tanque se representan con la letra D, mientras que la capacidad de estos de almacenar se identifica con la letra H.

La primera etapa del movimiento del flujo en la modelación corresponde al movimiento del agua en las laderas, donde con la escorrentía directa, interflujo y flujo base se desplazan hacia la celda hacia aguas abajo, siguiendo las direcciones de flujo dictadas por la topografía del terreno, indicado a través del modelo de elevación digital (MED). Este proceso continuará hasta alcanzar celdas de la red de drenaje, ya sean cárcavas o cauces, las cuales se define mediante un valor de un área umbral de área drenada, obteniendo así tres elementos en el sistema: laderas, cárcavas y cauces. La segunda etapa del movimiento corresponde al flujo en la red de cauces, cuya propagación se describe con la Onda Cinemática Geomorfológica (OCG) cual combina los datos geomorfológicos de la cuenca con la ecuaciones de la onda cinemática (Vélez, 2005).

2.3.1 Mapas de Parámetros

El Modelo de Elevación Digital (MDE) utilizado, se puede obtener en el centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional. El mismo fue creado por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) y posee una resolución de 200 x 200 metros. Para eliminar las incertidumbres en la determinación de las direcciones de flujo, ya sea por una baja precisión en las cotas o un tamaño excesivo de celda, se realizó el debido preprocesamiento de este, eliminando la presencia de hoyos, zonas planas, bifurcaciones, sumideros espurios, entre otros problemas asociados al MDE. Una vez que está corregido el MDE es posible calcular los demás mapas derivados como: dirección de flujo, celdas drenantes acumuladas, pendientes, velocidad en el cauce, así como delimitar la cuenca del Júcar (Figura 6).

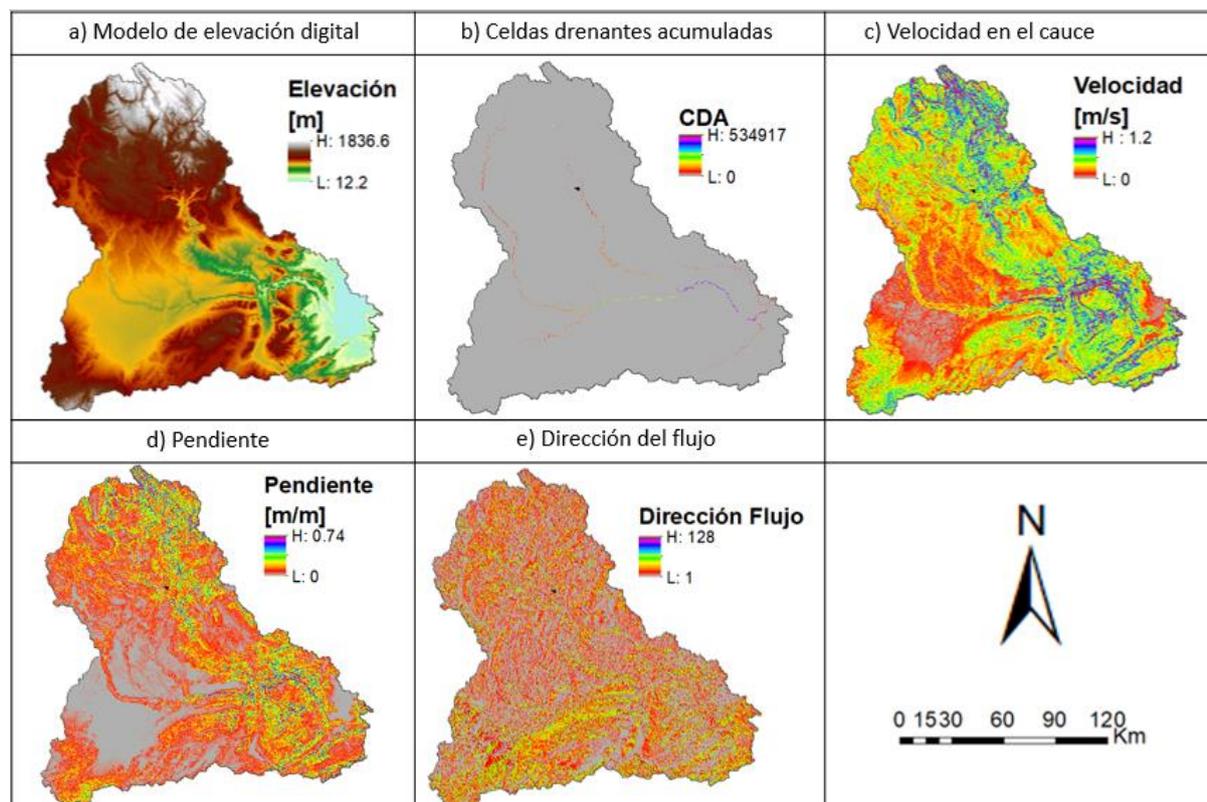


Figura 6. Mapas derivados del MDE de la cuenca del Júcar.

Adicional a la información asociada al relieve, TETIS requiere mapas de diferentes parámetros que den información adicional sobre las características hidráulicas del terreno representado en cada celda (Figura 7). A continuación se presenta una breve descripción del origen de los diferentes mapas de parámetros hidrogeológicos.

- El mapa de máxima capacidad de almacenamiento estático en la capa superior del suelo (H_u) hace referencia a toda el agua que entra a la cuenca, pero sale por evapotranspiración antes de formar parte de la escorrentía, considerando tanto el agua atrapada en depresiones y vegetación, como aquella retenida por efecto capilar (Figura 7c). Debido a que en este parámetro se resumen diferentes formas de interceptar el agua, termina siendo la suma de diferentes mapas. Para la capacidad de interceptación de la vegetación se emplean los valores usados por el grupo de investigación GIMHA (Tabla 2); para el almacenamiento por morfología local debida al uso del suelo, se usaron mapas europeos de alta resolución que muestran el porcentaje de suelo impermeabilizado; mientras que para la retención debida a la pendiente se empleó un MDT de alta resolución asociando a las zonas planas una capacidad máxima de 10 mm, la cual se va reduciendo de forma lineal con el aumento de la pendiente. Agregando cada mapa a una resolución de 200 x 200 m y sumando estos tres valores, se obtiene el mapa de abstracciones iniciales, que junto al almacenamiento capilar es toda la capacidad de H_U . El mapa de almacenamiento capilar se obtiene a partir de la diferencia de los mapas de punto de marchitez y capacidad de campo en los diferentes perfiles de suelo, los cuales se encuentran disponibles en “3D Soil Hydraulic Database”.

Tabla 2. Resumen de las categorías y valores utilizados para la consideración de la interceptación y el almacenamiento por rugosidad del suelo. Fuente: Grupo GIHMA.

ID_TETIS	Códigos CLC 2018	Almacenamiento Rugosidad del usos suelo
1	111	2
2	112	4
3	121	2
4	122 / 123 / 124	4
5	131 / 132	4
6	133	4
7	141 / 142	4
8	211	4
9	212	5
10	213	5
11	221	10
12	222	10
13	223	10
14	231 / 321	10
15	241	6
16	242	10
17	243 / 244	10
18	311	5
19	312	5
20	313	5
21	323	6
22	324	6
23	331	6
24	332	5
25	333	0
26	334	2
27	411 / 421 / 422 /423 /511	0

- Para la conductividad hidráulica saturada del suelo (K_s/K_{ss}) se toma información de 3D Soil Hydraulic Database, una base de datos tridimensional de Europa sobre hidráulica del suelo (Tóth et al., 2017) (Figura 7a yFigura 7e). En esta base de datos están las principales características hidráulicas a 7 profundidades de suelo, desde 0 hasta 2 metros, pero para pasarlos a único valor de conductividad hidráulica vertical o infiltración (K_s) y de conductividad hidráulica horizontal (K_{ss}) se usa el concepto de hidráulica equivalente, presentados en las ecuaciones 1 y 2 (Leonards, 1962):

$$K_s = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{K_i}} \quad (1)$$

$$K_{ss} = \frac{\sum m_i K_i}{\sum m_i} \quad (2)$$

Con K_i siendo la conductividad hidráulica de la capa y m_i el espesor de la capa.

- La conductividad hidráulica saturada del subsuelo ($K_p/K_{sa}/K_{ps}$) se maneja de manera análoga a lo que se realizó con K_s y K_{ss} , usando también en gran medida la base de datos 3D Soil Hydraulic (Figura 7b, Figura 7d y Figura 7f). Para los valores de capacidad de percolación (K_p) se toma el valor de la conductividad hidráulica de la última capa disponible y se asumen estos mismos valores para la velocidad de percolación en la zona profunda del suelo (K_{ps}), que es el que genera el flujo de agua que no hace parte del hidrograma y se consideran pérdidas del acuífero profundo. Por otro lado para la conductividad hidráulica saturada horizontal del subsuelo (K_{sa}) se parte del mapa del proyecto GLHYMPS (Huscroft et al., 2018).

Todas las capas que parten de la base de datos 3D Soil Hydraulic Database son de un tamaño de celdas de 250 m, por lo que se debieron pasar por un proceso de remuestreo por medio del “vecino más cercano” para obtener celdas de 200 m.

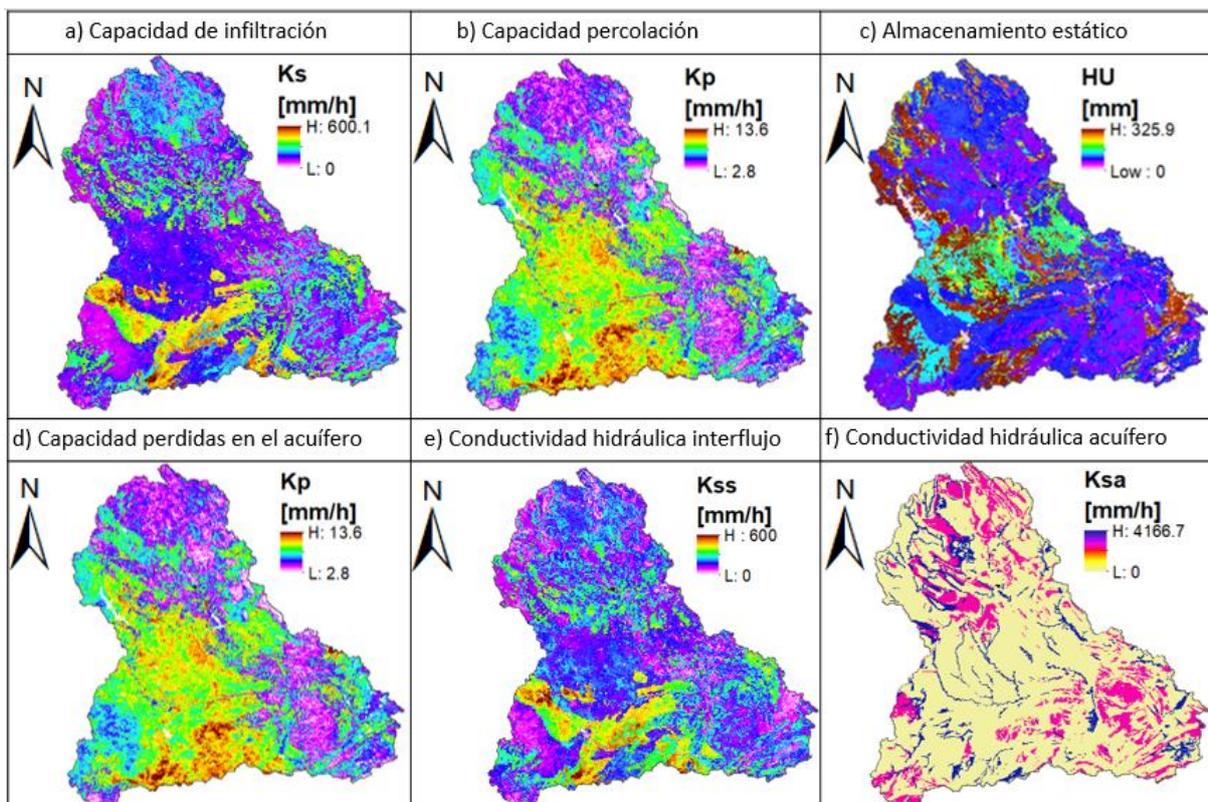


Figura 7. Mapas de parámetros hidrológicos.

En TETIS la evapotranspiración juega un rol importante, por lo que para calcular esta se parte del factor de vegetación que asocia la evapotranspiración real máxima (ET) de cada cobertura y sus requerimientos hídricos, con la evapotranspiración potencial (ETP) o evapotranspiración

de referencia (ET0). La distribución espacial de esta variable se toma de los mapas de coberturas de CORINE Land Cover 2018 y según el tipo de cobertura se les asigna un identificador de TETIS (Figura 8). Este identificador permite asociar cada cobertura con su factor de vegetación (Tabla 3), que es el que establece la variabilidad temporal del proceso, pretendiendo así mostrar el comportamiento medio mensual, tomando como base los valores de factor de cultivo sugeridos por (Burman & Pochop, 1994).

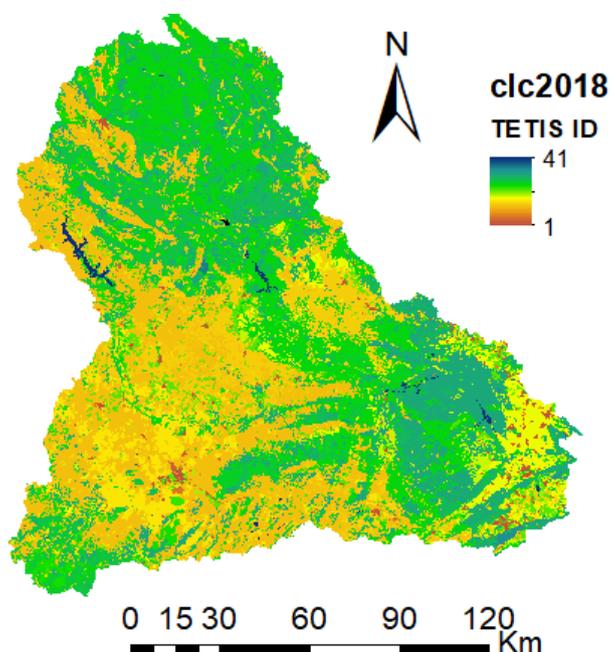


Figura 8. Mapa de coberturas de CORINE Land Cover 2018 asociado con el ID de TETIS.

Tabla 3. Valores de factor de vegetación o cubierta del suelo (λ_v) e I_{max}

ID TETIS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	I_{max}
1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0
2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0
3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0
4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0
5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0
6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0
7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0
8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0
9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0
10	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0
11	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0
12	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0
13	0.6	0.6	0.7	0.8	1	1	1	1	1	0.8	0.7	0.6	0
14	0.2	0.2	0.2	1	1	1	1	1	0.9	0.2	0.2	0.2	0
15	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0

ID TETIS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Imax
16	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0
17	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0
18	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0
19	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	0.4	0.4	0
20	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.6	0.4	0.4	0
21	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.5	0.5	0
22	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.5	0.5	0
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
25	0.8	0.8	0.8	0.9	1	1	1	1	1	0.9	0.8	0.8	0
26	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0
27	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0
28	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0
29	0.8	0.8	0.8	0.9	1	1	1	1	1	0.9	0.8	0.8	0
30	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0
31	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0
32	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0
33	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0
34	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
36	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
37	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
38	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
39	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
42	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

En TETIS se tiene como parámetro la capacidad máxima de interceptación de agua del grupo funcional de vegetación en condiciones de máximo follaje (I_{max}) y el factor de vegetación o cubierta del suelo (λ_v) que modifica la I_{max} , según el tipo de cubierta y el mes del año, considerando así las variaciones intraanuales del estado de la cobertura vegetal. Los valores se pueden ver en la Tabla 3 y se relacionan con el ID de cubiertas y usos del suelo (Grupo GIMHA).

2.3.2 Factores Correctores

Obtener la información necesaria para montar un modelo esta usualmente supeditado a diversas fuentes de error, desde problemas en la medición o problemas de escala temporal y/o espacial, entre otros. Es por esto que en TETIS los mapas de parámetros se ajustan para que los resultados de la modelación se aproximen a los valores observados en el punto de interés, disminuyendo así los errores en diferentes variables de entrada. Los valores de

parámetros que aproximan la modelación a los valores observados se llaman parámetros efectivos, y estos se obtienen al multiplicar cada mapa por un factor corrector (FC) en un proceso de calibración, ajustando así los datos simulados a los observados sin comprometer la variabilidad espacial y conservando el valor relativo entre las celdas, además de no modificar el mapa de parámetros original durante el proceso de optimización del modelo (Tabla 4).

TETIS permite la calibración automática de los factores correctores mediante el algoritmo de optimización SCE-UA “Shuffled Complex Evolution” (Duan et al., 1994) usando como funciones objetivo el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE) y el error cuadrático medio (RMSE). El NSE y RMSE se utilizan también para medir la bondad de ajuste del modelo en la validación, mirando el desempeño del modelo en períodos temporales diferentes a las de la calibración (validación temporal) y en diferentes puntos (validación espacial) y una combinación de los dos (validación espaciotemporal) (Vélez, 2005).

Tabla 4. Factores correctores (GIMHA, 2014).

Factor Corrector	Parámetro del modelo	símbolo
FC1	Almacenamiento estático	Hu
FC2	Evapotranspiración	λ
FC3	Infiltración	Ks
FC4	Escorrentía directa	μ
FC5	Percolación	Kp
FC6	Interflujo	Kss
FC7	Flujo subterráneo profundo	Kps
FC8	Flujo base	Ksa
FC9	Velocidad en la red de flujo	v

2.3.3 Calibración y Validación del Modelo TETIS

El proceso de calibración consiste en encontrar el conjunto de factores correctores (FC) que hacen que las variables simuladas reproduzcan lo mejor posible los patrones de comportamiento de las variables observadas, mientras se procura a la vez que los procesos, almacenamientos y flujos de salida del modelo tengan un comportamiento coherente con la realidad hidrológica e hidráulica de la cuenca. En el proceso de validación se evalúa el desempeño de estos factores correctores en otro escenario y la estacionalidad del modelo.

La modelación de la cuenca del Júcar se ejecuta entre el 1 de enero del 2009 y el 26 de octubre del 2018, en una resolución temporal diaria. Todo el 2014 se implementa como período de calentamiento de la calibración, siendo la calibración desde el año 2015 hasta el 26 de octubre del 2018. La validación del modelo se realiza entre los años 2010 y 2014, con un período de calentamiento correspondiente al año 2009.

La calibración de la cuenca se realizará en la estación Pajaroncillo, ya que es la cuenca menos intervenida, por lo que los caudales observados se acercan más a los caudales en régimen natural que son los simulados por TETIS. Una vez encontrados los factores correctores que

arrojaron el mejor ajuste en el proceso de calibración en esta estación, se realiza la validación temporal, evaluando el desempeño del modelo en la estación Pajaroncillo en el período de validación, así como la validación espacial y espaciotemporalmente. Para la validación espacial, se ha corrido el modelo en el periodo de calibración en 7 estaciones de aforo de SAIH-ROEA: Alcalá del Júcar, Belmontejo y El Castellar en la cuenca del embalse de Alarcón, Huerce y Villora en la cuenca del embalse de Contreras, Forata en la cuenca del embalse de Requena y Huerto Mulet considerado la desembocadura del río Júcar. Para la validación espaciotemporal se usan estas mismas estaciones pero en el período de validación.

Índices de bondad

Para medir la bondad del modelo se han elegido el índice de Nash-Sutcliffe (NSE), el error en volumen en porcentaje (BE) y el error cuadrático medio (RMSE).

El índice Nash-Sutcliffe es igual a la unidad para simulaciones perfectas, y adoptando un valor de cero para un modelo trivial, tal que el valor predicho fuera siempre la media de la serie (3). Este índice es sensible a valores extremos y al desfase de los picos, llegando a subestimar el modelo (D. N. Moriasi et al., 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\sum[Q_o - Q_s]^2}{\sum[Q_o - \bar{Q}_o]^2} \quad (3)$$

Donde:

- Q_o : Caudal observado.
- Q_s : Caudal simulado.
- \bar{Q}_o : Media del caudal observado.

El error en volumen mide la diferencia entre el volumen total de escorrentía observada en comparación con el volumen total de escorrentía simulada, por lo que un valor de cero indica que en ambos hidrograma se tiene el mismo volumen de agua, un valor negativo es un subestimación de la escorrentía por parte del modelo y un valor positivo una sobreestimación. Esta medida no tiene en cuenta la distribución temporal de la escorrentía (4).

$$BE = \frac{V_s - V_o}{V_o} \times 100 \% \quad (4)$$

Donde:

- V_o : Volumen total del hidrograma observado.
- V_s : Volumen total del hidrograma simulado.

Error cuadrático medio es un indicador de desviación dimensional, donde se mide la bondad por medio de la raíz cuadrada del promedio de los errores al cuadrado entre los valores observados y los valores simulados. Este indicador es cero cuando la simulación es perfecta y conserva las unidades del hidrograma (5).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_o - Q_s)^2}{n}} \quad (5)$$

Donde:

- Q_o : Caudal observado.
- Q_s : Caudal simulado.
- n : Número total de caudales observados.

Calibración del factor de flujo subterráneo profundo (FC7)

Para el caso de la cuenca del Júcar se considera pertinente calibrar este factor para diferentes embalses de interés, ya que este parámetro puede presentar cambios significativos de un embalse a otro. Para calibrar este factor corrector es necesario conocer las entradas a los embalses, ya que este es en este punto donde se dará lugar a dicha calibración. Debido a que no hay estaciones de aforos en todas las colas de los embalses se debe estimar las entradas a partir de balance, con la información de reservas, salidas y estimación de la evapotranspiración. Los resultados del balance son contrastados con la información de estaciones aguas arriba de los embalses, con el fin de generar series coherentes con la información observada. Los puntos en los que se calibra el FC7 son los embalses Alarcón, Bellús, Contreras, Complejo Cortes, Escalona, Forata, Toba, Tous y la estación de aforos de Huerto Mulet (Desembocadura).

En casos como el embalse de Contreras y Cortes, se encontró que la suma de las estaciones de aforo aguas arriba representaba un mejor hidrograma que el generado por balance, por lo que la serie de entrada es la suma de las estaciones disponibles aguas arriba del embalse (Villora, Huerce, Villora 2 y Camporrobles en el caso de Contreras; y Conferentes y Alcalá del Júcar para Cortes), afectadas por un factor de área, que aumenta el caudal de manera proporcional al área drenada que no se tiene en cuenta en los aforos (6).

$$\text{Factor de área} = 1 + \frac{1 - \frac{\sum A_{af}}{A_e}}{\frac{\sum A_{af}}{A_e}} \quad (6)$$

Donde:

- A_{af} : área drenada en las estaciones de aforo.
- A_e : área drenada en la salida del embalse.

2.3.4 Variables Input

Como variable de entrada en este modelo se tiene la precipitación y la evapotranspiración potencial. Como salidas del modelo se obtiene el caudal en los puntos de interés de la red de drenaje, evapotranspiración real y las pérdidas subterráneas (Francés, 2018).

De manera análoga a partir de la base de datos del ERA5 y en los puntos obtenidos para la variable precipitación (Figura 9), se obtuvieron también las series de temperatura máxima y mínima diarias. Con estos datos se logra obtener la evapotranspiración de referencia implementando la ecuación de Samani – Hargreaves (1985) (ecuación (7)). En la Figura 11 se presenta el mapa de temperaturas medias anuales obtenido del ERA5.

$$ET_0 = 0.0135 \cdot (T_{med} + 17.78) \cdot R_s \quad (7)$$

Donde:

- T_{med} : temperatura media (°C)
- R_s : radiación solar incidente en (mm/día)

La radiación incidente se puede estimar por medio de la ecuación (8)

$$R_s = R_0 \cdot KT \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \quad (8)$$

Donde:

- T_{max} : temperatura máxima (°C)
- T_{min} : temperatura mínima (°C)
- R_0 : radiación solar ración solar extraterrestre (kJ /m²)
- KT : coeficiente empírico (adimensional)

El coeficiente KT tiene relación con la presión atmosférica, y tiene un valor recomendado de 0.17 (Samani, 2000). Mientras que R_0 es la radiación sobre las capas más altas de la atmosfera, para lo cual la literatura ofrece valores recomendados según la época del año y la latitud. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) recomienda los valores presentado en la Tabla 5 para la latitud de 40°, latitud de la cuenca del Júcar (Allen et al., 1998).

Tabla 5. Valores recomendados mensuales de R_0 para la latitud 40° (Allen et al., 1998).

Mes	R_0 [Mj/ m ² /día]
Enero	15
Febrero	20.4
Marzo	27.2
Abril	34.7
Mayo	39.7
Junio	41.9
Julio	40.8
Agosto	36.7
Septiembre	30
Octubre	22.5
Noviembre	16.3
Diciembre	13.6

de aforo utilizadas en el modelo se presentan en la Tabla 6 y su ubicación se muestra en la Figura 12.

Tabla 6. Estaciones de aforo de la Red Integrada de Estaciones de Aforos (SAIH-ROEA) usadas en la modelación.

NOMBRE	UTM X (m)	UTM Y (m)	COTA (m.s.n.m)
HUERTO MULET (DESEMBOCADURA)	723696.97	4340863.47	12
REQUENA (FORATA)	661989.32	4371543.54	661
ALCALA DEL JUCAR (MOLINAR)	635980.14	4339791.79	585
EL CASTELLAR (ALARCON)	560890.42	4411591.64	851
BELMONTEJO (ALARCON)	556065.38	4407797.65	843
PAJARONCILLO	610120.62	4421931.50	1006
VILLORA (CONTRERAS)	616970.47	4399641.53	819
HUERCEMES (CONTRERAS)	611045.45	4397521.53	820

TETIS posee diversos sub-módulos para la simulación del efecto de riego agrícola, vegetación dinámica, modelar los ciclos del nitrógeno y de carbono, transporte de sedimentos entre otros. Pero el único sub-módulo que se usará en esta modelación será el módulo de gestión de embalses, ya que la cuenca está altamente intervenida. Este módulo lo que hace, en pocas palabras, es que a partir del punto en el que se ubica un embalse hacia aguas abajo de este se ignora la hidrología y el caudal estimado hacia aguas arriba de este y se impone el caudal de salida del embalse.

Para el óptimo funcionamiento de este módulo se suministra las series de caudal de salida en cada uno de los embalses, además de las reservas día a día en ellos. También se deben suministrar las curvas cota- volumen de los embalses modelados, con el fin de que TETIS pueda calcular los niveles en este. La información de salidas y reservas de los embalses se obtuvo del anuario de aforos 2019 – 2020 del CEDEX, cuya información solo se encuentra disponible a lo sumo hasta septiembre 2020. En la Tabla 7 se presentan las coordenadas de la salida de los embalses en el modelo y en la Figura 13 se muestra en su ubicación en la cuenca.

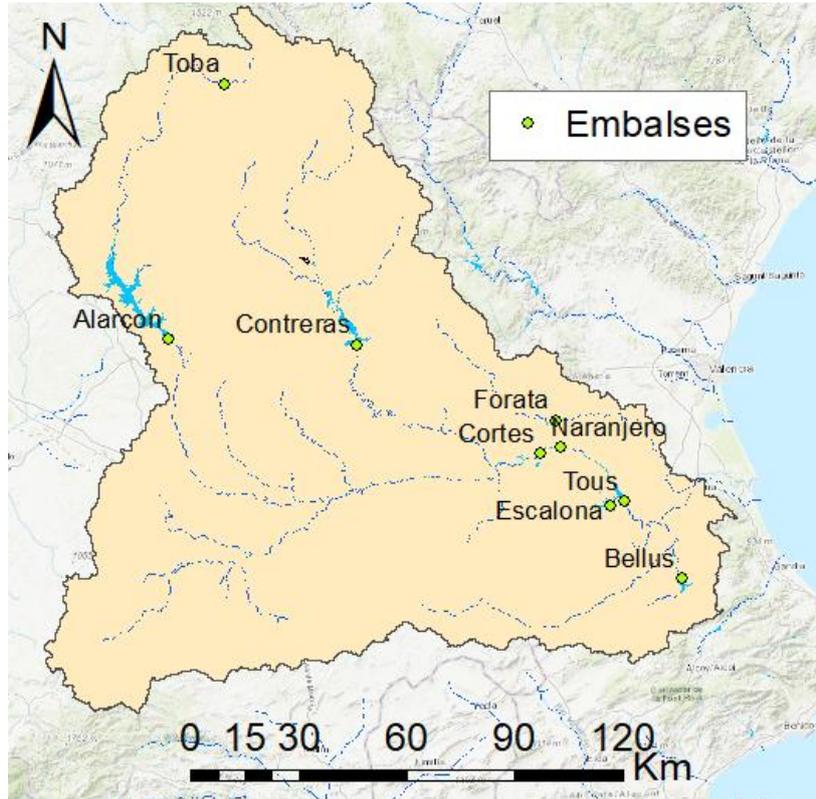


Figura 13. Ubicación embalses utilizados en la modelación con sus coordenadas en salida del embalse.

Tabla 7. Coordenadas embalses utilizados en la modelación con sus coordenadas en salida del embalse.

Embalse	UTM X (m)	UTM Y (m)	Cota (m.s.n.m)
Alarcón	628237.94	4378247.31	818
Bellús	576382.00	4380018.00	143
Contreras	718574.46	4312955.86	632
Cortes	703168.00	4334364.00	312
Escalona	684068.62	4357063.15	171
Forata	698965.93	4333704.32	384
Naranjero	685312.70	4350023.15	254
Tous	679692.00	4348083.00	118
Toba	591841.29	4451851.56	1210

Si bien la calibración de la mayoría de los factores correctores se realiza en la cuenca de Pajaroncillo, la percolación profundo o flujo subterráneo profundo (FC7) se calibra para cada uno de los embalses estudiado, debido a que en estos puntos se presentan cambios importantes en esta variable. Para realizar la debida calibración del FC7 se deben obtener los caudales a la entrada de los embalse, con el fin de verificar la correcta modelación previa la regulación. Debido a que la red de aforos SAIH-ROEA no presenta estaciones en la cola de los embalses estos caudales se deben obtener por medió de balance, usando la información de salidas y reservas de los embalses, así como estimando la evapotranspiración. Diferentes estaciones de aforo aguas arriba de los embalses de interés se usaron como referencia para verificar que el balance fuera coherente, sus nombres y coordenadas se presentan en la Tabla

8. Por otro lado la entrada de los embalses se ubicó en TETIS un pixel aguas arriba de las salidas del embalse, para asegurar el drenaje de la totalidad de la cuenca.

Tabla 8. Estaciones de aforo de la Red (SAIH-ROEA) usadas en el chequeo del balance en los embalses.

Embalse	Estación aforo aguas arriba	UTM X (m)	UTM Y (m)
Alarcón	El Castellar	561217.56	4411591.64
	Belmontejo	556065.38	4407797.65
Bellús	Montaberner	717225.95	4307735.57
Contreras	Villora	616753.75	4399660.46
	Villora2	622381.47	4401076.53
	Camporrobles	623310.44	4392209.57
	Hurcemes	611240.96	4397741.58
Cortes	Conferente	664370.13	4348591.62
	Alcala del Júcar	635980.14	4339791.79
Forata	Requena	661742.99	4371821.76
Toba	Venta de Juan Romero	597996.62	4453033.47

2.4 MEDIDA DE LA INCERTIDUMBRE HIDROLÓGICA.

Una de las ventajas de las que se hará uso en esta investigación es la del pronóstico por conjuntos, como es modelo ECMWF del proyecto S2S, que además permite obtener el escenario más probable, pudiendo medir la incertidumbre asociada haciendo uso de sus 51 miembros. Al ingresar en el modelo determinista como lo es TETIS un conjunto de pronósticos probabilístico como información de entrada, los resultados que se obtienen tendrán igualmente un carácter probabilístico, facilitando la aplicación de herramientas estadísticas en ellos.

2.4.1 Corrección del Sesgo.

La información generada por modelos suele traer un sesgo asociado, es decir una desviaciones sistemáticas o errores constantes que pueden existir entre los valores observados y los valores simulados. Esto incluye también el caso de los pronósticos de temperaturas y precipitación del modelo ECMWF del proyecto S2S, ya que al ser generados por modelos matemáticos presentan este sesgo y es necesario un postprocesamiento de la información meteorológica, que funciona como un preprocesamiento para el modelo hidrológico.

En esta investigación se parte de los datos meteorológicos procesados en el trabajo de final de máster de Sergio Romero (2023), el cual removió el sesgo implementando el método empírico Quantile Mapping (Mapeo de cuantiles). A continuación, se explica brevemente el método implementado.

El Quantile Mapping es un método de postprocesamiento simple que ajusta la función de distribución acumulada (CDF por sus siglas en inglés) de los pronósticos con la CDF de las observaciones usando la ecuación (9).

$$\widetilde{x}_{ajus} = F_{obs}^{-1} (F_{sim} (x_{sim})) \quad (9)$$

Donde:

- \widetilde{x}_{ajus} : Datos ajustados de pronóstico.
- x_{sim} : Datos brutos de pronóstico.
- F_{sim} : Función de distribución acumulada del modelo bruto de pronóstico.
- F_{obs}^{-1} : Función de distribución acumulada inversa de los datos observados.

De esta manera se aproxima los cuantiles empíricos de las predicciones a los cuantiles empíricos de los datos observados (Li et al., 2017)(Figura 14). Para este caso se agregaron los datos de dos formas distintas, una teniendo únicamente en cuenta el mes de lanzamiento y otra con las predicciones agregando por mes y por periodo de anticipación, es decir se tiene una CDF para cada antelación estudiada de los pronósticos lanzados en enero y esta a su vez pasa por otra CDF que corrige los datos observado en enero. Como datos observados en esta corrección de sesgo se ha partido de la base de datos ERA5-land (Romero, 2023).

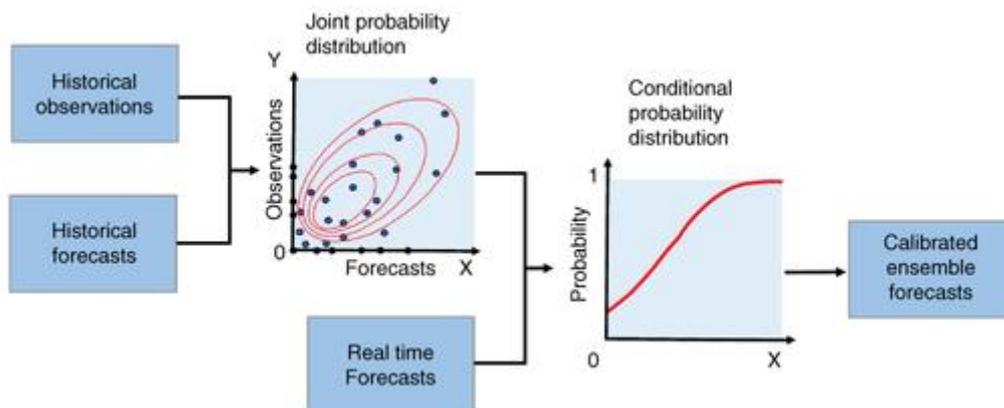


Figura 14. Flujo de postprocesamiento estadístico para la predicción por conjuntos hidrometeorológicos. Fuente: Li et al. (2017)

Los datos proyectados de temperatura del modelo ECMWF del proyecto S2S fueron pasados a datos de evapotranspiración potencial usando la ecuación de Samani – Hargreaves presentada en la sección 3.3.4. Se obtienen así 290 puntos de precipitación y evapotranspiración los cuales se presenta su ubicación en la Figura 15.

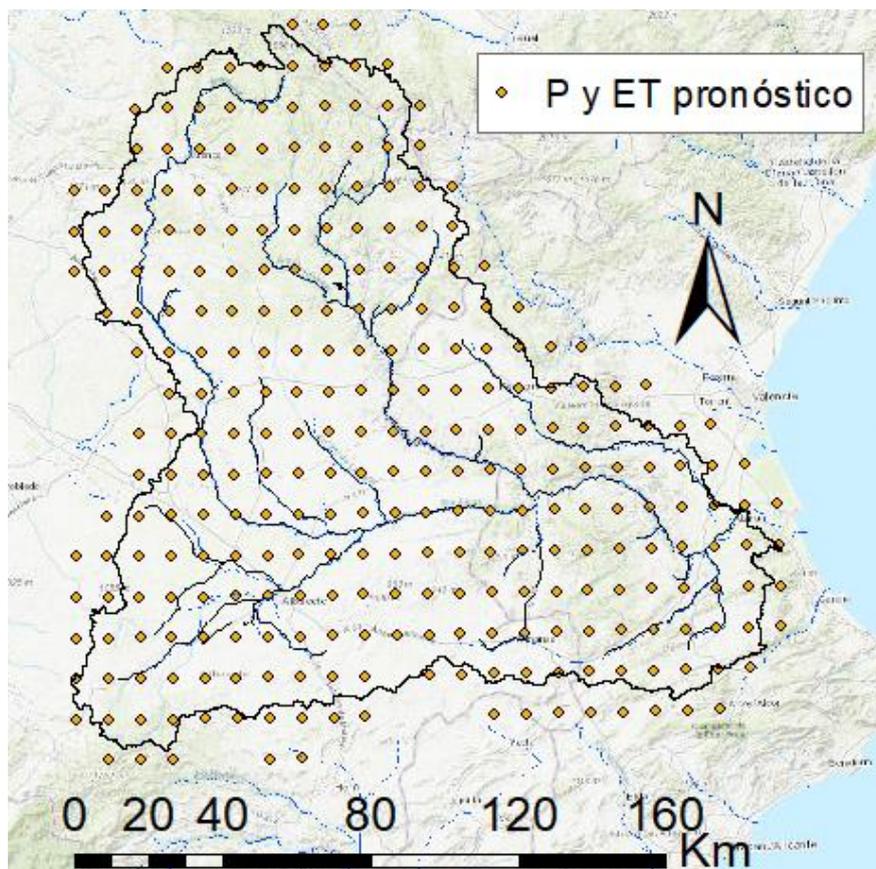


Figura 15. Ubicación datos pronosticados de precipitación y evapotranspiración procesados del modelo ECMWF del proyecto S2S.

2.4.2 Medidas de Desempeño y Estadísticos.

Para medir la capacidad predictora de usar los pronósticos meteorológicos en el modelo hidrológico de TETIS, se hace uso del puntaje (Skill Score) basado en el indicador de Puntuación de Probabilidad Clasificada Continua (CRPS por sus siglas en inglés), partiendo del código generado en la tesis Romero, Sergio, 2023. Este indicador compara la función de distribución obtenida por los datos simulados frente a los datos observados en un mismo período de tiempo, cuan menor sea el CRPS mejor será la calidad de las predicciones probabilísticas ya que mide de diferencia entre las dos curva de función de distribución. Para pronósticos deterministas, el CRPS promedio se convierte en el error absoluto medio y, por lo tanto, tiene una interpretación similar (Mishra et al., 2019), el valor CRPS se calcula con la ecuación (10).

$$CRPS = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{\infty} (F(t) - H(t))^2 dt \quad (10)$$

Donde:

- $F(t)$: Función distribución acumulada de las predicciones para el valor t.
- $H(t)$: Función distribución acumulada de valores observados para el valor t.

El skill Score basado en CRPS se le denomina CRPSS y se puede obtener para este caso mediante una expresión simplificada, la cual se presenta en la ecuación (11).

$$CRPSS = 1 - \frac{CRPS_f}{CRPS_{ref}} \quad (11)$$

Donde:

- $CRPS_f$: CRPS del pronóstico.
- $CRPS_{ref}$: CRPS de referencia climatológico.

El CRPS de referencia permite dar una idea de si el sistema de predicción es mejor a una situación en la que no hay predicciones o se está frente a un modelo naive. El CRPSS toma valor de 1 en predicciones perfectas, y valores sobre cero donde el uso de las predicciones aporte valor y es negativo cuando se considere que se pierda valor predictivo.

2.4.3 Evaluación de Calidad de los Pronósticos Hidrológicos en el Júcar

La evaluación de los pronósticos hidrológicos se realizará sobre las entradas de los embalses principales del Júcar: Alarcón, Bellús, Contreras, Forata y Tous, junto con la estación de aforo de Pajaroncillo, que fue el punto en donde se ha calibrado el modelo hidrológico, y la estación de aforos de Huerto Mulet, que se considera la desembocadura del Júcar. Para cada uno de los 7 puntos de interés, que poseen una calibración puntual del FC7, se simulan los 477 conjuntos de pronósticos en TETIS, los cuales tienen fecha de lanzamiento desde enero 2016 a agosto del 2020, debido a que a partir de octubre del 2020 no se cuenta con la información diaria de los embalses. Además, cada conjunto de pronóstico posee un calentamiento previo de un año con información del ERA5, para obtener así las condiciones iniciales adecuadas de cada pronóstico.

Teniendo en cuenta que cada ensamble posee 51 miembros, se ejecuta TETIS unas 170.766 veces en total. Para esto se tiene un código que automatiza el proceso de generar los ficheros de evento específicos de cada miembro del pronóstico y su respectivo calentamiento. Además de otro código que permite simulaciones múltiples de TETIS para un punto dado con su calibración específica. Vale recordar que cada uno de los puntos de interés tiene una calibración particular, ya que cada uno tiene un FC7 diferente, por lo que para cada punto se tiene un modelo TETIS independiente.

Análisis de caudales

De manera análoga a lo realizado en el trabajo de Romero (2023), Para todos los conjuntos de pronósticos se representa la distribución de los 51 miembros para cada día de antelación por medio de una gráfica box-plot o diagrama de caja. A la par del box-plot se grafican el caudal observado y el caudal simulado por TETIS usando los datos meteorológicos del ERA5.

Debido a la escala de los pronósticos (subestacional), y los patrones observados en los diagramas de caja del caudal, se consideró pertinente el análisis de la información a escala semanal en el *Skill Score*, obteniendo así hasta 6 semanas de antelación (hasta el día 42 de

antelación en los pronósticos diarios). Para esto se agregó semanalmente tanto los caudales observados como los caudales pronosticados, y partir de estos en cada conjunto de pronósticos y para cada uno de los puntos de interés se estimó el valor del CRPS y el CRPSS según la antelación semanal del pronóstico.

Como período referencia en la obtención del CRPSS se usan todos los datos observados durante el mes de lanzamiento del pronóstico en el periodo 2010 -2020. Vale resaltar que los datos considerados como observados varían según el punto de interés, en el caso de Pajaroncillo y Huerto Mulet (Desembocadura) que posee estación de aforo se toman estos, pero en el caso de las entradas de embalses se toma el balance realizado para la calibración del FC7.

Partiendo del CRPSS, se determinó el porcentaje de aciertos (skill) según el mes de lanzamiento y la antelación semanal. Donde este valor indica del total cuantos pronósticos poseen valor predictivo, es decir un CRPSS mayor a cero. En los resultados se presenta el porcentaje de acierto mediante un mapa de calor agrupando la antelación semanal y para cada mes de lanzamiento.

Modelo Perfecto

Se consideró adecuado realizar de manera análoga el análisis realizado con los caudales observados y pronosticados, con los caudales simulados por el modelo usando información meteorológica del ERA5 y los caudales pronosticados. Este análisis nos brinda información sobre la capacidad de acierto de los pronósticos, si se aceptara la lluvia del ERA5 como observada y el modelo hidrológico fuera perfecto. Se entrega entonces igualmente para este escenario un mapa de calor agrupando la antelación semanal y para cada mes de lanzamiento.

Precipitación en la cuenca

Para facilitar discernir si el fallo encontrado en las predicciones de caudal está asociado a los pronósticos de precipitación, se analiza la precipitación del mismo modo que los caudales. Se entregan entonces diagramas de bigotes con la lluvia total sobre la cuenca para cada día con base en los pronósticos del S2S, comparados con la lluvia total diaria en la cuenca obtenida con el ERA5. También se realizan mapa de calor con el porcentaje de acierto del CRPSS, considerando la precipitación del ERA5 como la precipitación observada.

2.4.4 Análisis Sensibilidad de la Agregación Temporal.

Al tratarse de pronósticos subestacional (47 días) se ha decidido obtener el CRPSS para los caudales y precipitación total en una resolución semanal. Aun así se realiza un chequeo de los resultados a escala diaria y promediando las variables entre 2, 3 y 4 semanas, con la finalidad de identificar si los patrones observados en la escala semanal prevalecen en otras resoluciones temporales o detectar mejorías en la capacidad de pronóstico en otras escalas.



Este ejercicio se realiza únicamente para las cuencas de Pajaroncillo, Contreras y Huerto Mulet (Desembocadura), para los casos estudiados anteriormente: caudales, caudales en escenario de modelo perfecto y precipitación.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados de la metodología previamente descrita. Primero se presentan los resultados de la calibración y la validación del modelo hidrológico TETIS, abarcando los índices de bondad obtenidos y analizando el ajuste gráfico de los caudales simulados y observados. De manera análoga se analiza el ajuste del factor corrector de flujo subterráneo profundo en los diferentes embalses.

En el análisis de los pronósticos hidrológicos se presenta los diagramas de caja de bigotes por lanzamiento, el cual permite ver la dispersión de cada uno de los miembros del conjunto, para cada día de antelación, tanto para caudales como para precipitación. También para cada punto de interés se presenta el porcentaje de acierto del CRPSS a través de un mapa de calor, tanto para los caudales, la precipitación y el hipotético modelo perfecto.

Finalmente se presentan un análisis de diferentes agregaciones temporales para las estaciones Pajaroncillo, Contreras y Huerto Mulet, en cada uno de las variables y escenarios evaluados.

3.1 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE TETIS

En la Tabla 9 se presentan los factores correctores que arrojaron el mejor ajuste encontrado en el proceso de calibración en la estación Pajaroncillo y en esta sección se presentan los resultados tanto de la calibración, como de la validación temporal, espacial y espaciotemporalmente. En la validación espacial, se he verificado en el periodo de calibración en distintos puntos de aforo diferentes a Pajaroncillo, en 7 estaciones de aforo de SAIH-ROEA: 1) Alcalá del Júcar; 2) Belmontejo en Alarcón; 3) El Castellar en Alarcón; 4) Huerceemes en Contreras; 5) Villora en Contreras; 6) Forata en Requena; y 7) Huerto Mulet,

Tabla 9. Valores de los factores correctores tras el proceso de calibración en la estación Pajaroncillo.

Factor Corrector	Parámetro del modelo	Valor Calibración
FC1	Almacenamiento estático	1.53
FC2	Evapotranspiración	0.599
FC3	Infiltración	0.0782
FC4	Escorrentía directa	1.1773
FC5	Percolación	0.1519
FC6	Interflujo	19.9239
FC7	Flujo subterráneo profundo	0.0287
FC8	Flujo base	23.1849
FC9	Velocidad en la red de flujo	0.033

Además de la validación espacial, se ha validado en las mismas estaciones de aforo mencionadas en el apartado anterior de manera espaciotemporal, considerando el periodo de validación temporal utilizado en la estación de Pajaroncillo. El periodo de calibración comprende desde el 2015 a octubre del 2018, con un periodo de calentamiento de todo el 2014, mientras que el periodo de validación va de inicios del 2010 a finales del 2015, tomando un periodo de calentamiento de todo el 2009. Para mostrar la bondad del ajuste de la calibración se presentan el valor obtenido en el índice de Nash-Sutcliffe (NSE), error en volumen en porcentaje (BE) y el error cuadrático medio (RMSE).

3.1.1 Período de calibración en Pajaroncillo.

En la calibración se ha encontrado un NSE= 0.55, un BE= 5.5% y un RSME= 2.3, considerándose un buen ajuste, más aun teniendo en cuenta que el error en el volumen es bastante pequeño. Para ayudar a la visualización de los resultados se ha procedido a graficar el hidrograma (Figura 16), en el cual puede observarse que se aciertan los picos, y las bajadas, aunque hay un poco de problemas en la representación de la recesión a finales del 2017.

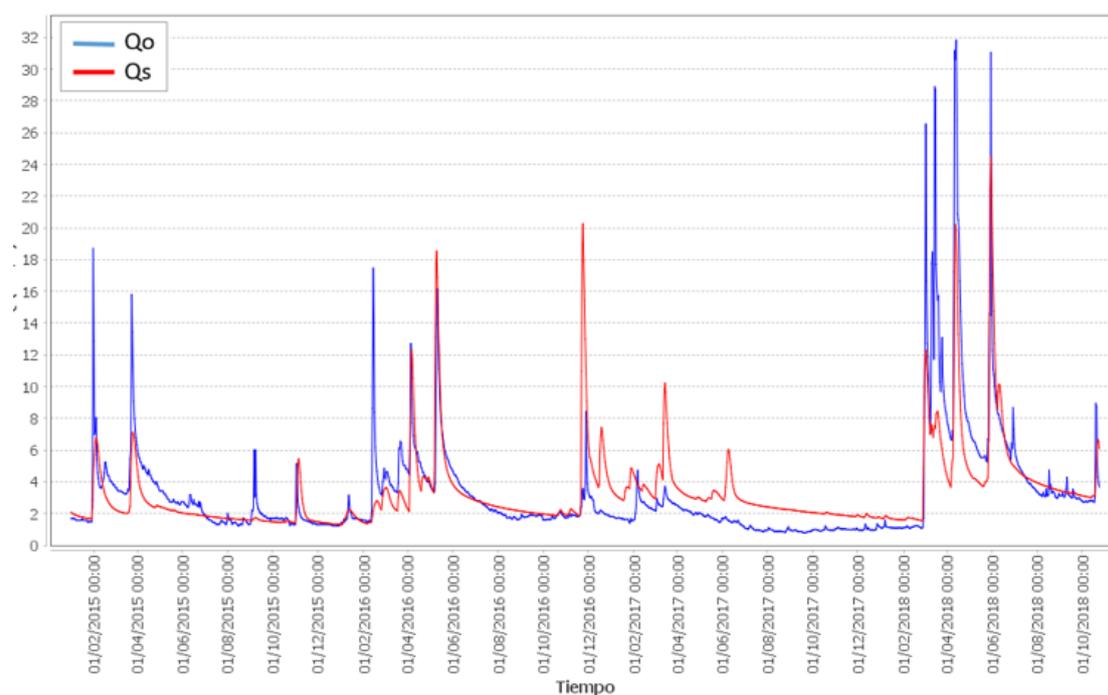


Figura 16. Hidrograma de caudales observados y simulados en Pajaroncillo para el periodo de calibración.

3.1.2 Validación temporal en Pajaroncillo.

Al igual que en el periodo de calibración, para el periodo de validación se han evaluado los mismos índices de bondad, dando NSE = 0.08, BE = -32% y RMSE = 4.5, a pesar de que los caudales simulados se encuentran generalmente subestimados, principalmente al inicio, el

comportamiento y el hecho que se pueda reproducir un hidrograma coherente da una idea de que el modelo es robusto y estable al momento de validarlo temporalmente (Figura 17). También se considera que el calentamiento es sensible en estos resultados, ya que el período 2009 se presenta caudales muy bajos y solo a finales aumentan rápidamente, si bien el calentamiento de un año fue recirculado hasta 3 veces para esta modelación, al recircular todo el modelo dos veces para la validación temporal se encuentra que el NSE pasa a ser de 0.24, indicando que los valores bajo de la validación están más asociados a no poder tomar los picos iniciales.

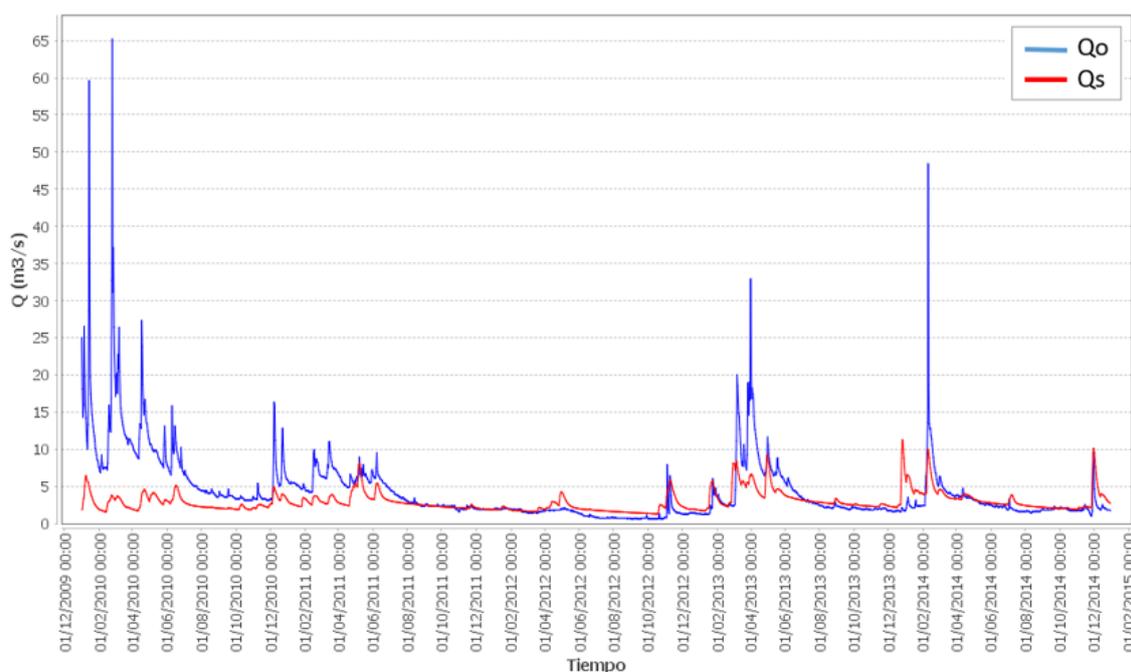


Figura 17. Hidrograma de caudales observados y simulados en Pajaroncillo para el periodo de validación

3.1.3 Validación espacial en estaciones de aforo de la CHJ.

Una vez validado temporalmente el modelo, se ha procedido a la validación espacial, es decir, se ha evaluado la robustez del modelo en las estaciones mencionadas previamente en la CHJ: 1) Alcalá del Júcar; 2) Belmontejo en Alarcón; 3) El Castellar en Alarcón; 4) Huercemes en Contreras; 5) Villora en Contreras; 6) Forata en Requena; y 7) Huerto Mulet.

En la estación Alcalá del Júcar en el periodo de calibración se visualiza que los caudales simulados se encuentran generalmente sobreestimados y genera picos donde no los hay, aunque el comportamiento de la serie temporal observada presenta una forma de picos abruptos y mesetas, parecido al de una serie regulada no natural (Figura 18). Presenta un $NSE=-9.2$, un $BE=183\%$ y un $RMSE=19.5$

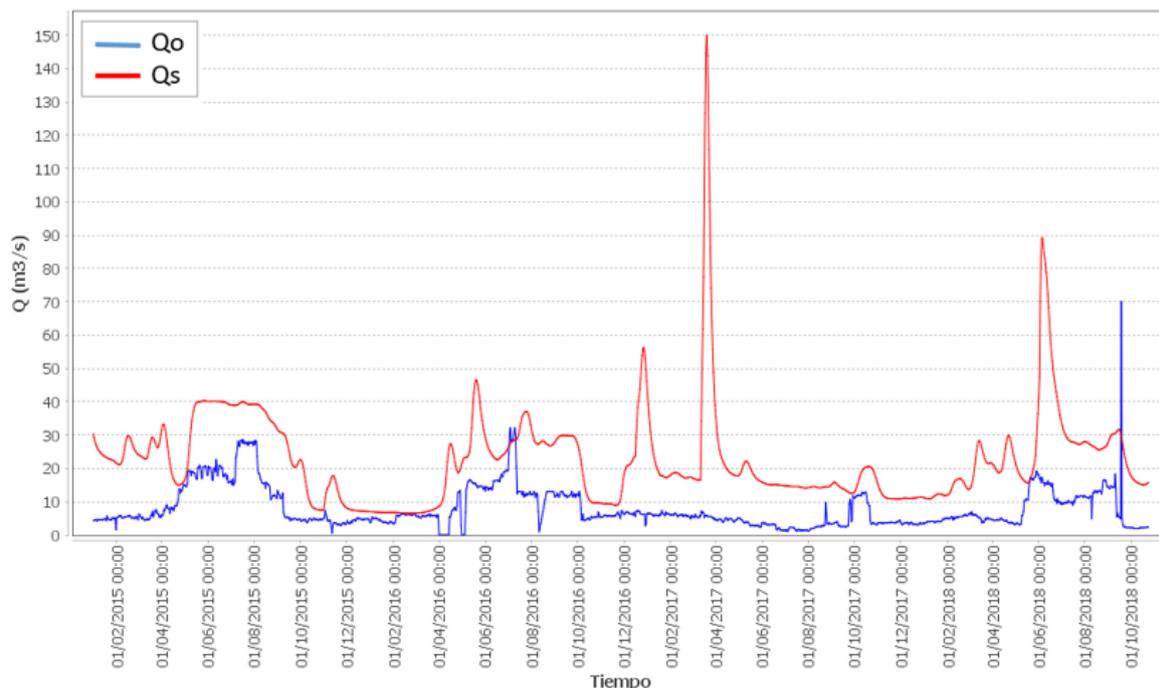


Figura 18. Hidrograma de caudales observados y simulados en Alcalá del Júcar para el periodo de calibración.

En la estación de Belmontejo en el periodo de calibración se visualiza que los caudales simulados se encuentran generalmente sobreestimados y al igual que en la estación Alcalá del Júcar se presenta en el modelo picos no presente en la serie observada (Figura 19). Presenta un NSE= -12.5, un BE= 104% y un RMSE= 0.8

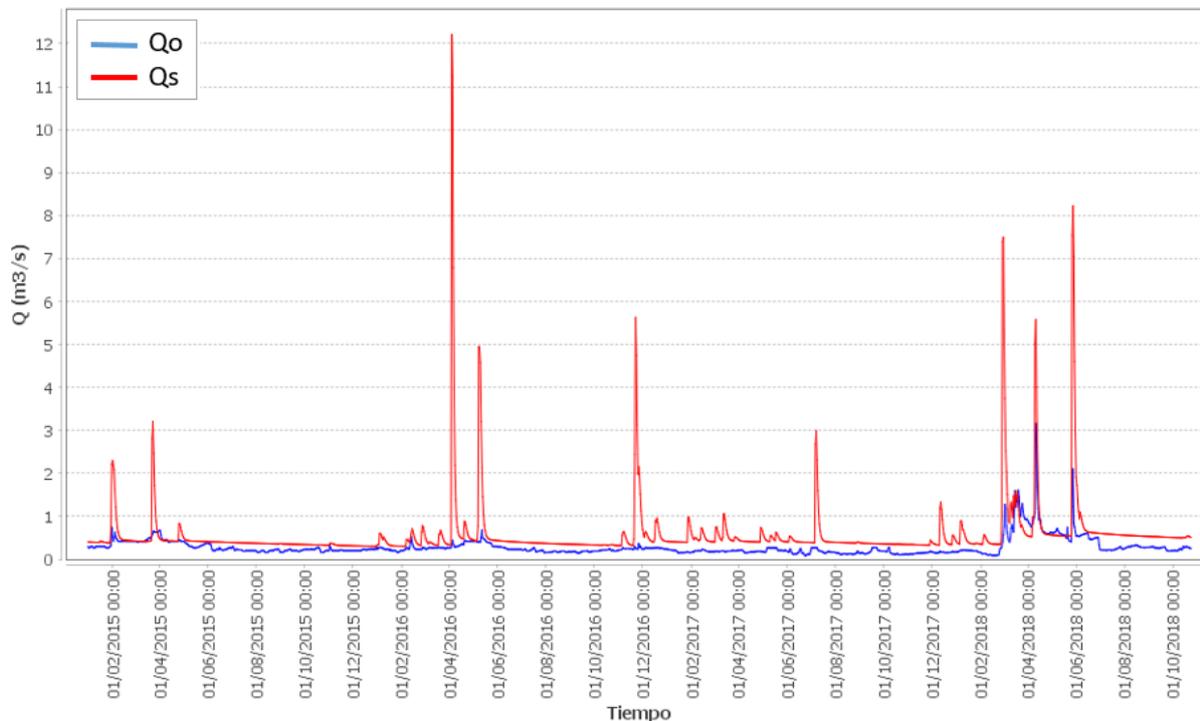


Figura 19. Hidrograma de caudales observados y simulados en Belmontejo para el periodo de calibración.

En la estación de El Castellar en el periodo de calibración se visualiza que los caudales simulados se encuentran generalmente sobrestimados, y que por lo general sigue bastante bien la serie observada, salvo un pico al inicio del 2016, representando mejor el patrón de

variación (Figura 20). Esta serie observada tiene un comportamiento más natural que las anteriores y presenta un NSE=0.53, un BE= 32% y un RMSE= 6.8, presentando un Nash casi tan buenos como la calibración misma.

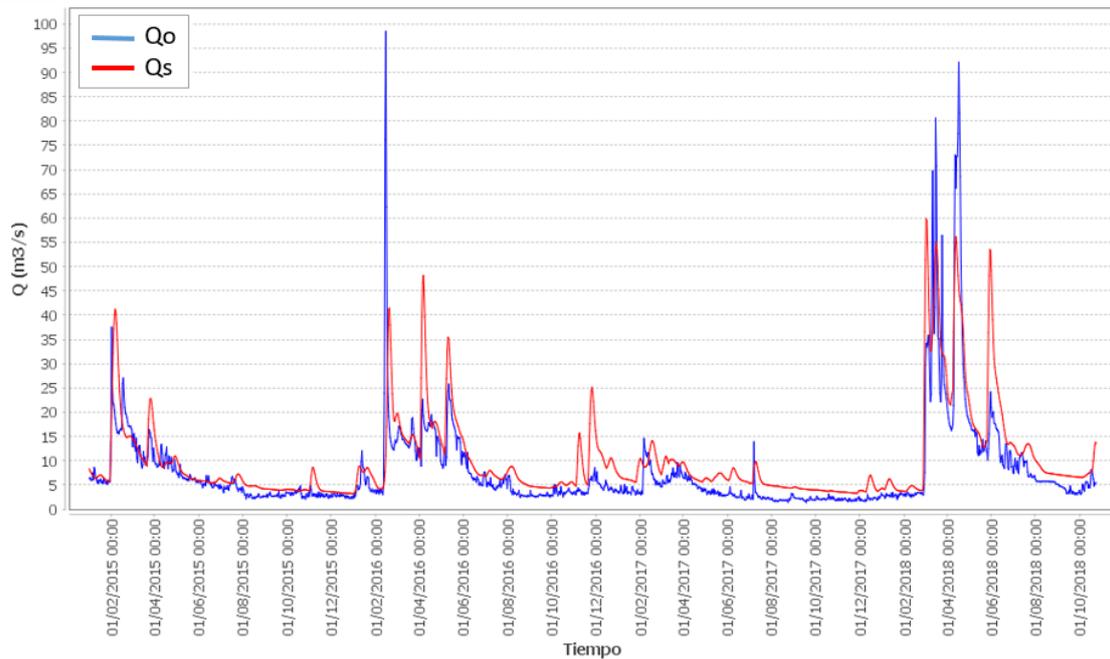


Figura 20. Hidrograma de caudales observados y simulados en El Castellar para el periodo de calibración.

En la estación de Huercemes en el periodo de calibración se visualiza que los caudales simulados están sobreestimados, y que por lo general no consigue representar bien la serie observada, salvo en algunos los picos, que al menos consigue acertar los momentos en los cuales se producen, pero en para finales del 2016 e inicios del 2017 se generan en la simulación picos no observados (Figura 21). Presenta un NSE=-22.4, un BE = 780% y un RMSE= 4.2

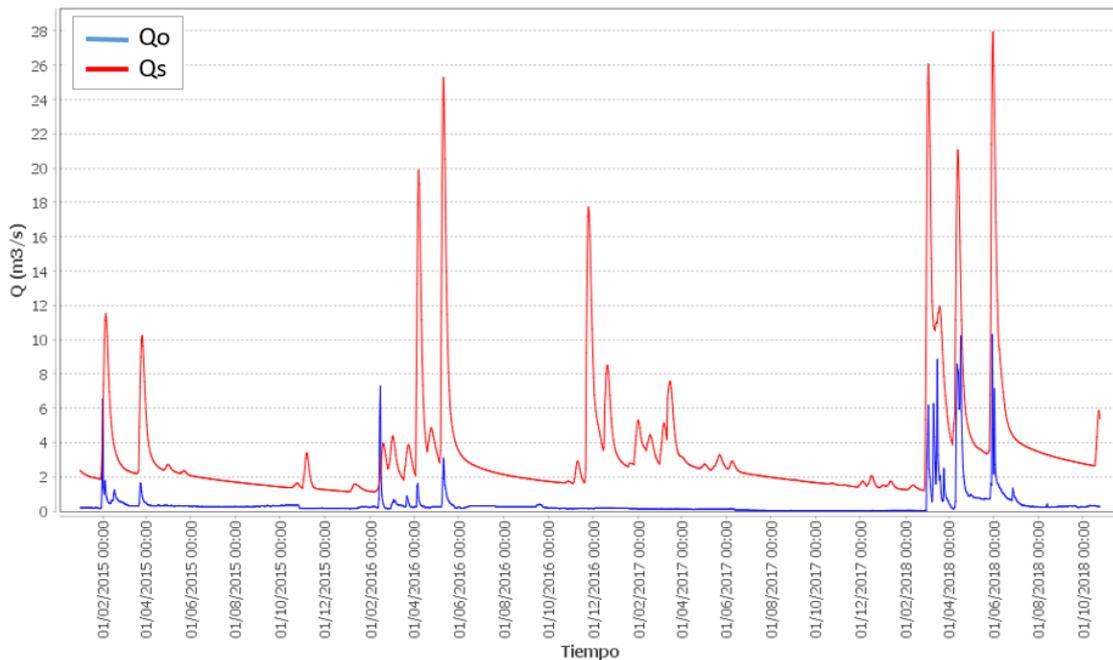


Figura 21. Hidrograma de caudales observados y simulados en Huercemes para el periodo de calibración.

En la estación de Villora en el periodo de calibración, se visualiza que los caudales simulados se encuentran generalmente subestimados, pero representa la oscilación de la serie observada, salvo en el año 2017 que presenta un comportamiento poco natural y se atribuye a problemas en la medición (Figura 22). Presenta un valor de NSE= -0.04, de BE= -37% y un RMSE= 5.6 en los que seguramente influye las fallas en la medición del 2017.

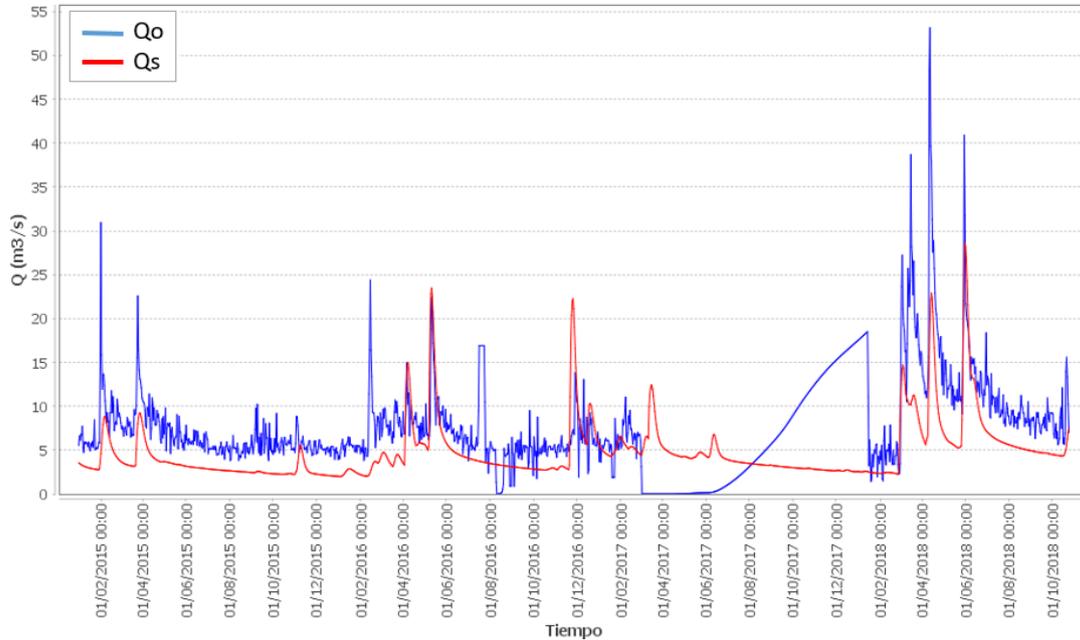


Figura 22. Hidrograma de caudales observados y simulados en Villora para el periodo de calibración.

En la estación de Requena en el periodo de calibración se visualiza que los caudales simulados se encuentran sobreestimados, aunque la serie simulada reproduce los picos presentados en la serie observada, pero de manera más exagerada (Figura 23). Esta serie presenta un NSE= -42.2, un BE= 733% y un RMSE= 1.9.

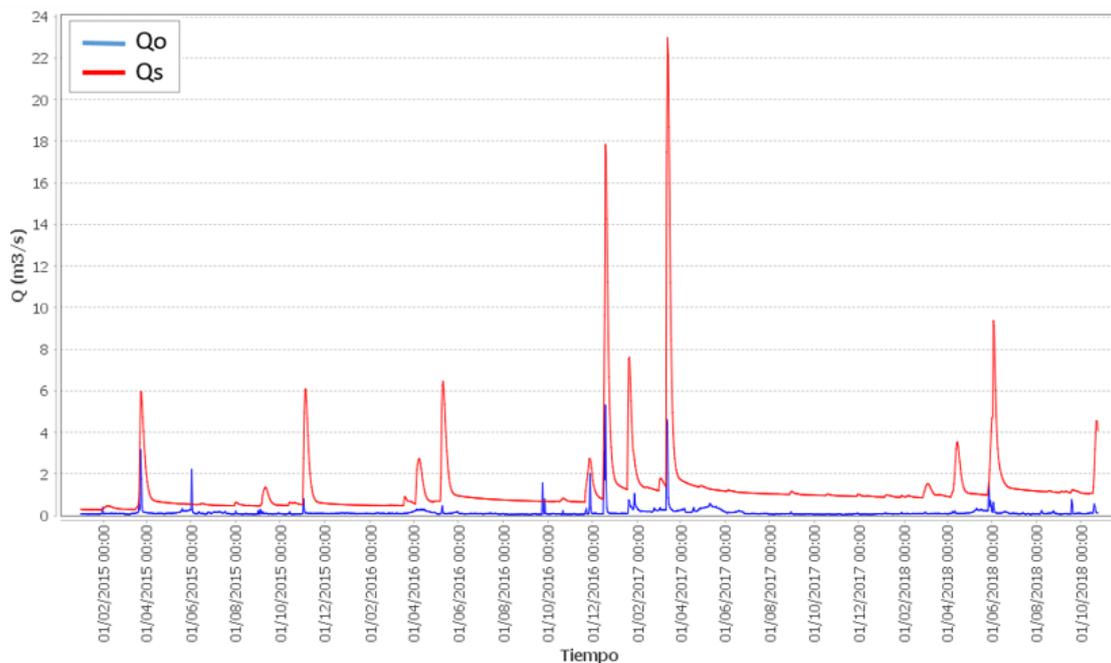


Figura 23. Hidrograma de caudales observados y simulados en Requena - Forata para el periodo de calibración.

En la estación de Huerto Mulet en el periodo de calibración se visualiza que los caudales simulados se encuentran ligeramente sobreestimados, aunque la serie simulada consigue reproducir los patrones de subida y descenso del hidrograma observado, sobre todo los picos pronunciados (Figura 24). Aun así la serie presenta $NSE = -0.59$ y un $BE = 72\%$ y un $RMSE = 19.3$, que no se consideran los mejores, pero la captura de la forma del hidrograma se considera satisfactoria.

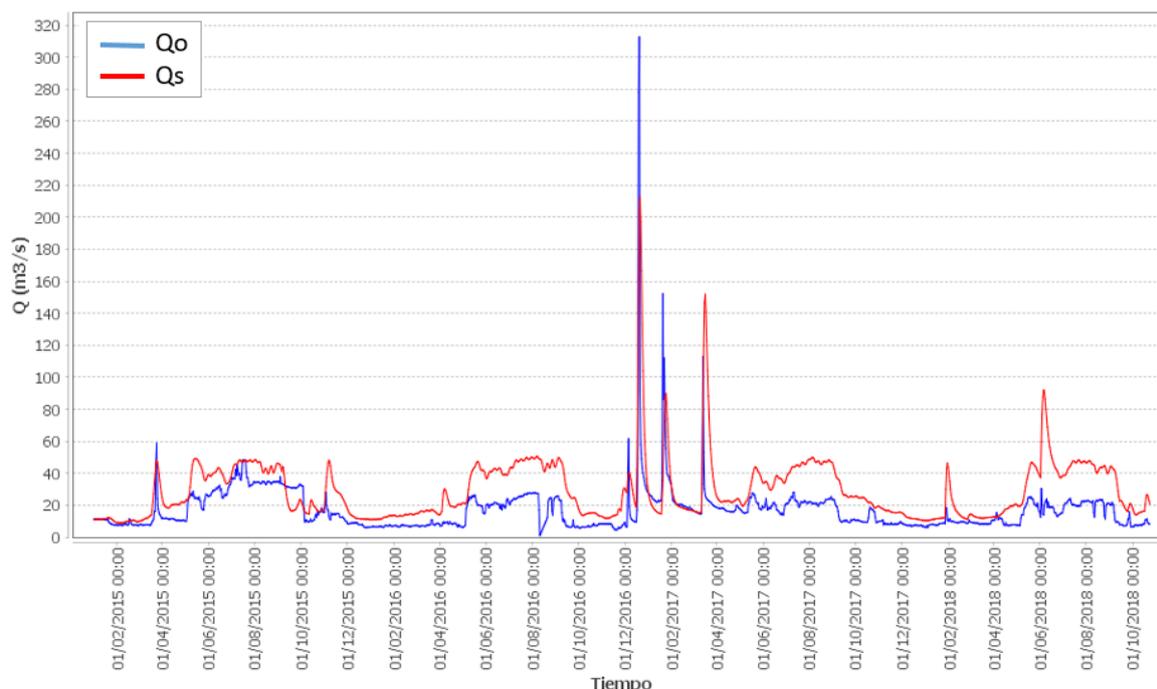


Figura 24. Hidrograma de caudales observados y simulados en Huerto Mulet para el periodo de calibración.

3.1.4 Validación espacio-temporal en estaciones de aforo de la CHJ.

Una vez validado temporal y espacialmente el modelo, se ha procedido a la validación espaciotemporal, es decir, se ha evaluado la robustez del modelo en las estaciones mencionadas previamente y evaluadas en el apartado anterior, esta vez en el periodo de validación: 1) Alcalá del Júcar; 2) Belmontejo en Alarcón; 3) El Castellar en Alarcón; 4) Huercemes en Contreras; 5) Villora en Contreras; 6) Forata en Requena; y 7) Huerto Mulet.

En la estación Alcalá del Júcar en el periodo de validación se visualiza que los caudales simulados se encuentran sobreestimados, no consiguiendo representar en este periodo esta estación de manera adecuada, aunque el pico inicial de la modelación se asocia más a una mala representación en el periodo de calentamiento (Figura 25). Esta serie presenta un $NSE = -30.1$, un $BE = 211\%$ y un $RMSE = 13.36$.

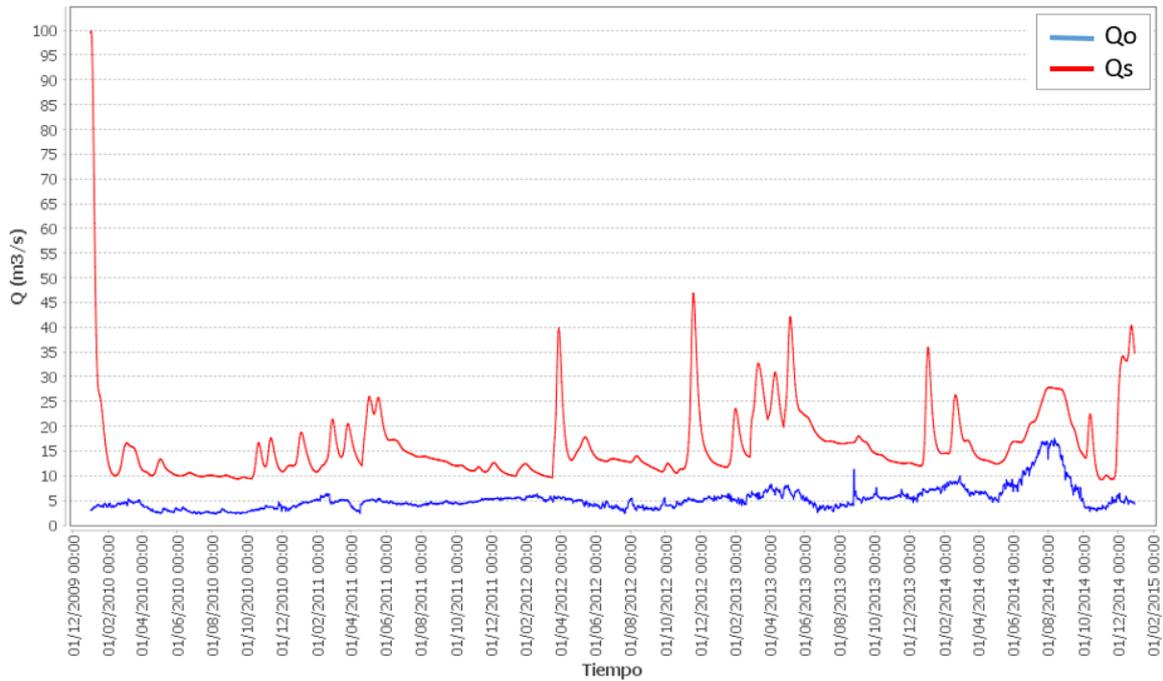


Figura 25. Hidrograma de caudales observados y simulados en Alcalá del Júcar para el periodo de validación

En la estación de Belmontejo en el periodo de validación se visualiza que los caudales simulados se encuentran casi siempre sobreestimados, representando picos muchos más marcados a los observados salvo al inicio del 2010 (Figura 26), Esta serie posee un NSE= -2.1, un BE= 23% y un RMSE= 0.7.

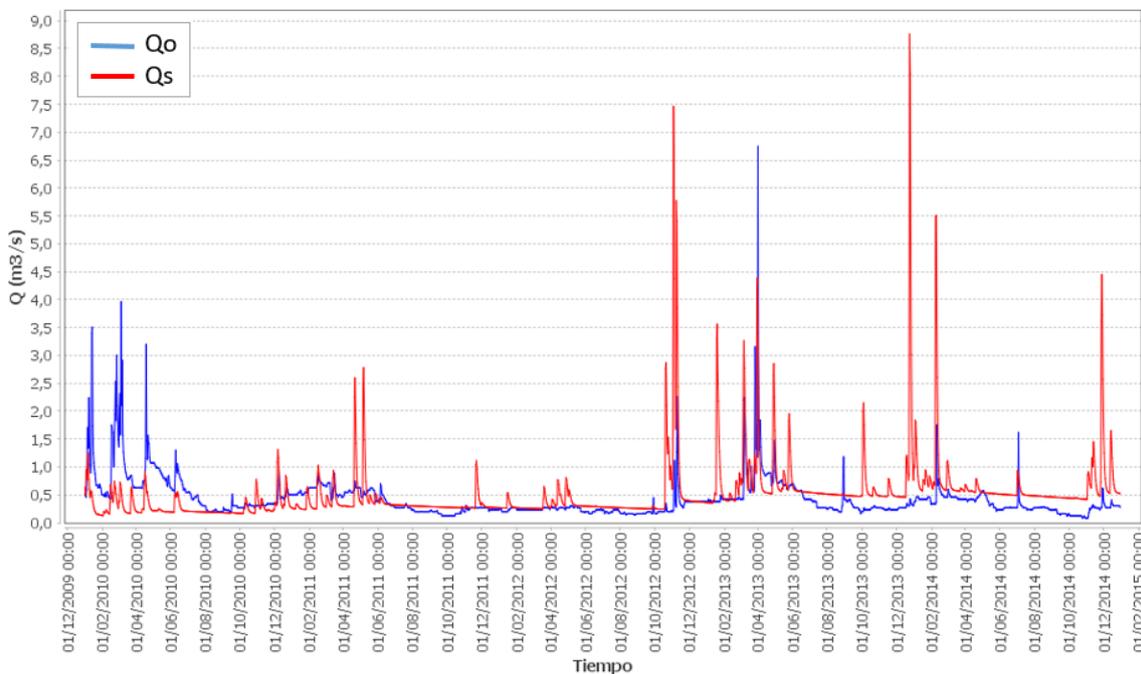


Figura 26. Hidrograma de caudales observados y simulados en Belmontejo para el periodo de validación.

En la estación de El Castellar en el periodo de validación se puede ver una representación bastante satisfactoria del caudal observado mediante la serie simulada, obteniendo así un NSE= 0.63, un BE= 10% y un RMSE= 6.6. (Figura 27).

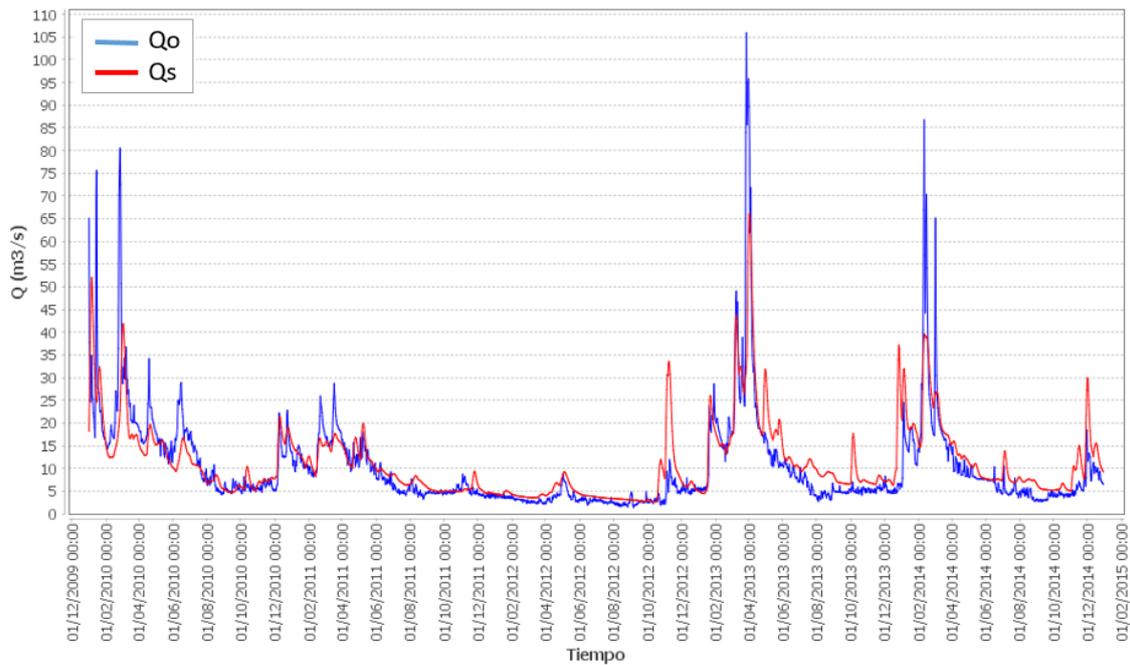


Figura 27. Hidrograma de caudales observados y simulados en El Castellar para el periodo de validación.

En la estación de Huerce mes en el periodo de validación no se ha conseguido representar bien los valles de la serie observada. La modelación sobreestima los caudales marcando más los picos y con un caudal base mucho mayor pero con oscilaciones similares (Figura 28). Esta serie presenta un NSE = -2.6, un BE= 202% y un RMSE =2.9.

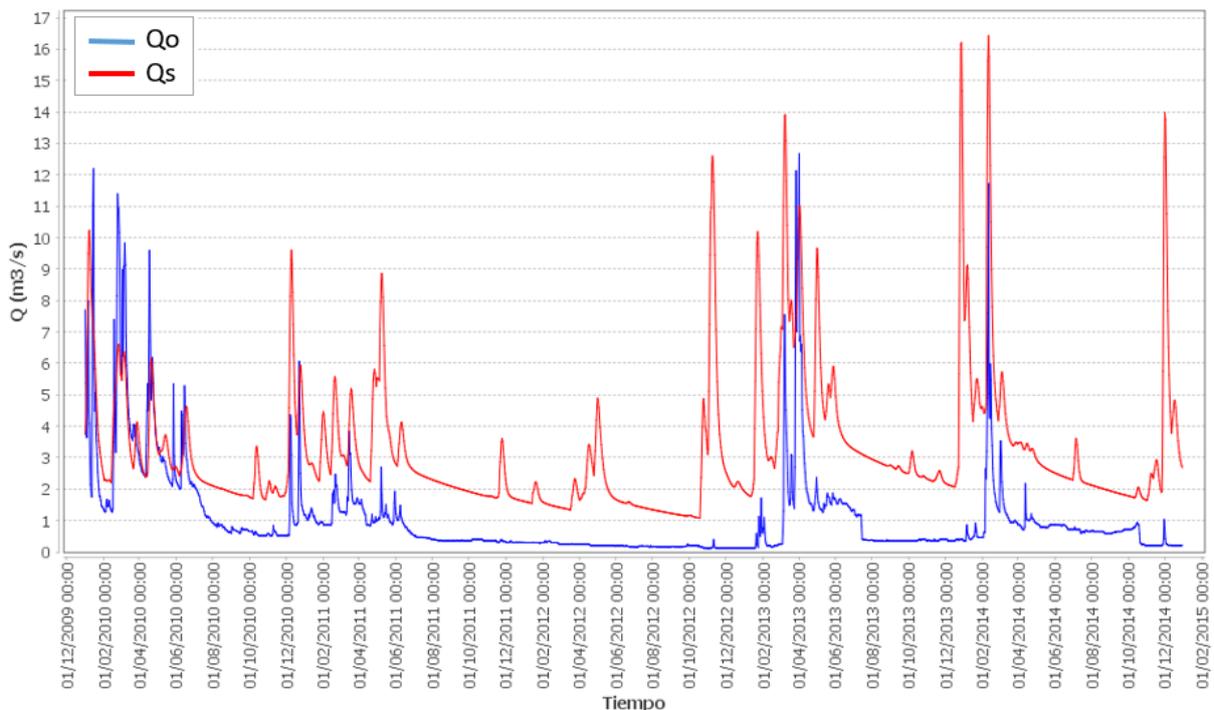


Figura 28. Hidrograma de caudales observados y simulados en Huerce mes para el periodo de validación.

En la estación de Villora en el periodo de validación visualiza que los caudales simulados se encuentran generalmente subestimados, especialmente al inicio de la simulación tal vez por el mismo error de calentamiento presente en la estación Pajaroncillo (estaciones cercanas de

medición). Aun así las oscilaciones de los caudales observados son capturadas por el modelo y presenta un NSE= -0.33, un BE= -52% y un RMSE= 7.4 (Figura 29).

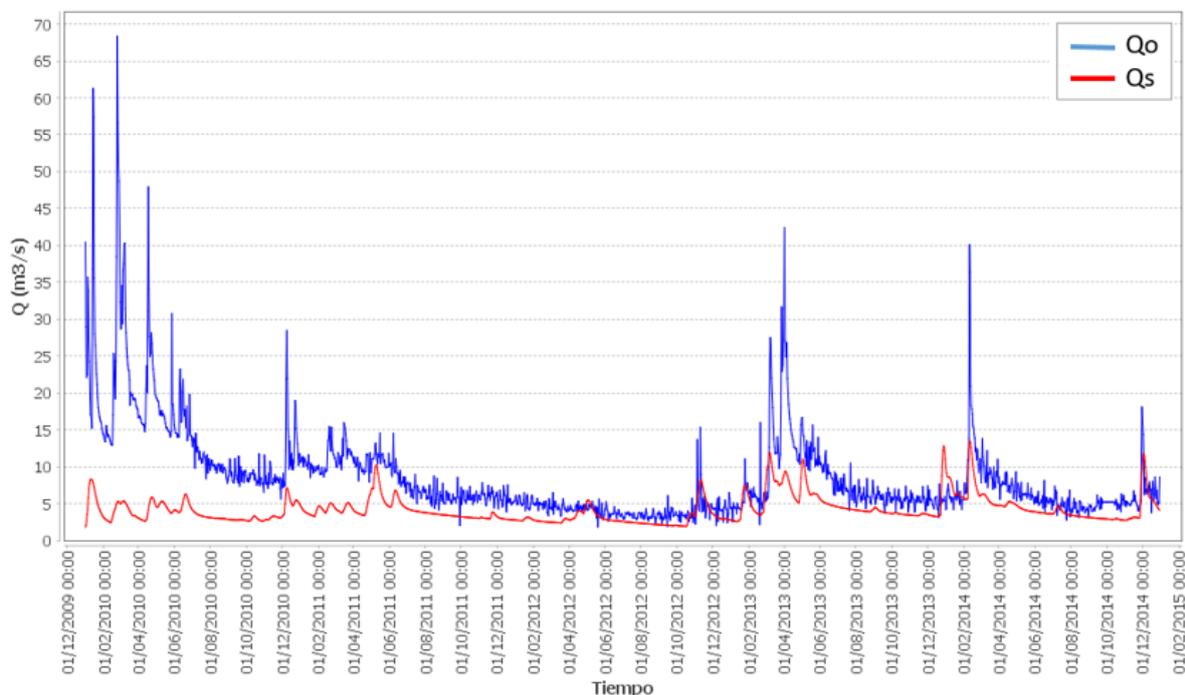


Figura 29. Hidrograma de caudales observados y simulados en Villora para el periodo de validación.

En la estación de Requena en el periodo de validación se visualiza que los caudales simulados se encuentran generalmente sobreestimados (comportamiento similar al periodo de calibración) generando picos más exagerados a los observados y un caudal base mayor (Figura 30). Para este periodo la serie presenta un NSE= -104.0, un BE=549% y un RMSE= 1.2.

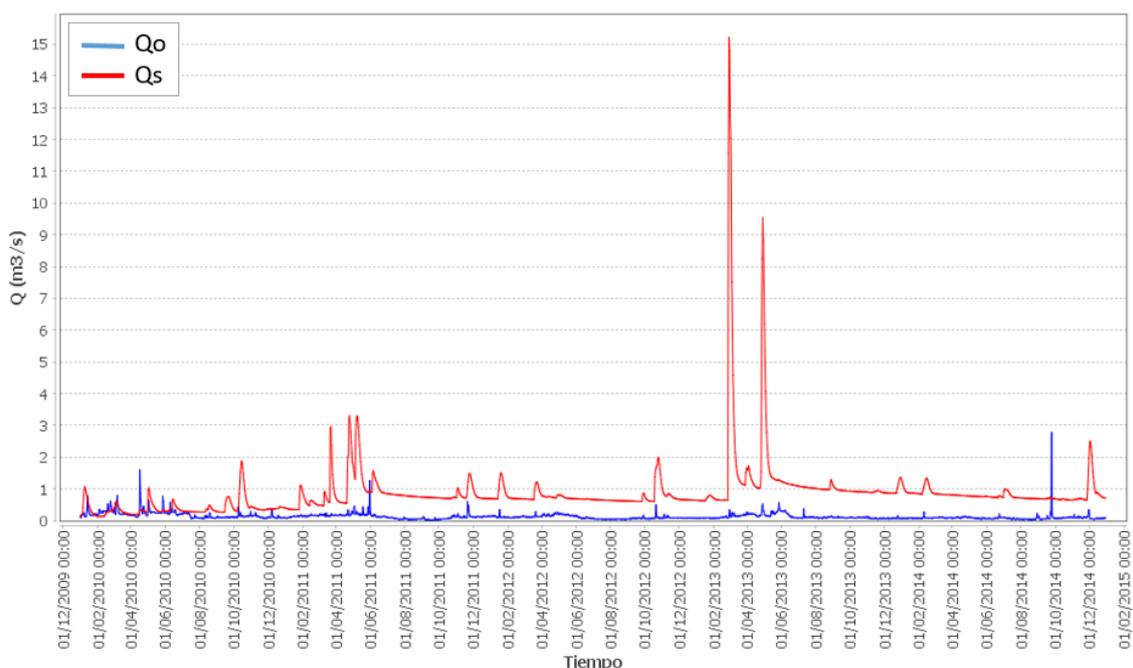


Figura 30. Hidrograma de caudales observados y simulados en Requena para el periodo de validación.

En la estación de Huerto Mulet en el periodo de validación se visualiza que los caudales simulados se tienden a ser sobreestimados, aunque la serie simulada consigue reproducir en casi todos los cambios de subidas y bajadas los patrones del hidrograma observado, aun así los datos observados de la mitad del 2013 están ausentes (Figura 31). La serie en este periodo presenta un NSE= -0.86, BE= 45% y un RMSE =12.2.

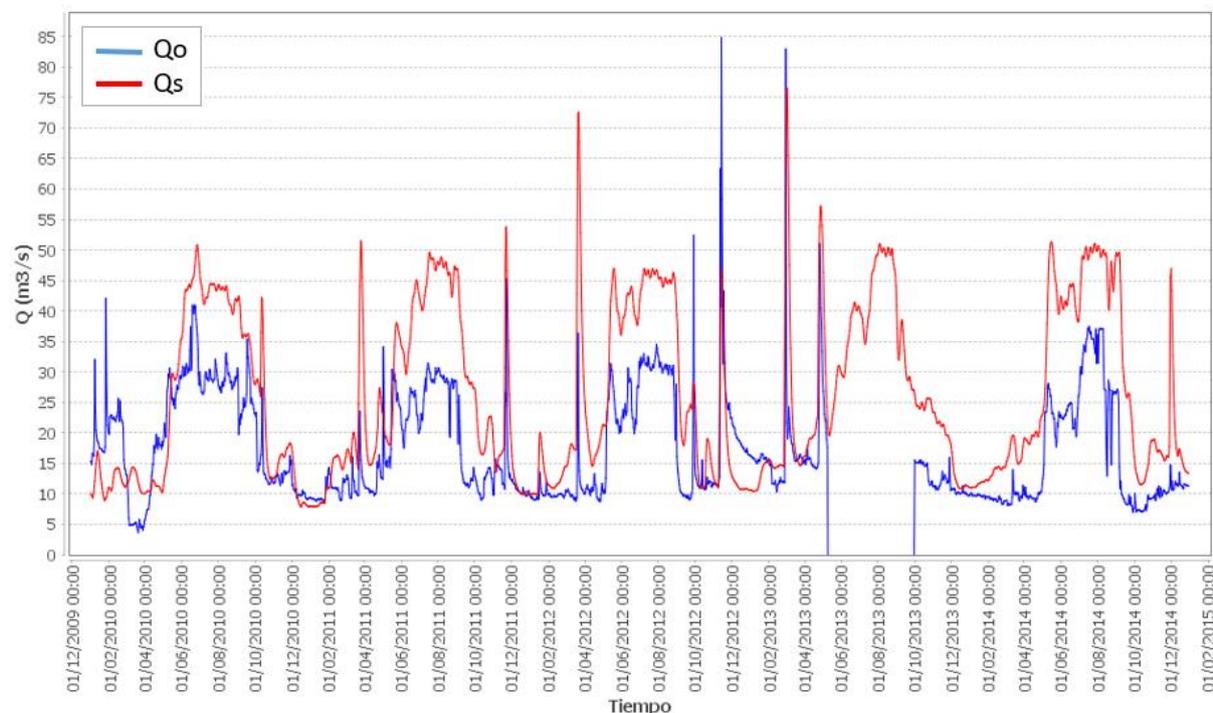


Figura 31 Hidrograma de caudales observados y simulados en Huerto Mulet para el periodo de validación.

En la Tabla 10 se presenta un resumen de los diferentes índices de bondad encontrados en la validación espacial y espaciotemporal.

Tabla 10. Resumen de los índices de bondad en la validación espacial y espaciotemporal.

	Validación Espacial			Validación Espacio-temporal		
	NSE	BE	R2	NSE	BE	R2
Alcala del Júcar	-9.18	183.4	19.5	-30.17	211.5	13.4
Belmontejo (Alarcón)	-12.54	104.3	0.8	-2.06	23.2	0.7
El Castellar (Alarcón)	0.53	32.3	6.6	0.63	10.2	6.6
Villora (Contreras)	-0.05	-37.1	5.6	-0.34	-51.6	7.4
Huerceme (Contreras)	-22.36	780.1	4.2	-2.60	202.3	2.9
Requena (Forata)	-42.16	733.1	1.9	-104.00	549.7	1.2
Huerto Mulet (Desembocadura)	-0.59	72.5	19.3	-0.86	45.1	12.2

3.1.5 Calibración Flujo Subterráneo Profundo (FC7) En Los Embalses del Júcar.

Como se mencionó anteriormente, se considera pertinente calibrar este factor de percolación profunda para cada uno de los diferentes embalses, ya que este puede presentar variabilidad significativa de uno a otro. Para calibrar este factor se estimó la entrada a los embalses a partir de balance con la información de reservas y salidas de estos, además de estaciones aguas arriba que permitieran contrastar los resultados. Los embalses a los que se le calibra el FC7 son Alarcón, Bellús, Contreras, Complejo Cortes, Escalona, Forata, Toba, Tous y Huerto Mulet (Desembocadura).

El factor corrector de pérdidas subterránea más apropiado que se encontró para el embalse de Alarcón fue de $FC7=0.065$. Si bien en los primeros meses se subestima el caudal, a partir de octubre del 2010 se considera un buen ajuste a la línea base, pero sin lograr tomar la total magnitud de los picos (Figura 32). Esta simulación presenta un $NSE=0.40$, siendo de los mejores obtenidos, un $BE=-15.1\%$ y un $RMSE=7.8$.

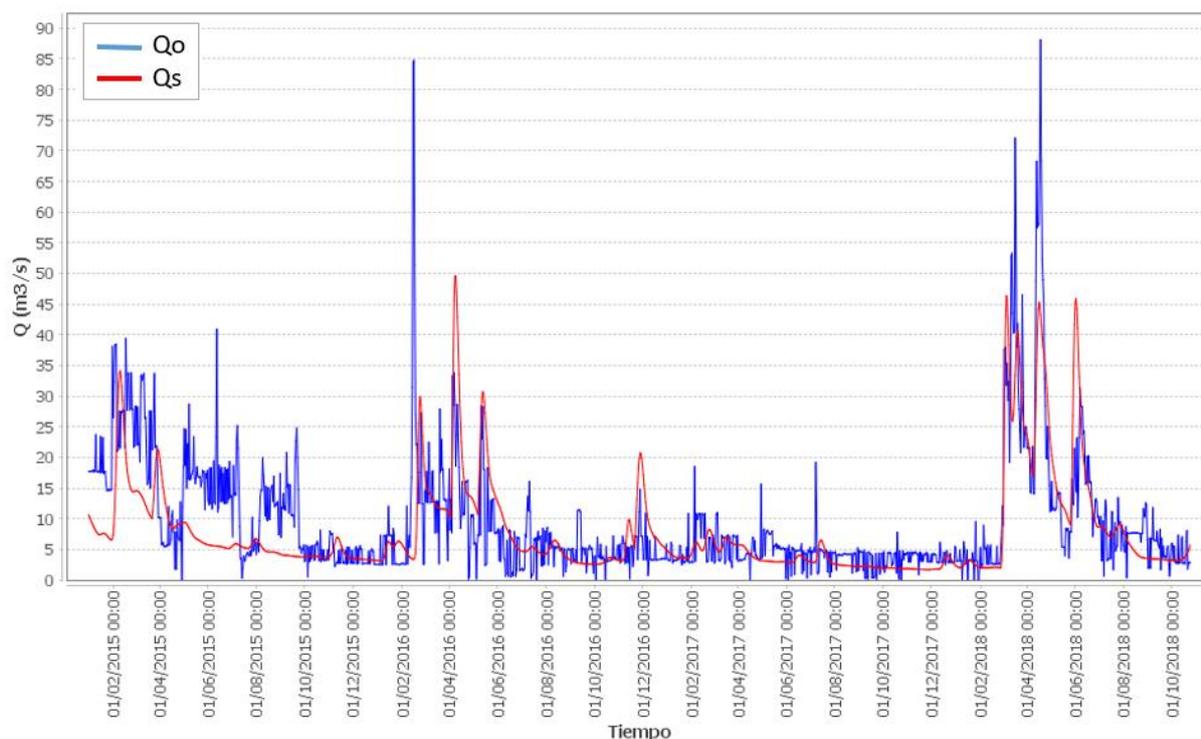


Figura 32. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Alarcón en calibración del FC7.

El factor corrector de pérdidas subterránea más apropiado que se encontró para el embalse de Bellús fue de $FC7=0.08$. El modelo logra representar el caudal medio base de manera adecuada y simular los picos de los eventos, pero falla en su magnitud, subestimándolos a finales del 2016 e inicios del 2017 y sobreestimándolos en el resto de la simulación (Figura 33). La modelación presenta un $NSE=0.11$, $BE=30.4\%$ y un $RMSE=6.3$

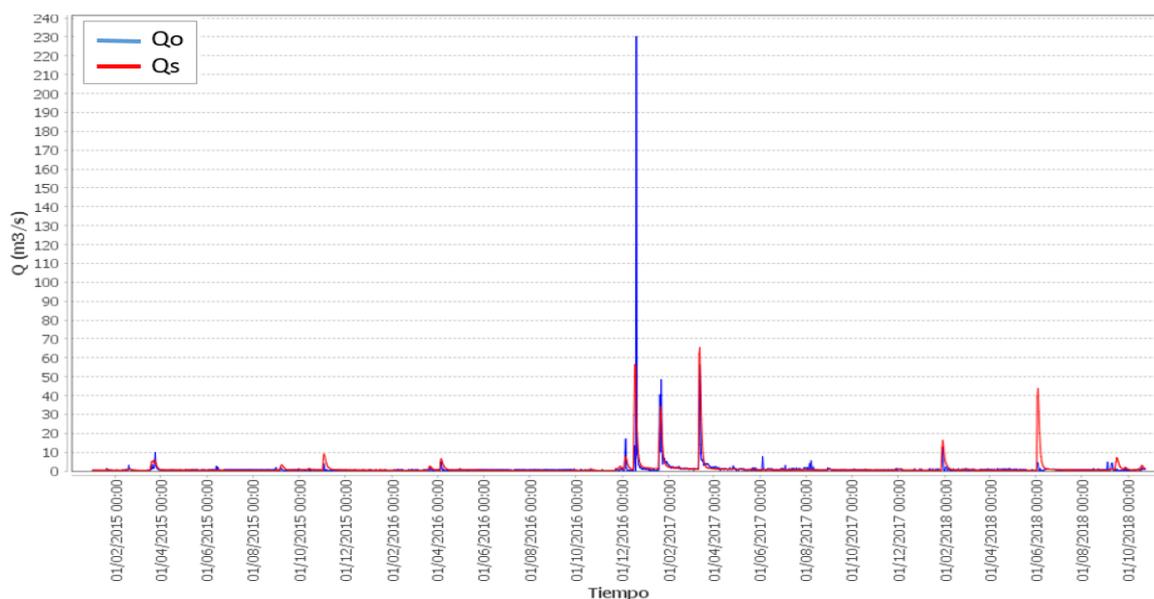


Figura 33. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Bellús en calibración del FC7.

Como se mencionó anteriormente, para la calibración de FC7 de contreras se decidió usar la suma de las estaciones disponibles aguas arriba del embalse: Villora, Huerce, Villora 2 y Camporroble, afectadas por un factor de área, ya que presentaban un mejor hidrograma que el generado por balance. Aunque se considera mejor la representación de la suma, en el 2017 se presentan fallas en medidas de la estación Villora (Figura 22) y esta representa el 37% del área drenada de la cuenca y un 83% del total de los aforos medidos por las estaciones. Al realizar la calibración se encontró que el FC7 usado en la estación Pajaroncillo representaba el mejor ajuste encontrado, algo coherente ya que la estación Pajaroncillo se encuentra en la cuenca del embalse Contreras. El modelo simula de manera satisfactoria el flujo base, representando las oscilaciones observadas, pero presenta algunas fallas en representar la magnitud de los picos (Figura 34). Los caudales simulados presentan un NSE= -0.07, BE= 5.4% y un RMSE= 8.1, vale aclarar que en estos valores no se consideró el período de 01/04/2017 al 01/02/2018 que es el que presenta fallas en la estación Villora.

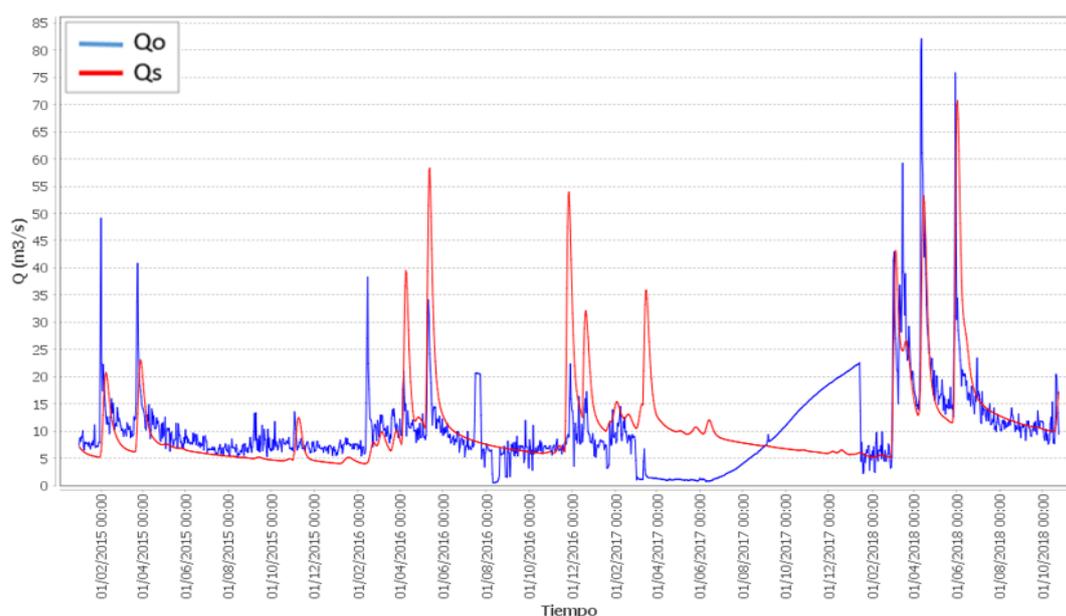


Figura 34. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Contreras en calibración del FC7.

Igualmente que el caso de Contreras, para el embalse de Cortes se consideró más adecuado el uso de la suma de las estaciones Conferentes y Alcalá del Júcar, afectadas por un factor de área. El factor corrector de pérdidas subterráneas más apropiado que se encontró para el embalse de Cortes fue de $FC= 0.05$. En esta simulación se logra tener el flujo base y la oscilación del hidrograma, pero la simulación durante los años 2017 y 2018 presentan picos que no están presente en los caudales observados (Figura 35). La simulación presenta un valor de $NSE= -1.2$, un $BE= 27\%$ y un $RMSE 16.25$.

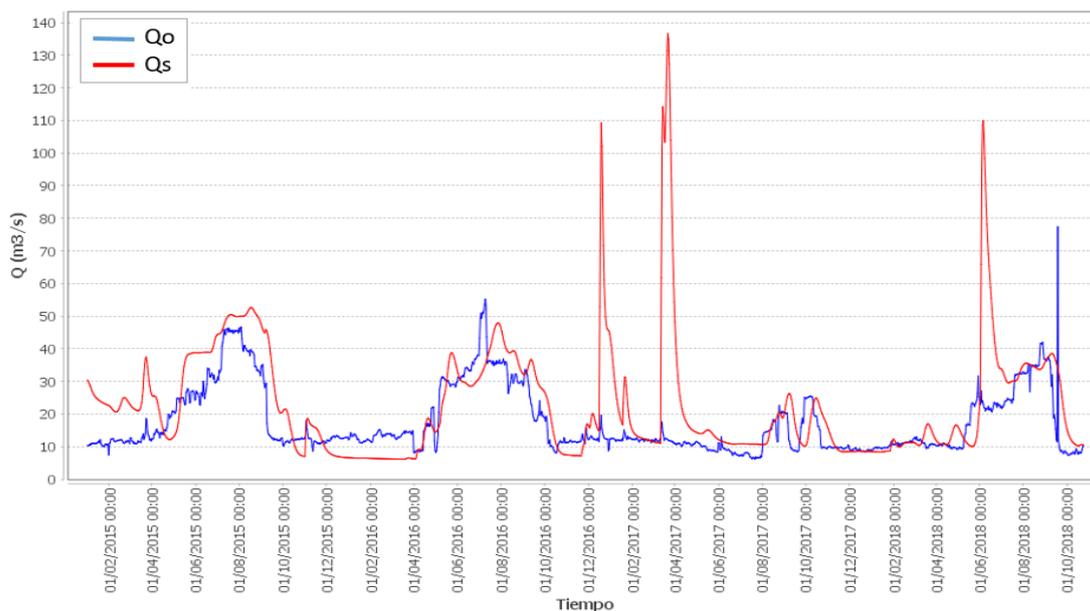


Figura 35. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Cortes en calibración del FC7.

El factor corrector de pérdidas subterráneas más apropiado que se encontró para el embalse de Escalona fue de $FC7= 0.045$. Se puede observar que el caudal simulado representa varios picos inexistentes en el caudal observado, e incluso tiende a sobreestimar el valor de los picos que sí representa (Figura 36). La serie simulada presenta un $NSE=-2.6$, un $BE=94\%$ y un $RSME=4.7$.

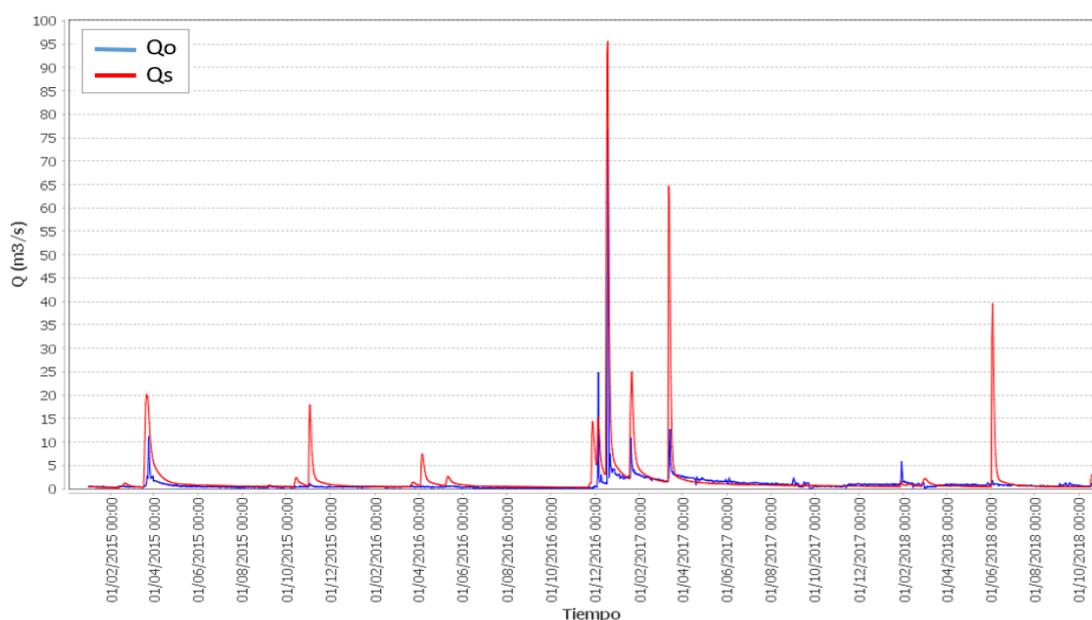


Figura 36. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Escalona en calibración del FC7.

El factor corrector de pérdidas subterráneas más apropiado que se encontró para el embalse de Forata fue de $FC7 = 0.098$. Similar al caso de Escalona, en caudal simulado en Forata exagera el valor de los picos y crea crecientes en periodos donde no se han observado. (Figura 37) $NSE = -4.1$ $BE = 206\%$ y $RMSE = 2.4$

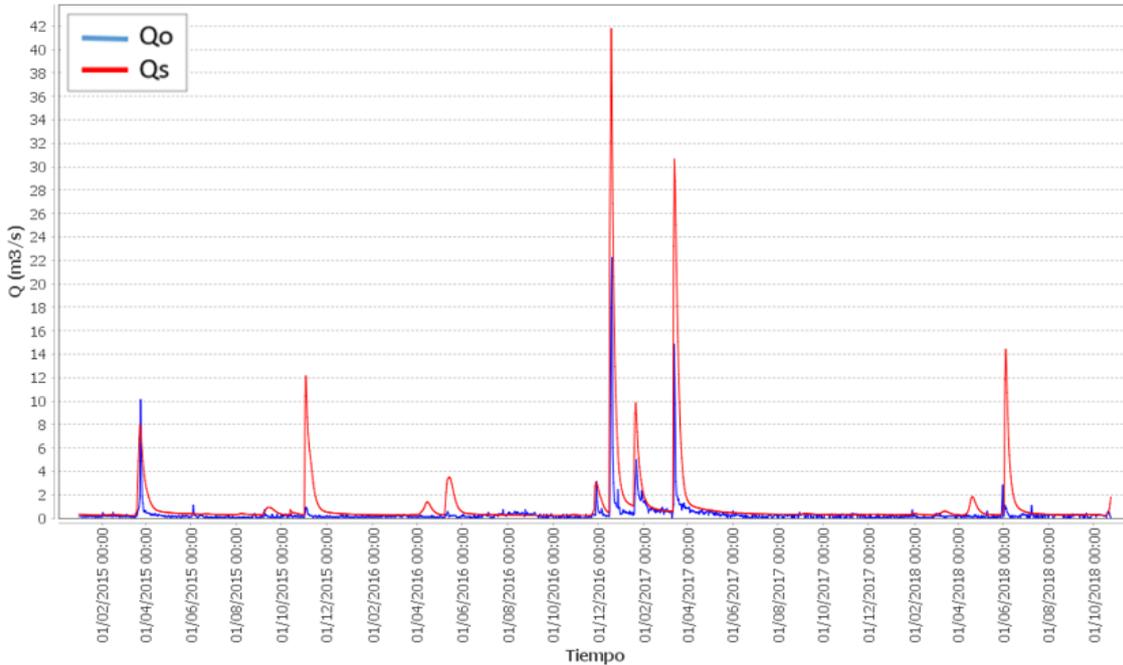


Figura 37. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Forata en calibración del FC7.

Para el caso de La Toba se encontró que la cuenca tenía un buen desempeño con un factor corrector de la calibración de Pajaroncillo $FC7 = 0.0287$, por lo que se conservó este valor. En la Figura 38 se observa que si bien se tiende a sobreestimar el flujo base, los picos menores a $20 \text{ m}^3/\text{s}$ los representa bien, pero los que exceden este valor son subestimados. Esta serie presenta un $NSE = 0.241$, un $BE = -28\%$ y un $RMSE = 4.8$.

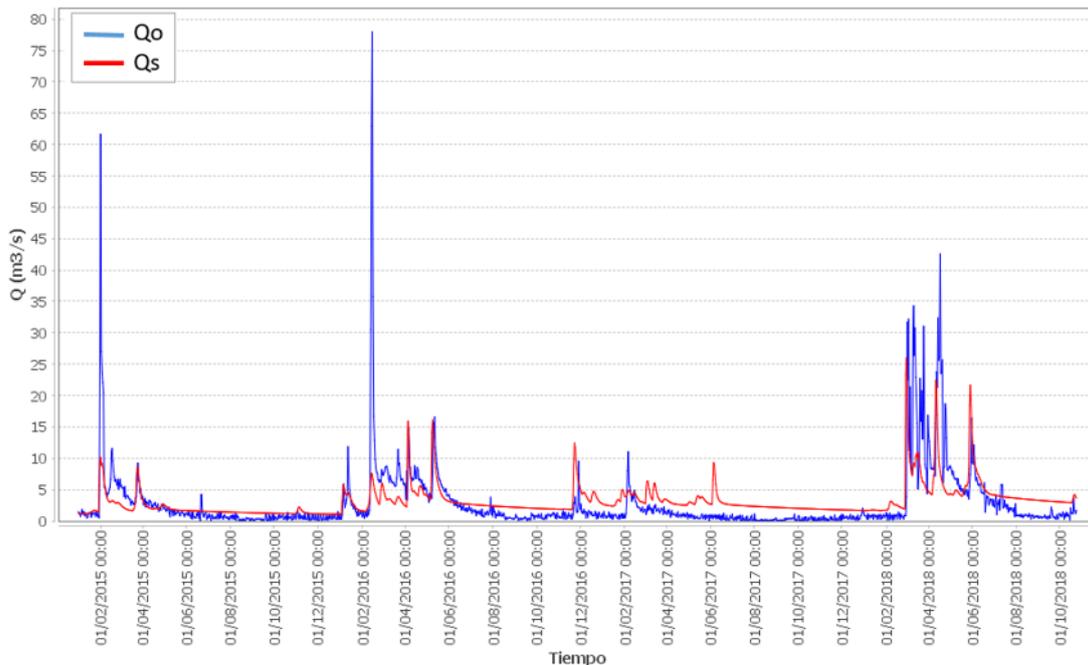


Figura 38. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse La Toba en calibración del FC7.

Se encontró que en el embalse Tous era relativamente insensible a cambios en el FC7 en cuestiones de índices de bondad, pero se encontró un comportamiento mejor del acuífero con un valor de FC7 de 0.05. Se observa que el modelo representa de manera adecuada las oscilaciones de los caudales, pero vale reiterar que este embalse recibe las salidas de los embalses Naranjero y Tous, sin tener mucha cuenca intermedia, por lo que al poner estos dos embalses en el modelo TETIS lo que se ve en Tous es mayoritariamente las salidas de estos embalses impuesta por el modelo, no la hidrología en régimen natural de la cuenca. (Figura 39). Los caudales simulados presentan un NSE=0.51, un BE=-3.0% y un RMSE=8.5 considerándose satisfactorios.

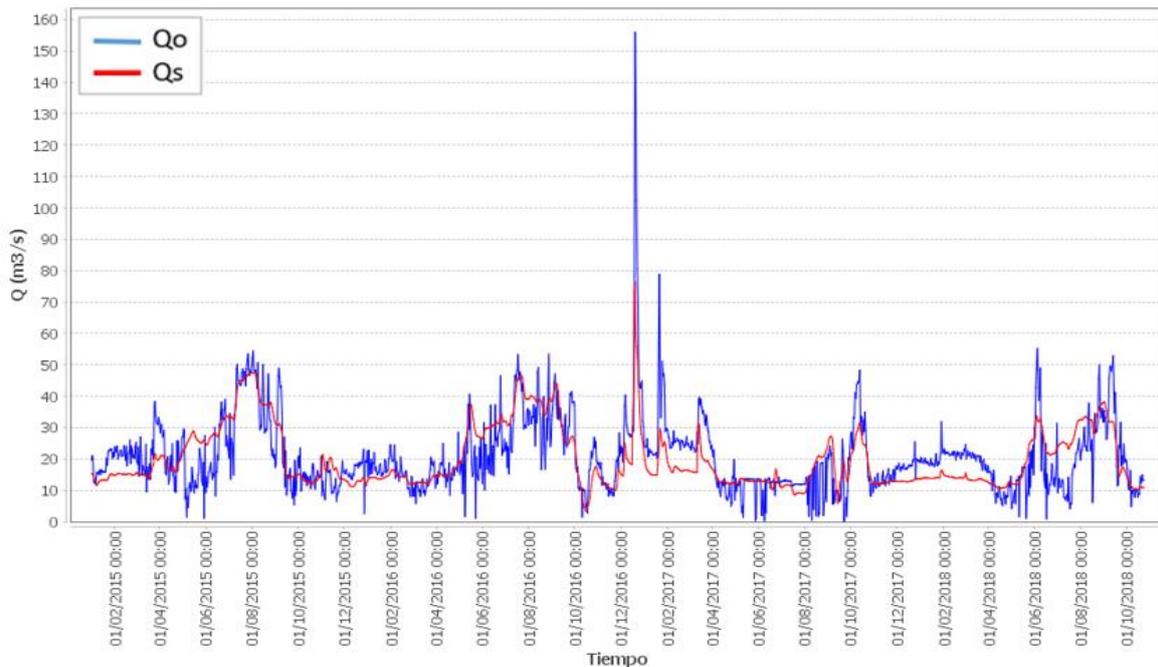


Figura 39. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Tous en calibración del FC7.

Por último en esta sección se evaluó el factor corrector de pérdidas subterráneas para Huerto Mulet, considerado la desembocadura del Júcar. Se escogió un valor de FC= 0.13, teniendo muy presente la estabilidad del acuífero, buscando que este se comportara de manera estacionaria. Se observa que con este valor se logra tomar el flujo base, pero las crecientes menores $60 \text{ m}^3/\text{s}$ tienden a ser sobre estimada, mientras que las mayores de este valor son subestimadas (Figura 40). Esta serie presenta un NSE=-0.08, un BE=39% y un RMSE=16.

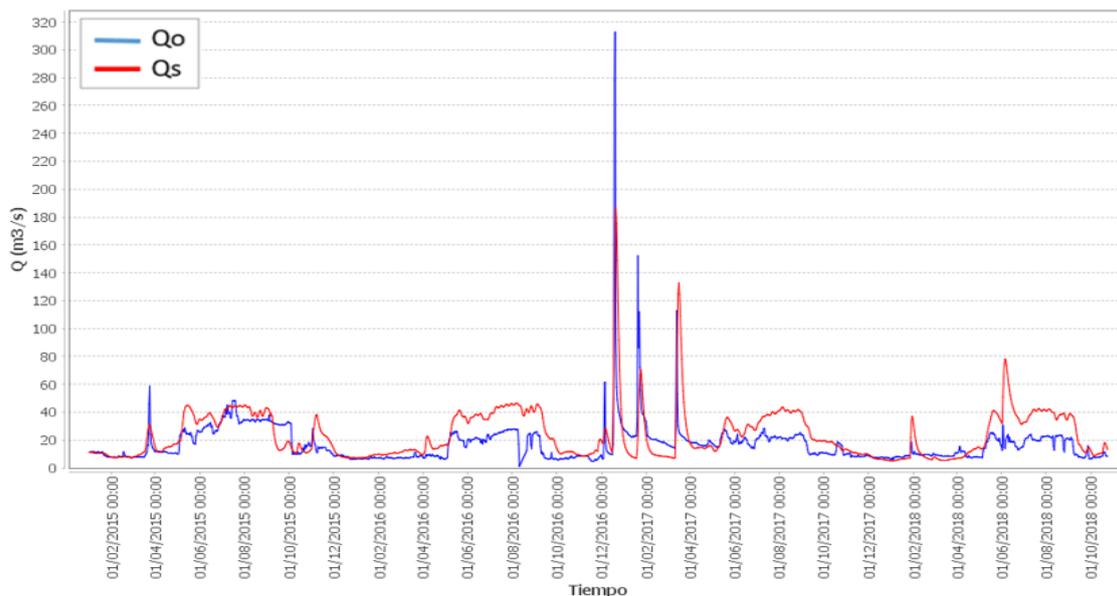


Figura 40. Hidrograma de caudales observados y simulados en estación Huerto Mulet (Desembocadura) en calibración del FC7.

3.1.6 Validación flujo subterráneo profundo (FC7) en los embalses del Júcar.

La simulación Alarcón en el periodo de validación tiene un comportamiento similar al presentado en el periodo de calibración, donde se simula oscilación media de los caudales, una tendencia a subestimarlos (Figura 41). De igual manera los presenta índices de bondad similares con un NSE=0.37, un BE=-34%, y un RMSE=10.861.

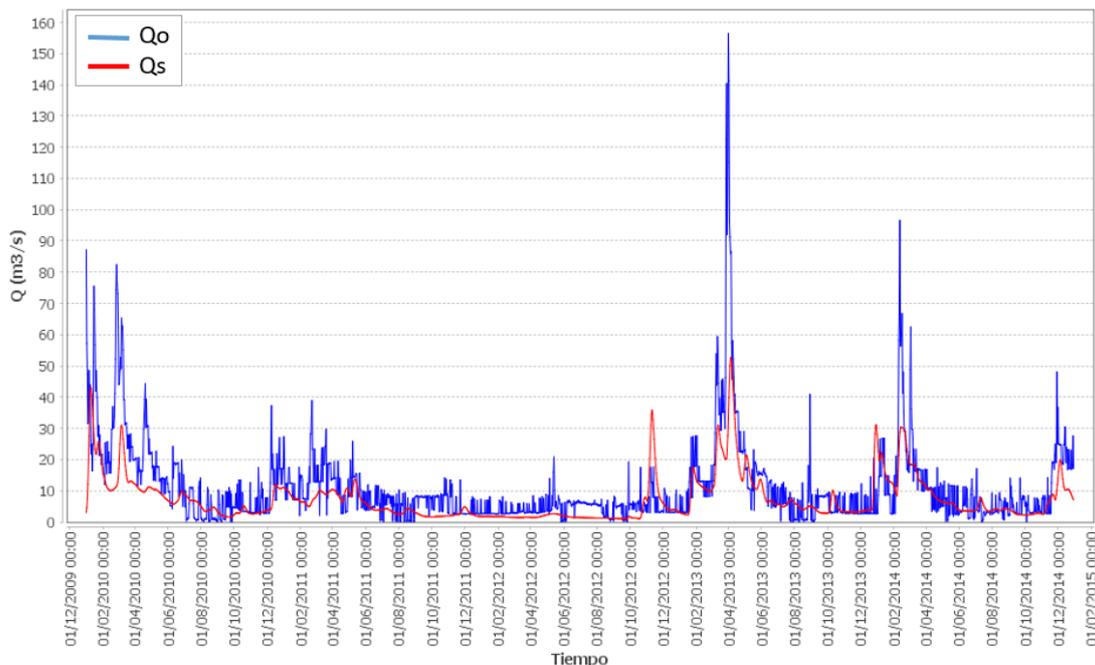


Figura 41. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Alarcón en validación del FC7

Para el embalse de Bellús se encuentra una ligera mejoría en los índices de bondad con respecto al periodo de calibración, con un NSE=0.16, un BE=-31% y RMSE=2.6. Aun así

visualmente se observa que en este periodo son muchos más los picos que no logran ser representados por el modelo o subestimados (Figura 42).

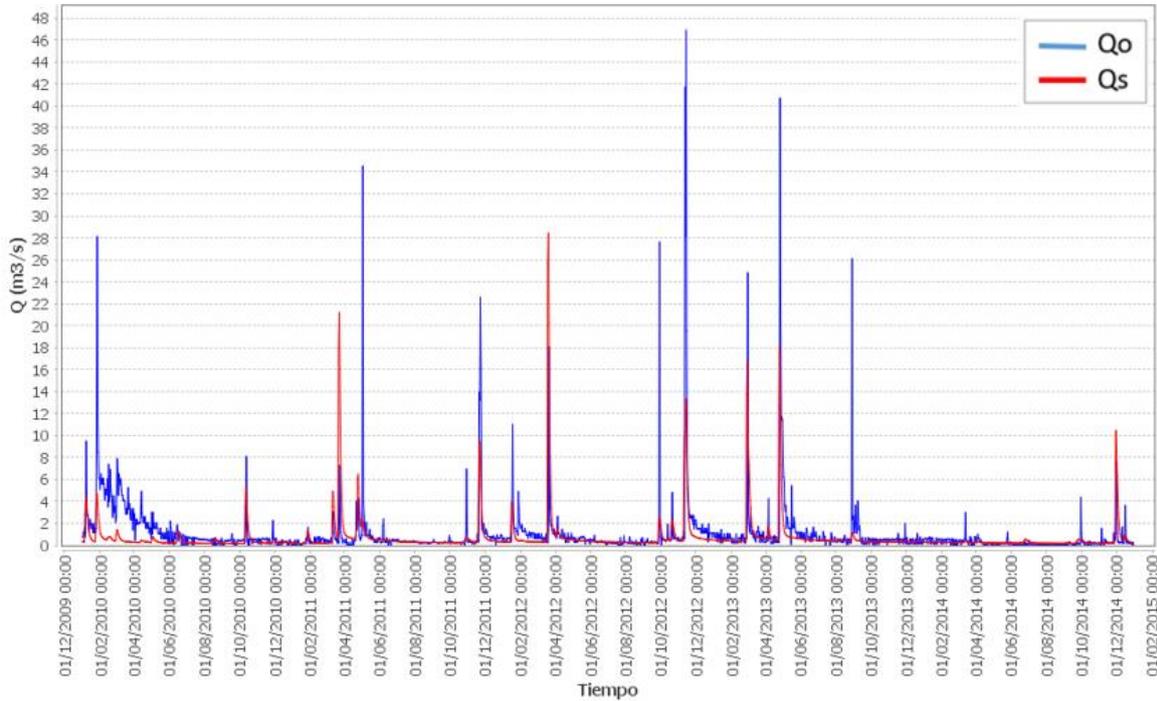


Figura 42. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Bellus en validación del FC7.

El embalse de Contreras presenta mejores índices de bondad en el período de validación, lo que se puede asociar en parte a las fallas de medición en la estación Villora para el periodo de calibración. La validación presentando un NSE= 0.30, un BE= -14% y un RMSE 8.8, observándose que en la validación se tiende a subestimar los picos, pero representa satisfactoriamente el flujo base y las oscilaciones del hidrograma (Figura 43)

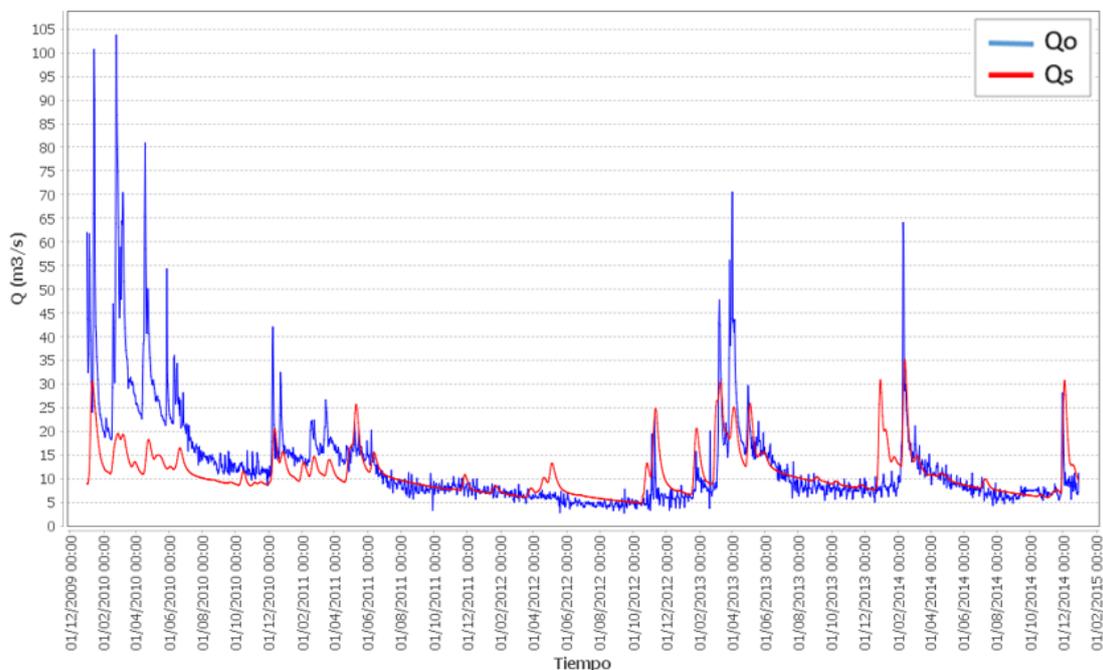


Figura 43. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Contreras en validación del FC7.

El embalse de Cortes presenta mejorías en los índices de bondad con respecto al período de calibración, con un NSE=0.12, un BE= 4.2% y un RMSE= 7.0. Aun así prevalece el hecho de representar picos en momentos donde no están en el caudal observado, pero en general simula las oscilaciones del hidrograma adecuadamente (Figura 44).

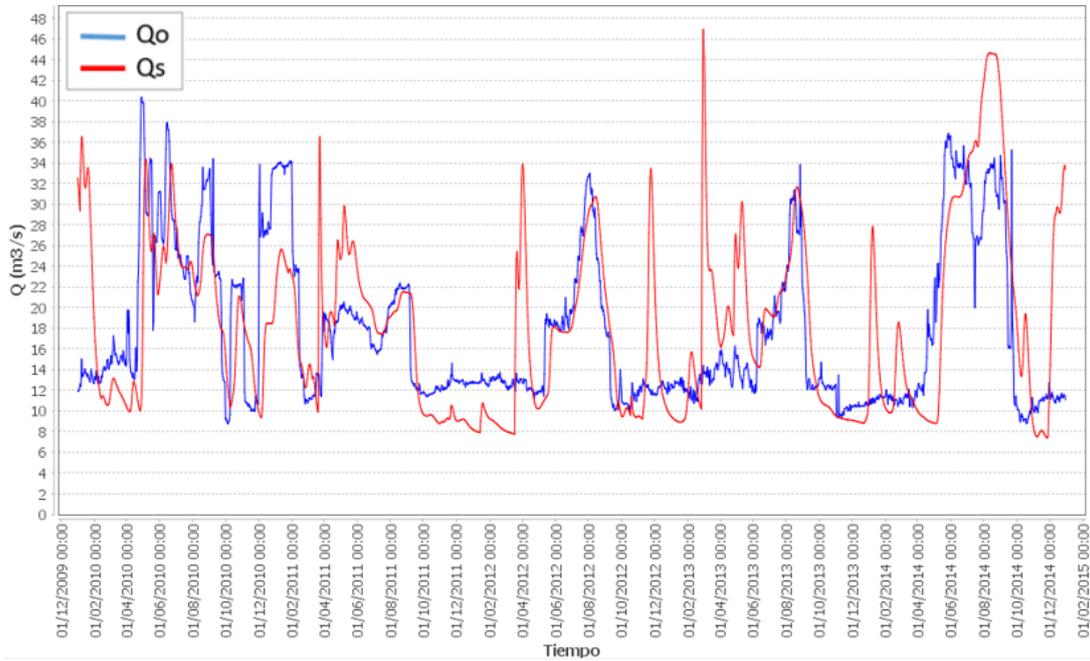


Figura 44. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Cortes en validación del FC7.

El embalse de Escalona presenta un deterioro en el índices de bondad de NSE con un valor de -7.0, pero mejoras en los demás con BE=-8.0 % y un RMSE=2.2. Si bien en el período de validación no se están representando picos que no se observan en los caudales medidos como en calibración, aun se sobreestima el valor de los picos, pero se está subestimando el flujo base (Figura 45).

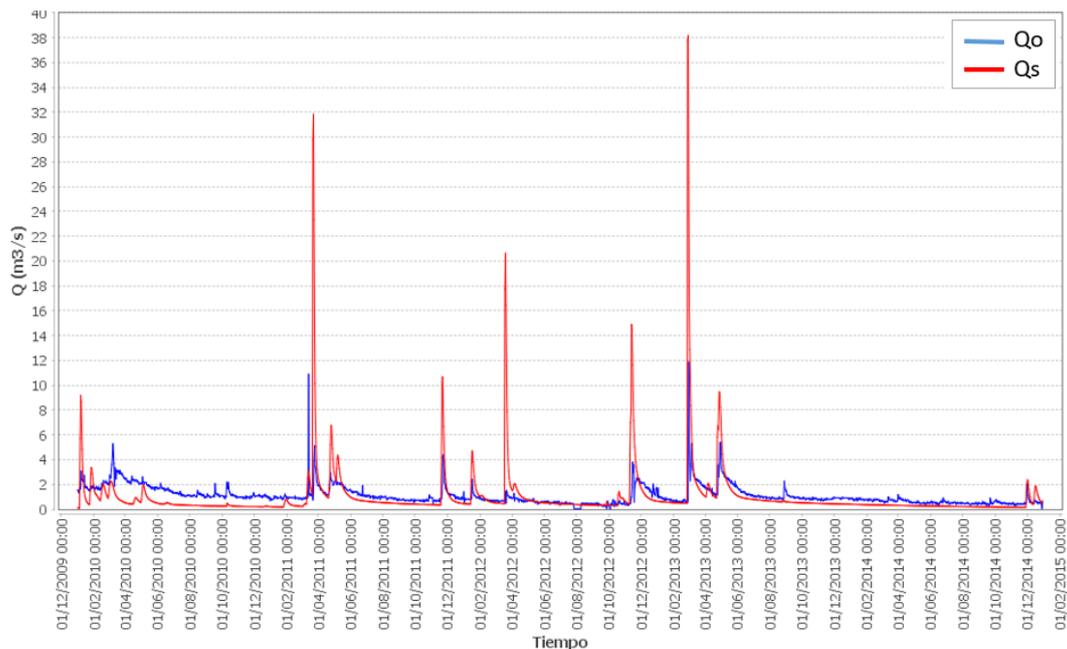


Figura 45. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Escalona en validación del FC7.

En el embalse Forata prevalece la sobreestimación en los picos para este período, siendo el caudal pico simulado 8 veces mayor al observado (Figura 46). Para este período los índices de bondad son un NSE=-25.9, un BE=66.4% y un RMSE=1.3.

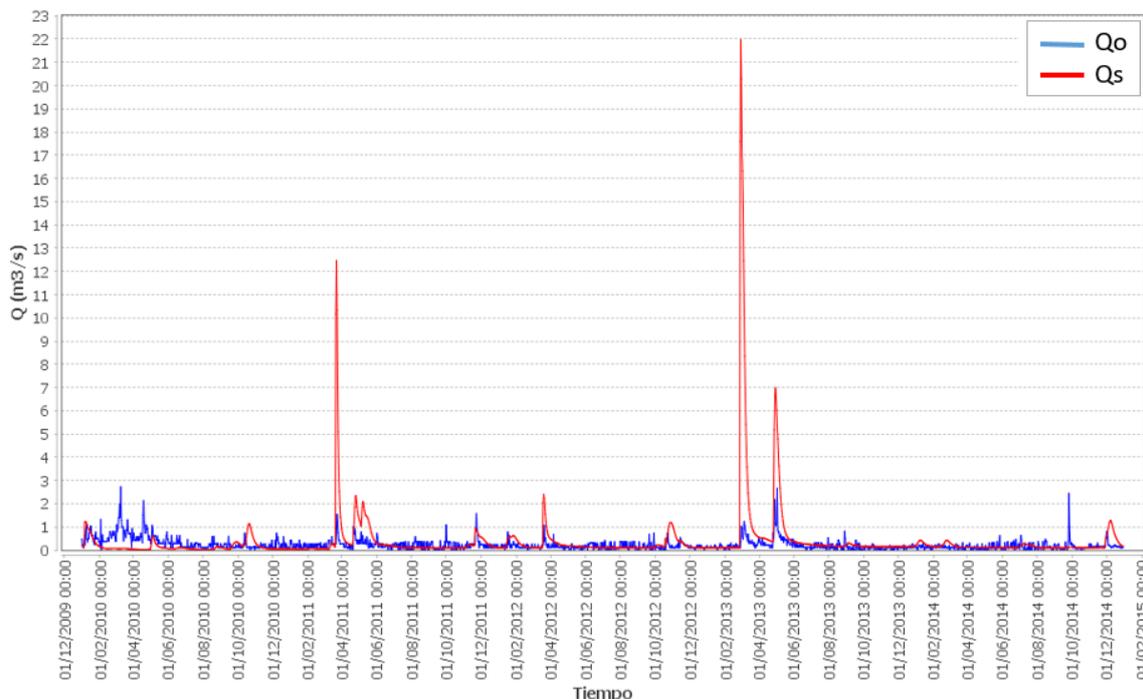


Figura 46. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Forata en validación del FC7.

El embalse La Toba presenta un comportamiento muy similar en validación como en calibración, acierta en identificar los periodos de caudales altos, pero subestima la magnitud de los picos (Figura 47). Esta serie presenta un NSE=0.09, un BE=-44% y un RMSE=5.7.

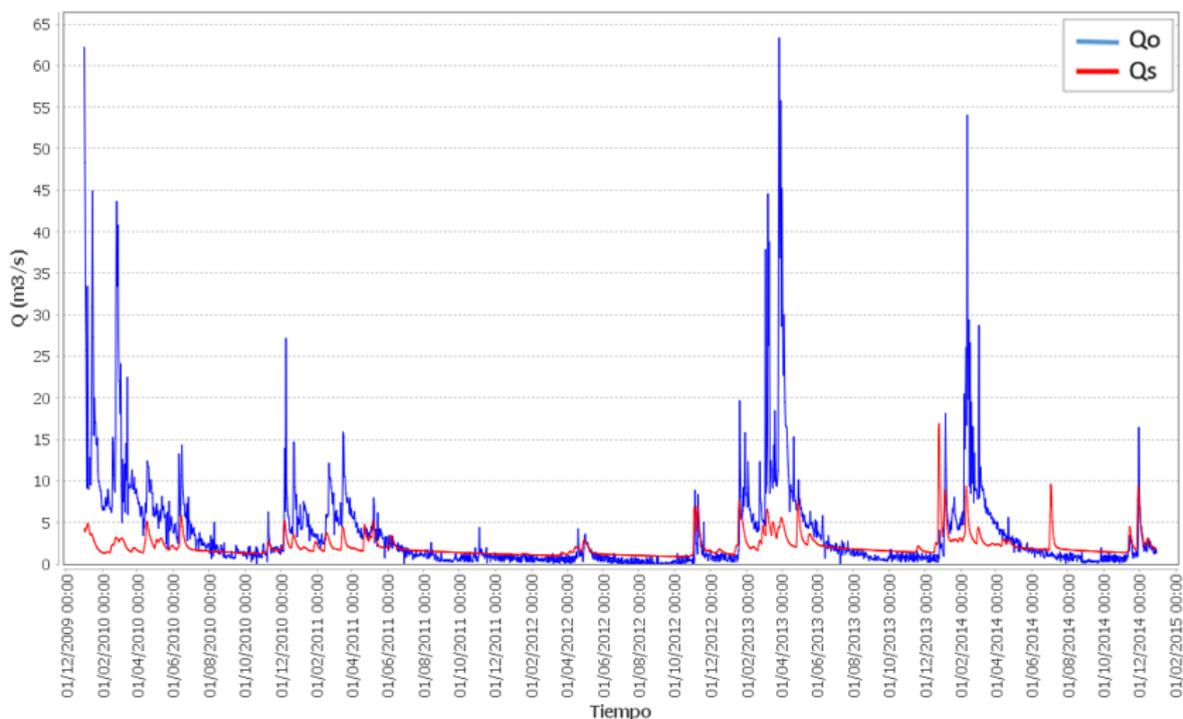


Figura 47. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Toba en validación del FC7.

El embalse de Tous para este período representa las oscilaciones del hidrograma pero con tendencia sus valores medios, subestimando los picos y sobrestimando los valles de este (Figura 48). El período de validación presenta un deterioro en el índice NSE con un valor de 0.27, pero valores similares a la calibración en los otros índices de bondad con un BE=-3.1% y un RMSE=10.3.

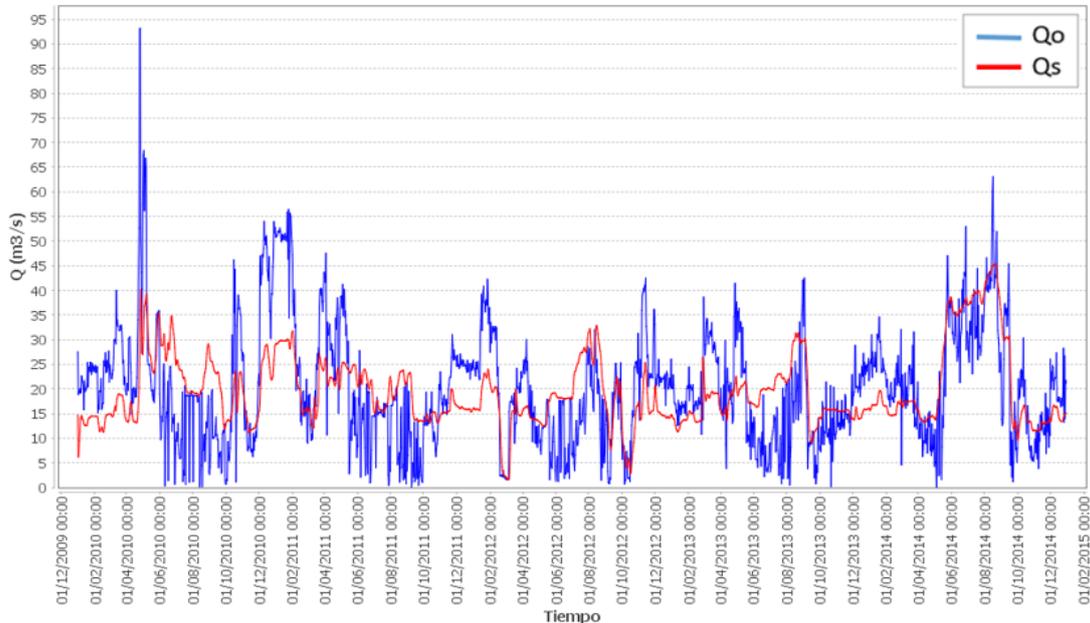


Figura 48. Hidrograma de caudales balance y simulados en embalse Tous en validación del FC7.

Para el período de validación la estación de aforos de Huerto Mulet (Desembocadura) presenta una falta de datos en el año 2013, que se espera afecte el los índices de bondad. En general se observa que la simulación representa las oscilaciones del hidrograma con tendencias a sobrestimar la mayoría de los caudales alto y subestimar los valles del hidrograma (Figura 49). La el modelo para esta estación presenta un NSE= -0.23, un BE= 20% y un RMSE=9.8

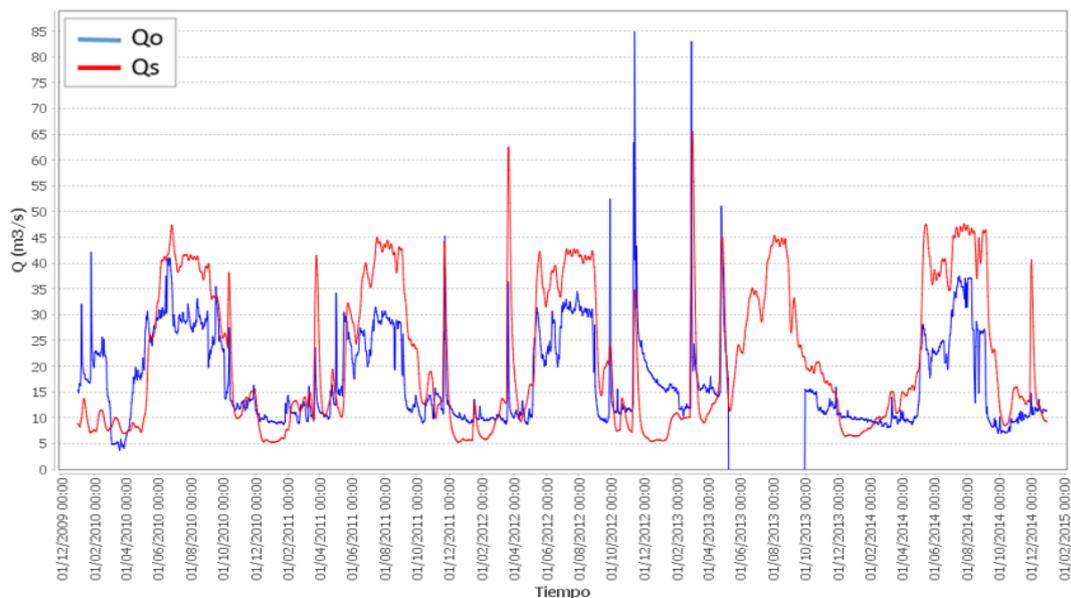


Figura 49. Hidrograma de caudales observados y simulados en estación Huerto Mulet (Desembocadura) en validación del FC7.

En la Tabla 11 se presenta un resumen de los valores de FC7 encontrados para los diferentes embalses y aforos de interés, así como los valores en los diferentes índices de bondad. Vale recordar que la calibración del FC7 no se centró únicamente en mejoras del de los índices de bondad, sino también en ajuste gráfico del hidrograma y valores que generaran un mejor comportamiento del balance y tránsito del flujo.

Tabla 11. Resumen índices de bondad en calibración y Validación del FC7.

	Pre selección FC7			FC7	Período de Calibración			Período de Validación		
	NSE	BE	R2		NSE	BE	R2	NSE	BE	R2
Alarcón	0.10	33.4	9.5	0.0650	0.40	-15.1	7.8	0.37	-34.1	10.9
Bellús	0.37	115.8	6.5	0.0800	0.11	30.4	6.3	0.16	-31.0	2.7
Contreras	-0.13	5.4	8.3	0.0287	-0.08	5.4	8.1	0.30	-13.9	8.8
Cortes	-2.66	60.8	20.9	0.0500	-1.21	27.3	16.3	0.12	4.2	7.0
Escalona	-3.14	133.3	5.1	0.0450	-2.62	95.0	4.8	-6.98	-8.0	2.2
Forata	-6.29	530.8	3.3	0.0980	-4.16	206.8	2.4	-25.93	66.4	1.3
Toba	0.24	-28.1	4.8	0.0287	0.24	-28.1	4.8	0.09	-43.6	5.7
Tous	0.52	-2.4	8.4	0.0500	0.51	-3.0	8.5	0.27	-3.1	10.3
Huerto Mulet	-0.59	72.5	19.3	0.1300	-0.08	39.1	15.9	-0.21	19.6	9.8

3.2 ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE HIDROLÓGICA

A continuación se presenta para los embalses Alarcón, Bellús, Contreras, Forata y Tous, y las estaciones de aforo Pajaroncillo y Huerto Mulet (Desembocadura) el análisis de los pronósticos hidrológicos obtenidos. Este análisis consiste en presentar primero la distribución de caudales de los 51 miembros para cada día de antelación por medio de una gráfica box-plot o diagrama de caja. A la par del box-plot se grafica en línea azul los caudales observados en cada punto y en verde los caudales simulados por TETIS usando los datos meteorológicos del ERA5. Esta gráfica se presenta también para la precipitación, comparando la precipitación sobre la cuenca obtenido por los pronósticos, presentada en los diagramas de cajas, con la precipitación sobre la cuenca obtenida con ERA5, presentada en barras azules. Debido a la gran cantidad de graficas que se generan (477 por cada punto y variable), se presenta únicamente la figura del primer conjunto, el 4 de enero del 2016, las demás figuras representativas se presentan en los Anexos.

También se presenta para estos punto un mapa de calor que muestra el porcentaje de aciertos, el cual indica el porcentaje de pronósticos que poseen valor predictivo, es decir un CRPSS mayor a cero. Cada mapa de calor muestra el porcentaje de acierto para cada antelación semanal y para cada mes de lanzamiento. Este grafico se presenta también para el modelo perfecto, comparando los valores del pronóstico, con el caudal simulado por TETIS, y para la precipitación, comparando los pronósticos del S2S con la información del ERA5.

3.2.1 Pajaroncillo

En los diagramas de caja de bigotes para Pajaroncillo presentados en la Figura 50 se observa como para los primeros 10 días de antelación los miembros del pronósticos tienen un comportamiento muy similar, pero menor a los valores observados y simulados con ERA5. A partir del día 10 al día 20 de antelación el abanico de pronósticos se abre levemente y aumenta los valores anómalos, donde se logra ver que entre el tercer cuartil coincide con el caudal simulado con ERA y el caudal observado se acerca más a los valores más altos del pronóstico. También se observa que para una antelación de más de 40 días el modelo no detecta la creciente presentada el 14 de febrero. Desde el pronóstico del 18 de enero (28 días de antelación) es posible notar un aumento en los caudales pronosticados y un abanico más grande de predicciones, representando bien el aumento de caudal que se da tras el 15 de febrero, pero sin representar adecuadamente el pico de este día.

A lo largo de todos los lanzamientos se observa el patrón mencionado anteriormente, los pronósticos capturan la oscilación de los caudales y su tendencia a disminuir o aumentar, pero tienden a subestimar los picos de caudal muy marcados y comienzan a mostrar señales de estos con una antelación de 10 a 15 días. También se observa que la existencia de valores anómalos aumenta a partir del día 10 de antelación, y en muchas ocasiones son estos los que capturan la crecida. (Anexo 1)

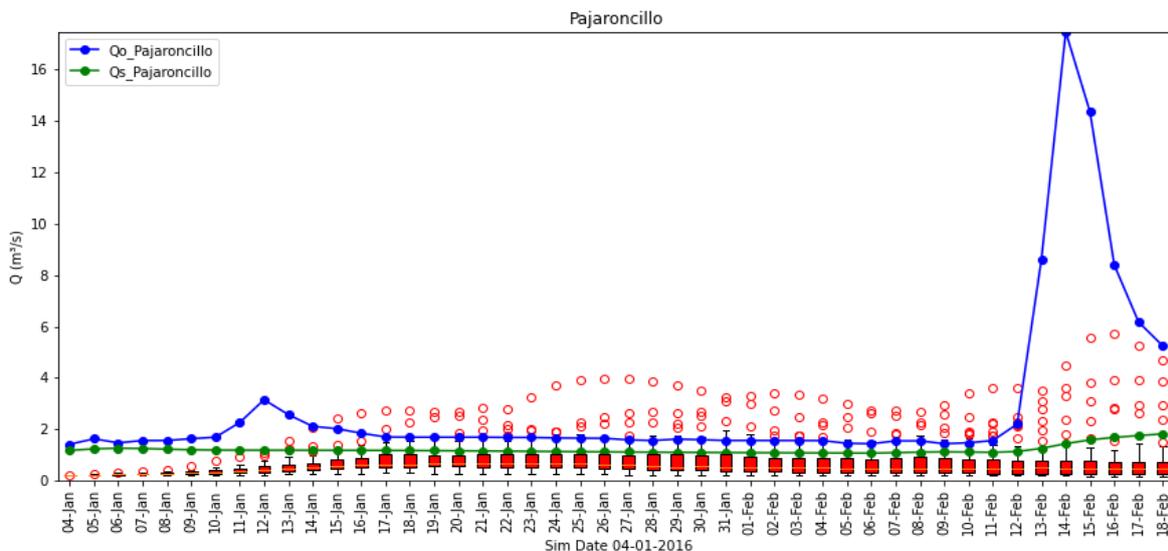


Figura 50. Predicciones de caudal en la estación Pajaroncillo para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.

De manera análoga en la Figura 51 se presenta el pronóstico de precipitación total diaria del 4 de enero de 2016, junto con la precipitación total diaria del ERA5 para dichas fechas. Aquí se observa que el pronóstico tiende a acertar en la precipitación con una antelación de 5 días o menor en el cuartil 3, para una antelación de 5 a 20 días el modelo sobreestima la precipitación ligeramente y ya en antelaciones mayores a esta el pronóstico del S2S no captura los eventos.

Para demás lanzamientos de pronósticos se tiende a detectar los eventos entre 5 y 10 días de antelación, acertando en la magnitud de estos. En antelaciones entre 15 y 20 días los

eventos se comienza a detectar, pero subestimando la intensidad y mostrando precipitaciones en días secos. Esto es coherente con lo visto en los caudales, ya que poseen un comportamiento similar y a lo presentado en la Figura 54, mostrando que la antelación de una semana es la que mayor cantidad de aciertos posee. A lo largo de todo el pronóstico los valores anómalos abundan (Anexo 2).

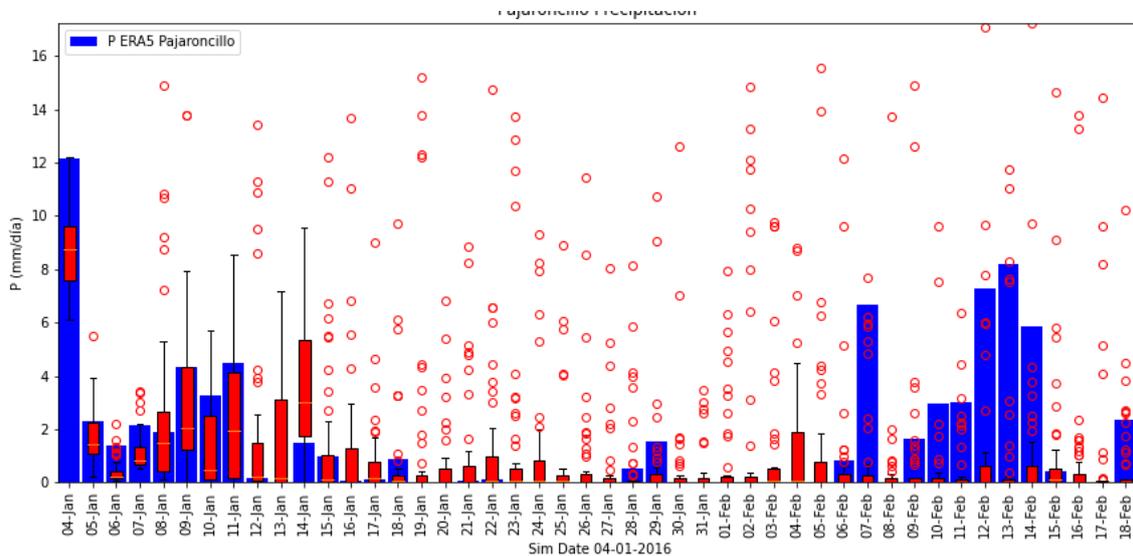


Figura 51. Comparación precipitación total diaria del ERA5 vs predicciones de precipitación S2S, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Pajaroncillo.

En la Figura 52 se observa el porcentaje de pronósticos con valor predictivo según la antelación y mes de lanzamiento para Pajaroncillo. En este se observa que más del 40% de los pronósticos de caudal tienen valor predictivo ($CRPSS > 0$), siendo los meses de noviembre, octubre y febrero los meses con menor porcentaje de abierto, especialmente a partir de la semana 2 y 3 de antelación. Los bajos porcentajes de acierto de febrero se observan también en la Figura 53 que muestra el escenario de Modelo perfecto y en la Figura 54, indicando que posiblemente los fallos se deban a diferencias desde la precipitación, entre la lluvia real, lo mostrado por ERA5 y el S2S para este mes.

En la Figura 52 se observa una variabilidad en los porcentajes de acierto más marcada de mes a mes, que en la antelación, siendo los meses de enero, diciembre y junio los que presentan mejor porcentaje de acierto y un menor cambio frente la antelación. Aun así el porcentaje de acierto de las dos primeras semanas de antelación (de 0-7 días y de 8-14 días) es el mayor, con valores que superan el 60%.

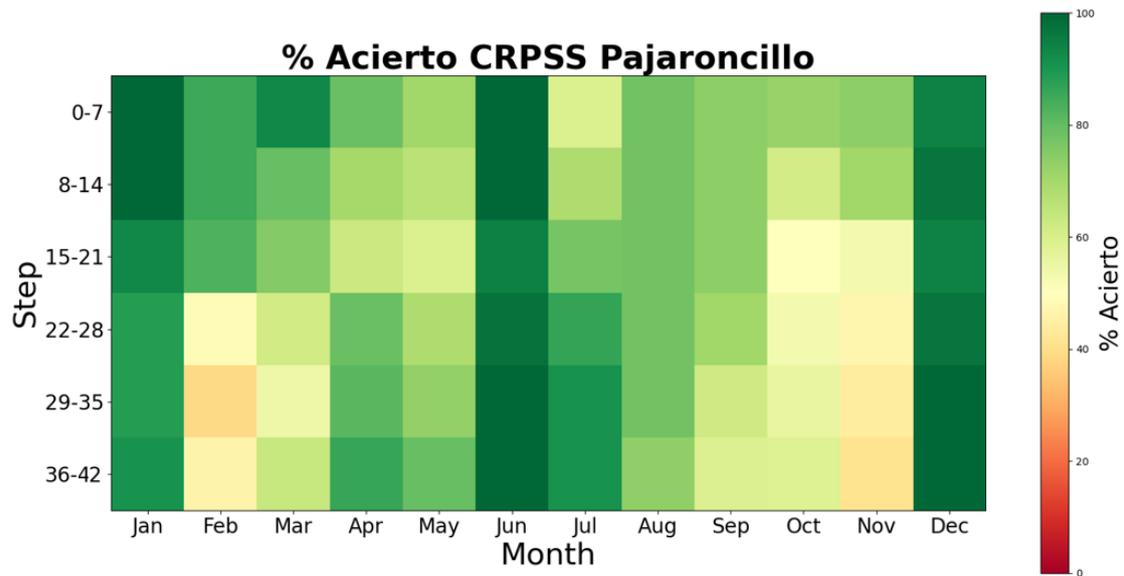


Figura 52. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en Pajaroncillo.

En el escenario de modelo perfecto presentado en la Figura 53 prevalece el buen desempeño en los meses de junio y diciembre visto anteriormente, el cual también se observa en la Figura 54. Esto muestra una buena relación entre la lluvia real, la medida por el ERA5 y los pronósticos del S2S para estos meses, además de una buena representación del modelo de los caudales en este período. En este escenario además de los bajos valores previamente mencionados en el mes de febrero, existe bajo porcentaje de acierto en el mes de octubre (entre 22% y 60%), tal vez representando un rezago en las discrepancias en precipitación observadas el mes de septiembre(Figura 54).

El escenario de modelo perfecto para la antelación de una semana presenta porcentajes de acierto superiores al 61% y superiores al 50% para dos semanas de antelación.

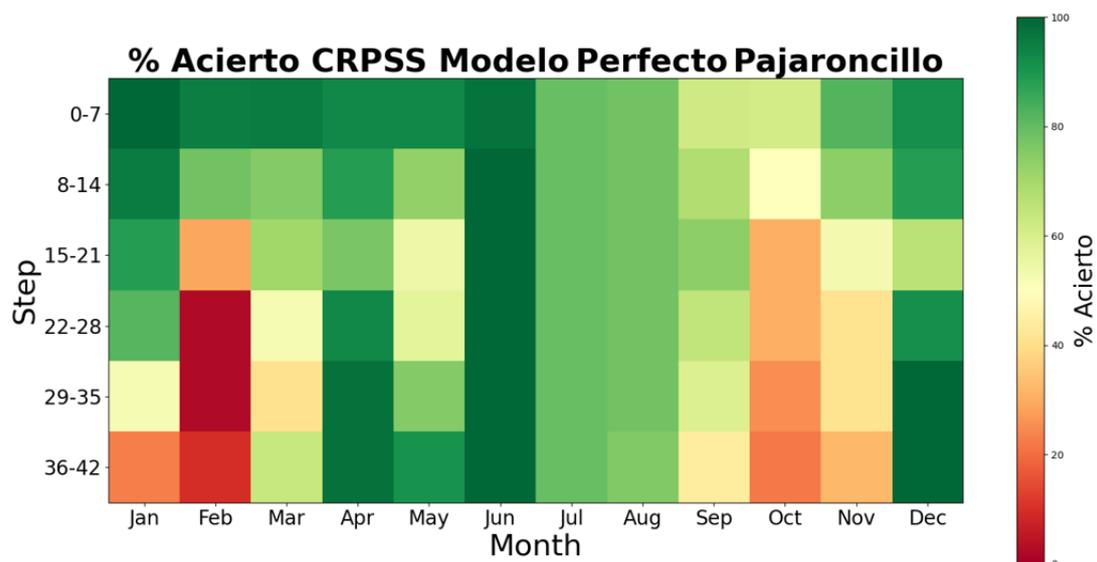


Figura 53. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en Pajaroncillo bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.

La Figura 54 presenta la discrepancia entre la precipitación del ERA5 y la de los pronósticos del S2S. Coherente con lo visto en los diagramas de caja de la Figura 51, se observa que los

pronósticos coinciden en gran medida con ERA5 para antelación menor a una semana, con valores de acierto superiores al 85%. Se observa mayor cantidad de fallos para los meses de enero, febrero, marzo y septiembre desde la antelación de 4 semanas, con valores que van desde el 17% hasta el 40%.

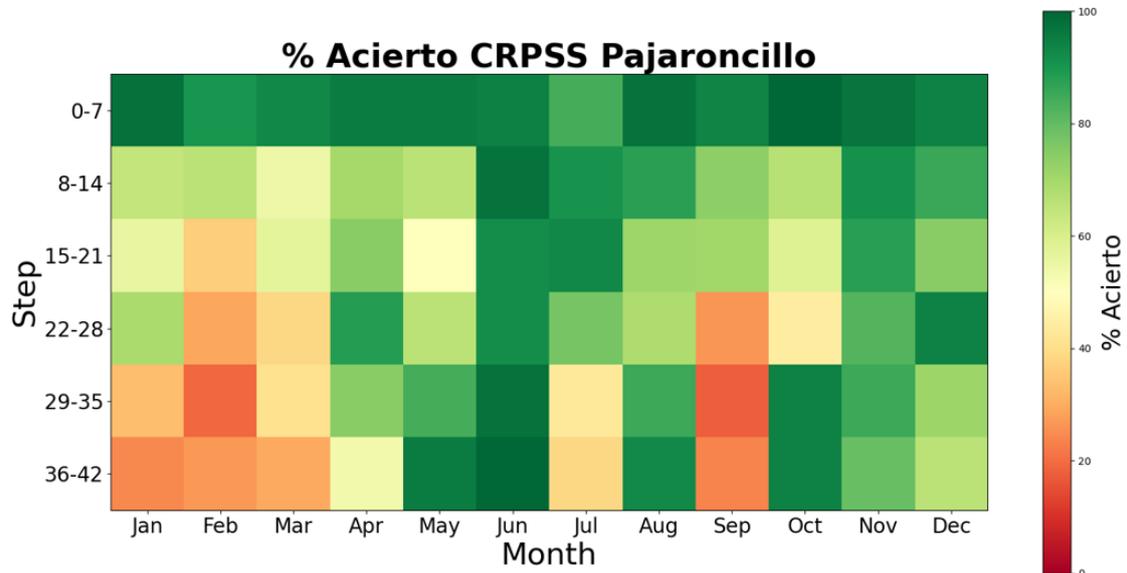


Figura 54. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Pajaroncillo.

3.2.2 Alarcón.

En los diagramas de caja de la Figura 55 se observa que en Alarcón para este lanzamiento el rango de los pronósticos no es muy amplio, incluso los valores anómalos no superan los 10 m³/s. Los primeros 20 días de antelación el caudal es subvalorado y luego hasta los 30 días de antelación es ligeramente sobrevalorado. Al igual que en Pajaroncillo, la creciente del 15 de febrero no es vista con a los 40 días de antelación, pero en el pronóstico del 11 de enero (34 días de antelación) se comienza a identificar la creciente con un rezago temporal de 10 días y un caudal pico de la media de los pronósticos cerca de los 25 m³/s.

Los demás lanzamientos de pronóstico en esta estación muestran un comportamiento muy similar al caudal simulado con los valores del ERA5, y en ambos la tendencia con respecto a los caudales observados, sacados por balance, es ir por el valor medio semanal de este. Los pronósticos identifican los limbos crecientes y decrecientes de los hidrográmas pero los picos suelen ser subestimados y con un rezago temporal de algunos cuantos días. (Anexo 3)

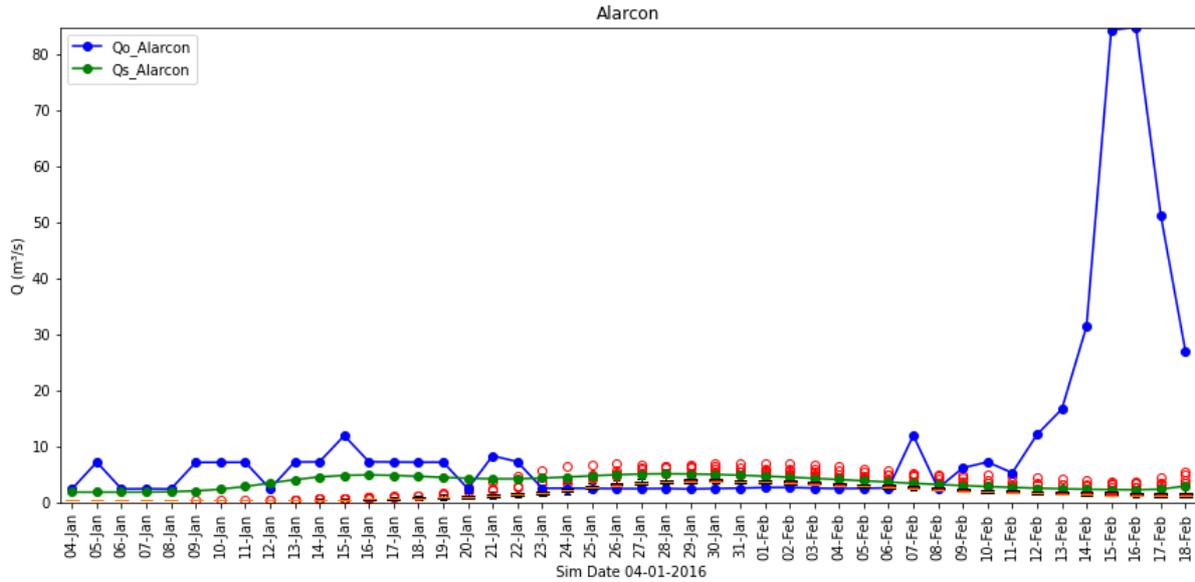


Figura 55. Predicciones de caudal en la entrada del embalse Alarcón para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.

Para el caso del pronóstico de precipitación del 4 de enero de 2016 en Alarcón, se tiene que el pronóstico captura el evento de precipitación hasta con 10 días de antelación, acertando en su relativamente bien su magnitud. Para antelaciones mayores no captura eventos significativos y muestra precipitación en días secos (Figura 56).

Para los demás lanzamientos de pronóstico de precipitación el comportamiento es muy similar al visto en Pajaroncillo, se tiende a detectar los eventos entre 5 y 10 días de antelación, acertando en la magnitud de estos. Para antelaciones entre 15 y 20 días los eventos de gran intensidad se comienzan a detectar, pero subestimando la intensidad y mostrando precipitaciones en días secos aun cuando no hay eventos de tormenta cercanos. Para antelaciones mayores no se observa una tendencia clara ni la capacidad de capturar eventos. De igual manera que en Pajaroncillo a lo largo de todo el pronóstico los valores anómalos abundan (Anexo 4).

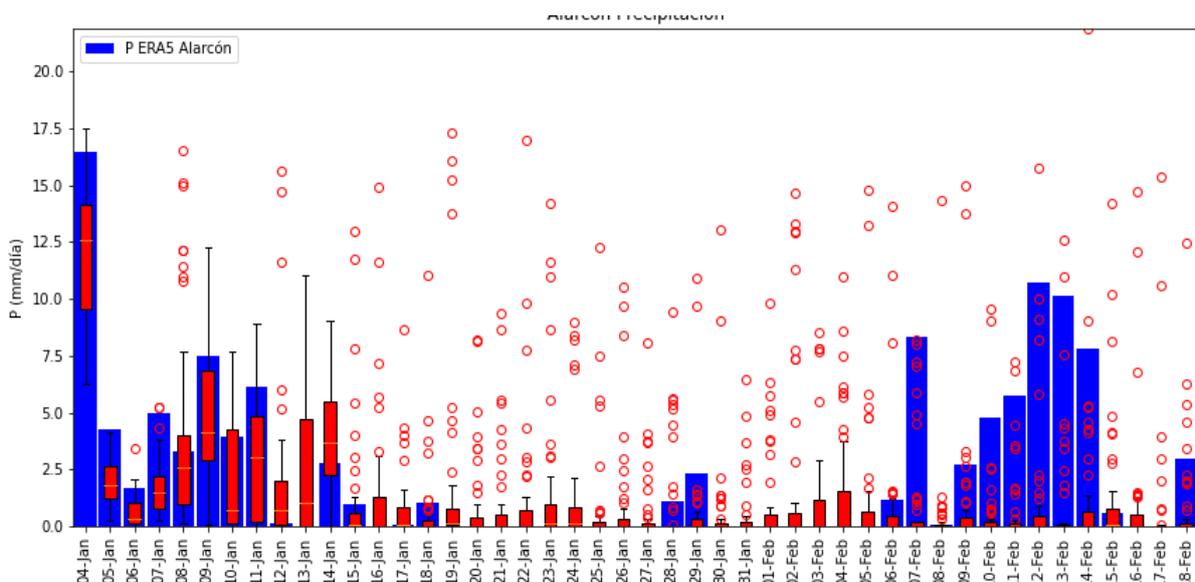


Figura 56. Comparación lluvia ERA5 vs predicciones de precipitación, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Alarcón.

En la Figura 57 se observa que la gran mayoría de los pronósticos realizados en la entrada del embalse Alarcón presentaron valor predictivo. Salvo por los meses de octubre y noviembre todos los meses tiene un porcentaje de acierto mayor al 60%. Los bajos porcentajes de acierto del mes de octubre prevalecen en la Figura 58, donde se presenta el escenario de modelo perfecto. La semejanza entre estas dos figuras se asocia al buen ajuste que se encontró del modelo en este punto, caudales simulados con ERA5 parecidos a caudales observados, por lo que las diferencias de estos con los pronósticos del S2S deben ser similares.

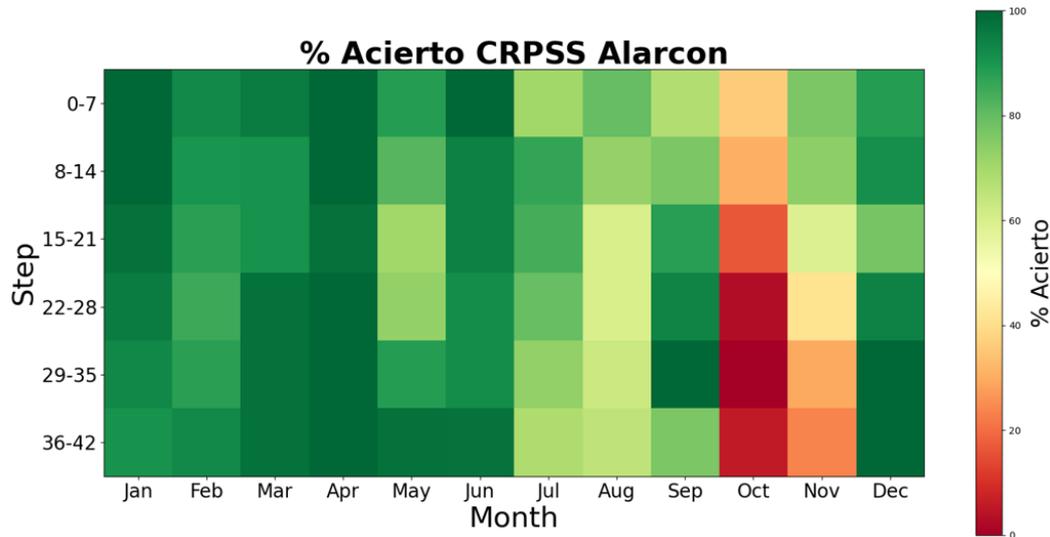


Figura 57. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales de entrada de Alarcón.

Aunque la Figura 58 presente similitudes con Figura 57, se puede observar como las diferencias entre la precipitación pronosticada y la del ERA5 repercuten en el modelo perfecto, ya que se observa una relación entre los valores de bajo porcentaje de acierto en los meses de enero-febrero y agosto-septiembre de Figura 59, con los valores bajos de febrero-marzo y septiembre –octubre en el modelo perfecto, mostrando un rezago de un mes. En general el modelo hidrológico en Alarcón presenta diferencia más fuertes en su desempeño mes a mes, que frente a la antelación, en la mayoría de los meses.

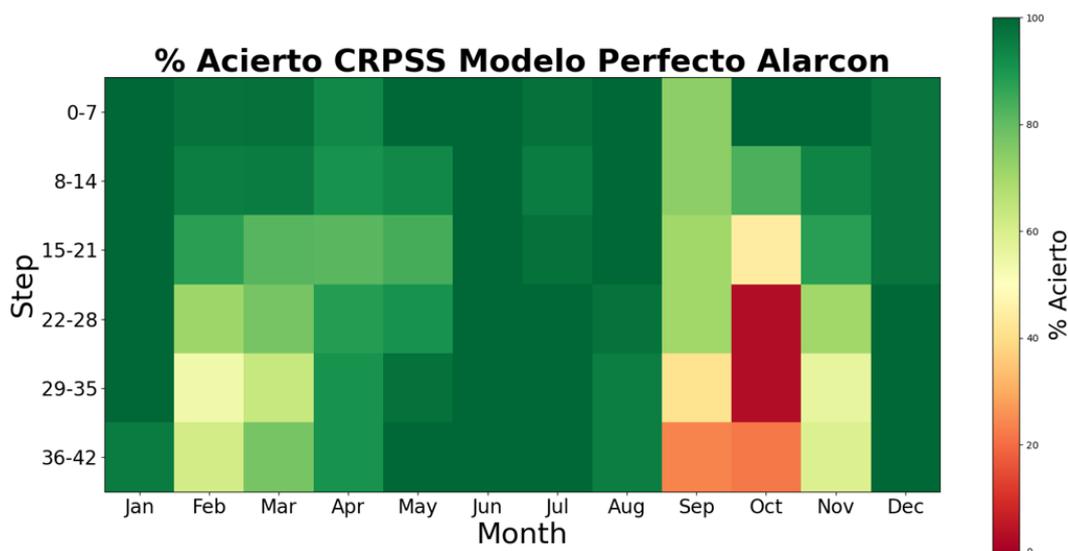


Figura 58. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en la entrada de Alarcón bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.

Al mirar la Figura 59 se observa que los pronósticos logran predecir la precipitación mostrada por el ERA5 en una antelación igual a una semana con un porcentaje de acierto igual o mayor al 88%. Previamente se señaló los valores bajos que se presentan en los meses enero-febrero y agosto-septiembre, que para antelación mayor a 3 semanas se mueve entre el 15% y el 41% del porcentaje de acierto.

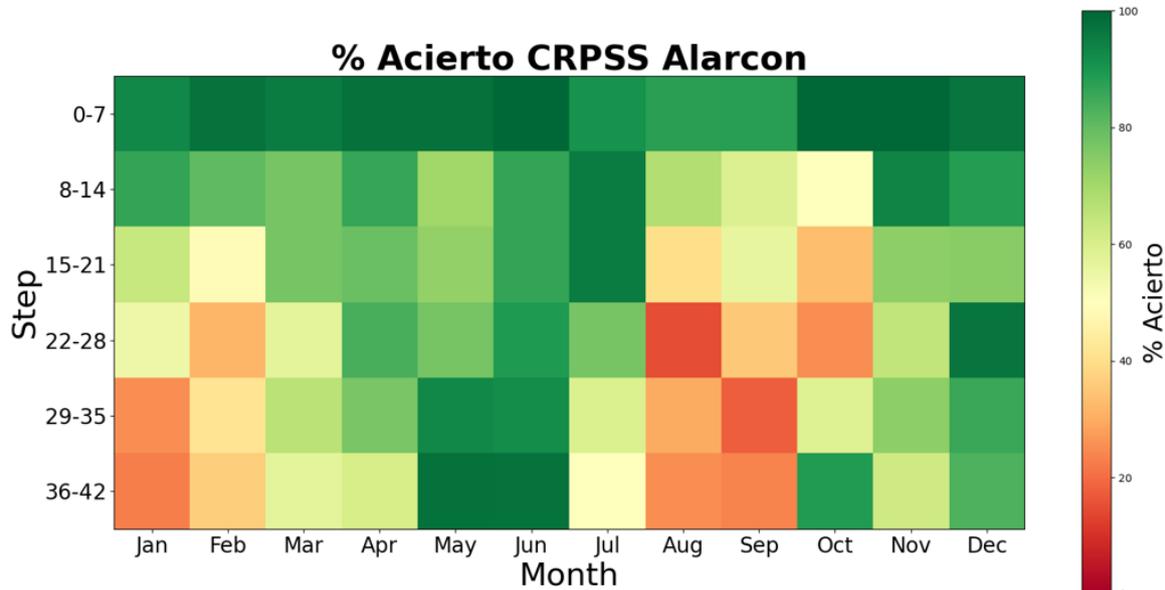


Figura 59. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Alarcón.

3.2.3 Bellús.

Para la estación Bellús en los diagramas de caja presentes en la Figura 60 se observa que hasta 10 días de antelación los caudales proyectados y observados coinciden, pero a partir de día 10 se comienzan a presentar varios valores atípicos, su gran mayoría entre los 10 y 40 m³/s, pero alcanzado a llegar a los 70 m³/s. Esto comportamiento se repite a lo largo de los demás ensambles, donde en la mayor parte del tiempo los caudales observados, simulados con ERA5 y la mediana de los pronósticos oscila entre 0.75 m³/s y 4 m³/s, pero se presentan valores anómalos pronosticados de entre 20 a 100 m³/s o incluso mayores, especialmente en periodos de antelación mayores a los 10 días.

Llama la atención que en ciertos ensambles los pronósticos muestran una creciente entre los 5 y 20 días de antelación que no se ven en los caudales observados ni en los caudales simulados del ERA5. Aun así los pronósticos muestran un comportamiento similares al caudal observado y al caudal simulado con ERA5, identificando de manera satisfactoria crecientes con una antelación menor a 10 días. (Anexo 5).

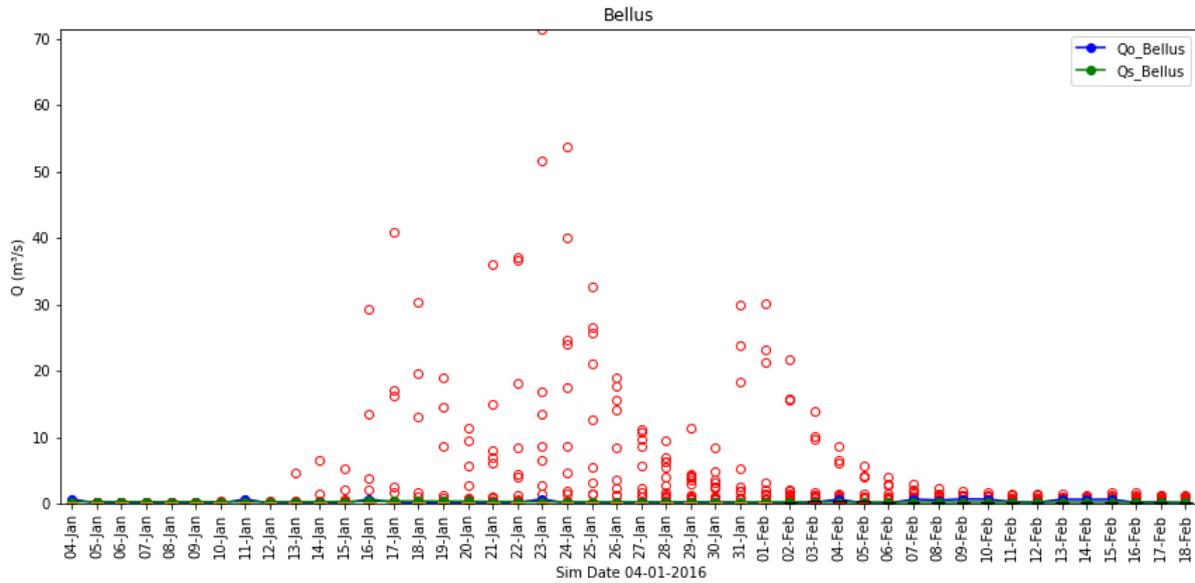


Figura 60. Predicciones de caudal en la entrada del embalse Bellús para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.

Observando los diagramas de caja de la precipitación en Bellús en la Figura 61, se observa un comportamiento similar al observado en Figura 60 con los caudales, valores anómalos de precipitación entre los 10 y 30 días de antelación y sin capturar los eventos que suceden en una antelación mayor a 5 días. Para los demás lanzamientos el comportamiento es similar, se captura el evento y su intensidad si la antelación es menor a 5 días, en ocasiones hasta 10 si el evento es muy intenso, empezándose a mostrar en ocasiones con 15 días de antelación pero con una magnitud menor. Para antelaciones mayores o eventos no tan intensos los pronósticos tienden a mostrar una gran cantidad de valores anómalos, coherentes con los valores anómalos vistos en caudal (Anexo 6).

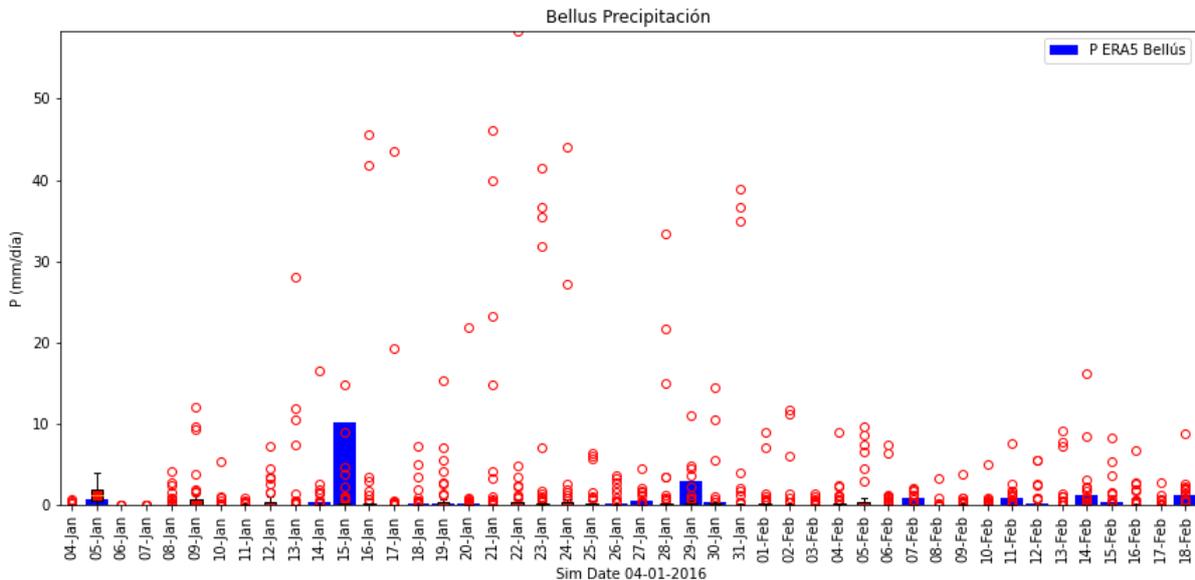


Figura 61. Comparación lluvia ERA5 vs predicciones de precipitación, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Bellús.

Los caudales de entrada al embalse Bellús presentan un porcentaje de acierto entre 0% y 44% para los meses de febrero, agosto y octubre, en antelaciones mayores a dos semanas

(Figura 62). Estos períodos de bajo porcentaje de acierto se observan también en la Figura 63 y Figura 64, indicando un potencial pobre desempeño del modelo hidrológico debido a las discrepancias entre la precipitación real, la precipitación mostrada por ERA5 y la pronosticada. En menor medida se alcanza a ver el mismo patrón para los meses de julio, noviembre y diciembre. Aun así, en la Figura 62 se observa que para antelación de una semana el porcentaje de acierto es mayor o igual a 57% sin importar el mes y los meses de mayo y junio presentan un buen desempeño para todas las antelaciones, siendo el porcentaje de acierto siempre mayor o igual al 81%.

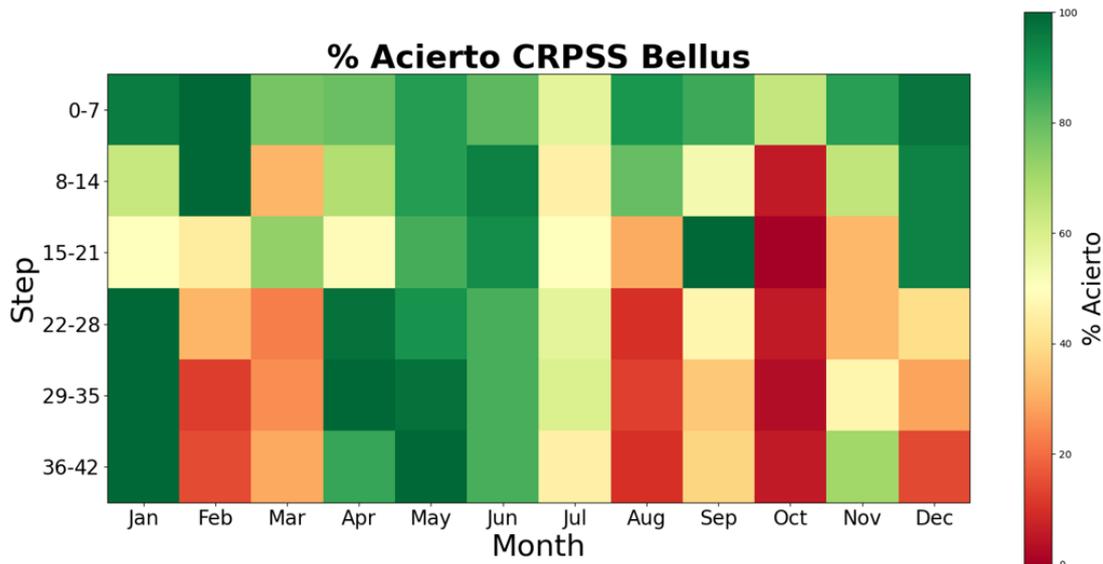


Figura 62. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales de entrada de Bellús.

En el escenario de modelo perfecto presentado en la Figura 63, se encuentran patrones similares a los vistos en la Figura 62, las zonas con bajo valores de acierto mencionadas anteriormente, valores altos en la antelación de una semana con valores mayores o iguales a 78% de acierto. Aun así, con respecto a los meses con mayores aciertos están enero, marzo, abril y junio, con valores mayores o iguales a 63% de acierto, independiente de la antelación.

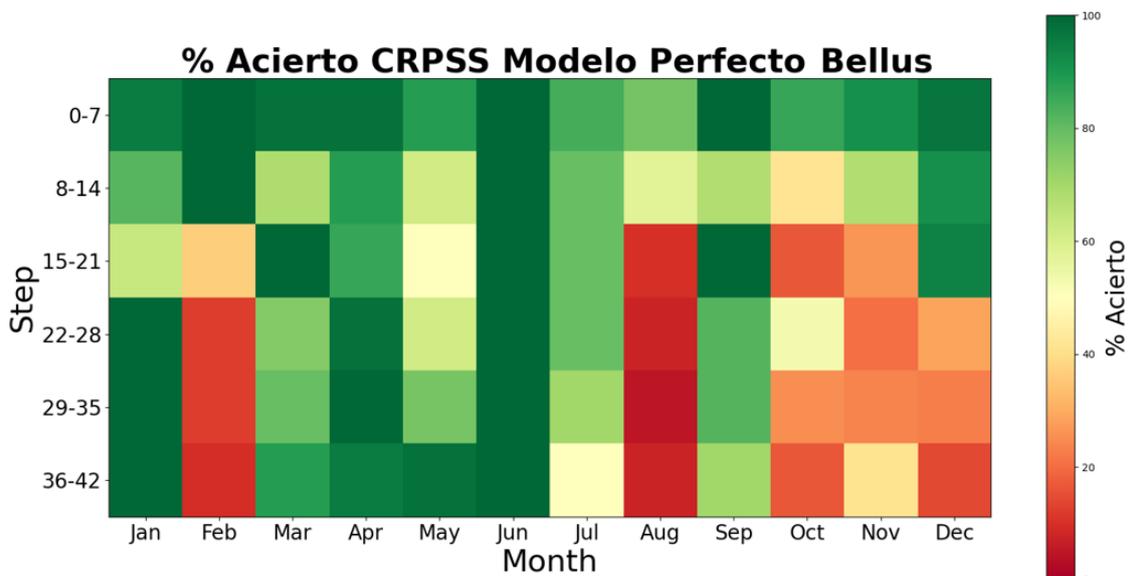


Figura 63. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en la entrada de Bellús bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.

En la Figura 64 se observa que a partir de antelaciones mayores a una semana, el porcentaje de acierto en los pronósticos de la precipitación es mayormente marcado por el mes de lanzamiento, que la antelación misma. Para antelación de una semana el porcentaje de acierto es mayor o igual al 70%.

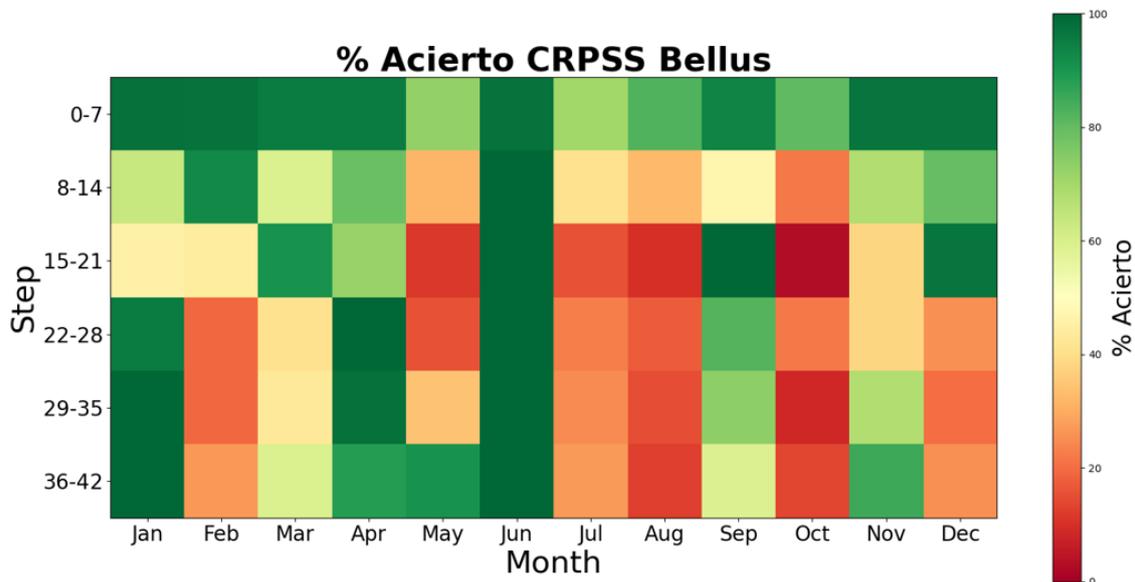


Figura 64. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Bellús.

3.2.4 Contreras.

En la Figura 65 se observan uno de los diagramas de cajas de caudales pronosticados para el embalse Contreras. En este lanzamiento se observa que los pronósticos tiende a subestimar los caudales y los valores anómalos se vuelven más frecuente a partid del 10 día de antelación. De manera similar a lo visto en Pajaroncillo (aguas arriba de Contreras) y Alarcón, la creciente del 15 de febrero no se logra identificar con 40 días de antelación. En el ensamble del 11 de enero comienza a mostrar un limbo creciente en los caudales pronosticados, pero en ningún lanzamiento se captura el caudal pico, solo el aumento gradual del caudal.

Aun así los demás pronósticos suelen capturar la existencia de caudales picos con 15 días de antelación, incluso en algunas ocasiones los pronósticos representan crecidas que no coinciden con los caudales observados o los caudales simulados con ERA5. Los pronósticos logras capturar las oscilaciones graduales del caudal con hasta 30 días o más de antelación. . (Anexo 7).

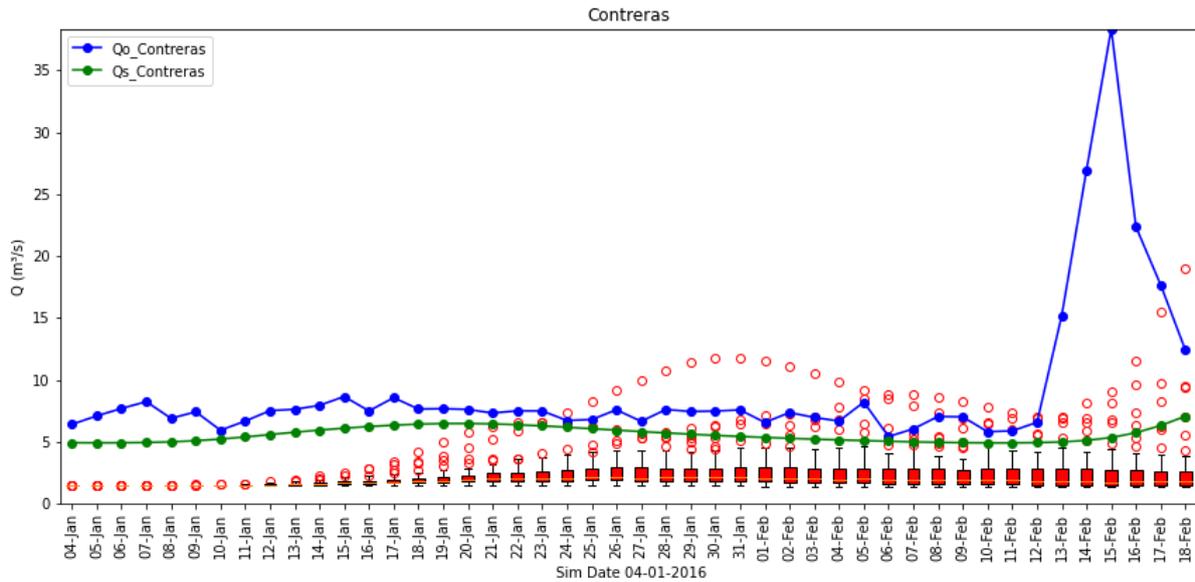


Figura 65. Predicciones de caudal en la entrada del embalse Contreras para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.

Para el caso del pronóstico de la precipitación lanzado el 4 de enero de 2016 en Contreras, se observa que la tormenta registrada en los primeros 10 días se captura bien, mientras que el evento de un mes después no se percibe en los pronósticos. La presencia de valores anómalos desde el día 10 de antelación abunda (Figura 66). En los demás lanzamientos de pronósticos se presenta un comportamiento similar a lo visto en los demás cuencas, la antelación de 5 a 10 días suele capturar de manera adecuada los eventos de precipitación, e incluso ciertos eventos de gran magnitud se llegan a detectar con 15 a 20 días, más allá de eso los pronósticos de precipitación solo muestra una tendencia a temporada seca o húmeda, sin registrar concretamente los eventos de tormenta (Anexo 8).

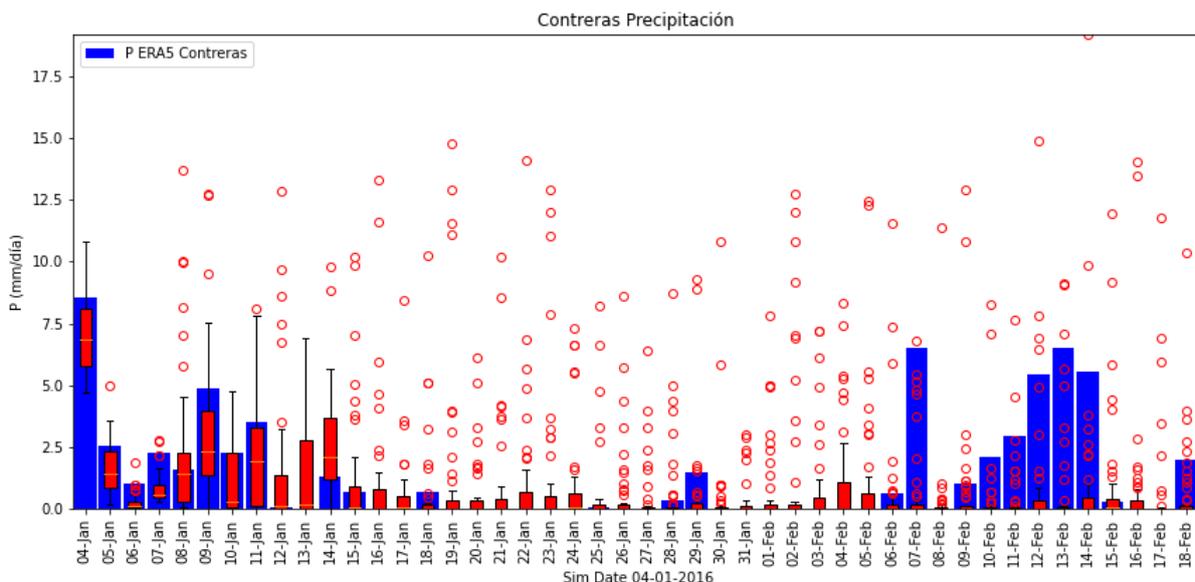


Figura 66. Comparación lluvia ERA5 vs predicciones de precipitación, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Contreras.

En la Figura 67 se presenta el mapa de calor con el porcentaje de aciertos de CRPSS para los caudales en la entrada de Contreras. Allí se observa que las predicciones realizadas en

los meses de febrero, marzo y octubre son aquellas con menor valor predictivo, con un porcentaje de acierto que varía entre 27% y 50% para períodos de antelación superiores a 3 semanas. Los bajos valores de porcentaje de acierto en los meses de febrero y marzo se observan también en el escenario de modelo perfecto presentado en la Figura 68 y en la comparativa de la precipitación en la Figura 69, pudiéndose asociar estos valores bajos a las diferencias entre la precipitación real, la pronosticada y la mostrada por ERA5 en este período. La los porcentajes de acierto para antelación menor a dos semanas es igual o mayor al 61%.

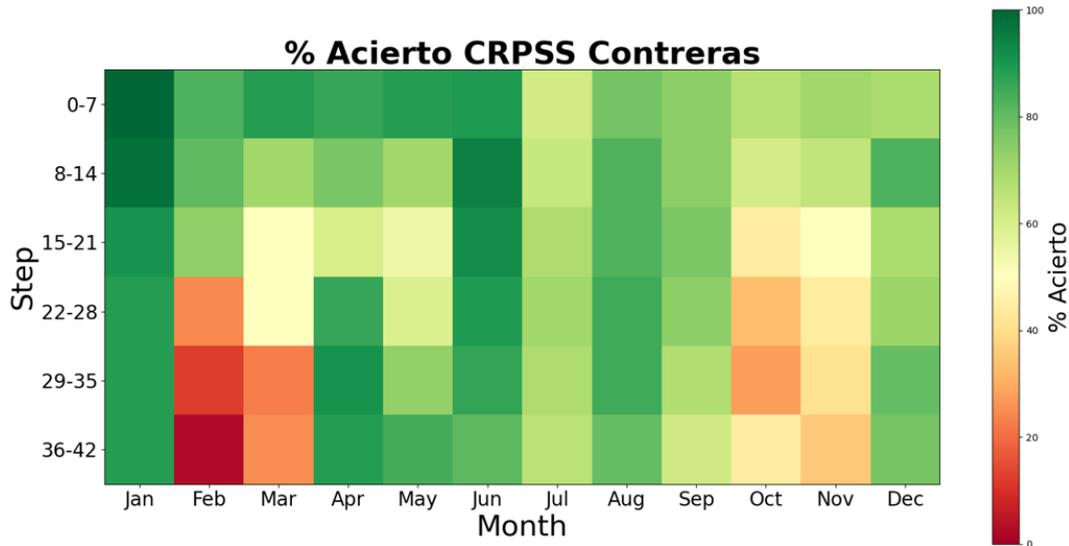


Figura 67. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales de entrada de Contreras

En el escenario de modelo perfecto presentado en la Figura 68, se observa que para los meses entre julio y noviembre el porcentaje de acierto ronda en su mayoría entre valores de 33% a 70% de porcentaje de acierto. Esta tendencia a valores medios se ve también ligeramente marcada en el porcentaje de acierto de los caudales. Por otro lado los meses de diciembre, enero y junio son los que arrojan mejores resultado, con porcentajes de aciertos mayores o iguales al 84%.

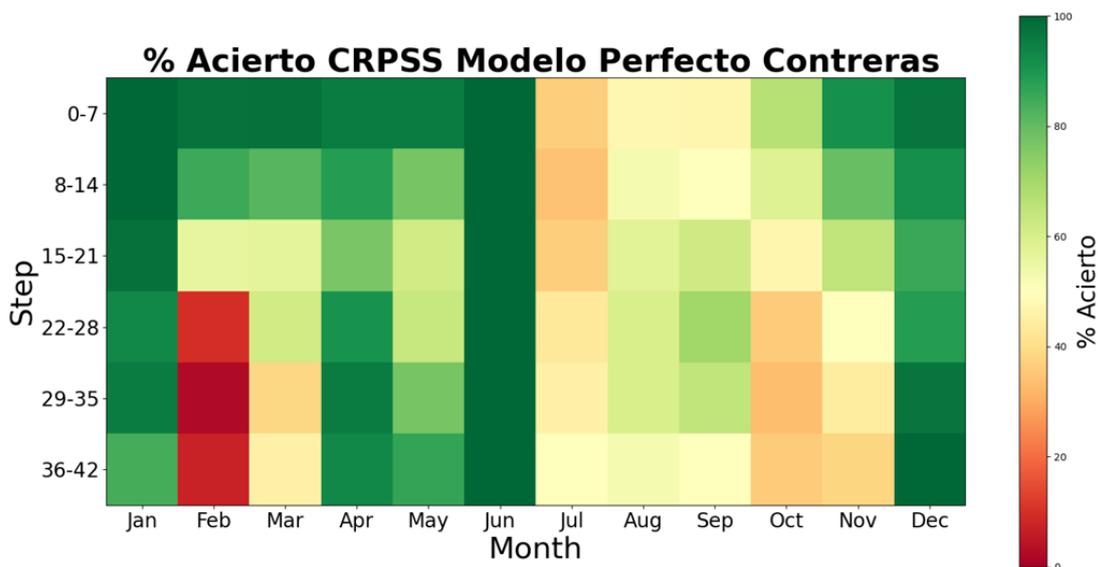


Figura 68. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en la entrada de Contreras bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.

Al comparar la precipitación, se observa que para la antelación de una semana, el porcentaje de acierto mínimo es de 84%, para una antelación de dos semanas es de 57% y para 3 es del 39% (Figura 69).

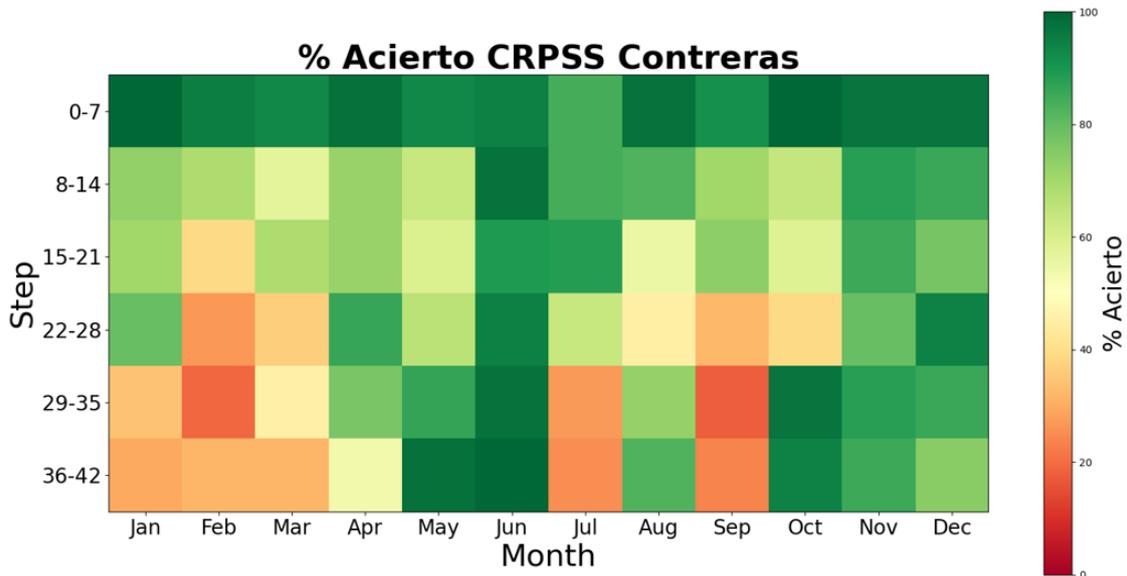


Figura 69. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Contreras.

3.2.5 Forata.

Similar a lo observado en Bellús, en la Figura 70 se observa que los caudales observados, pronosticados y simulados con ERA5 son similares, pero a partir del día 10 de antelación se comienzan a ver valores atípicos que llegan a alcanzar a los 11 m³/s. Este comportamiento se repite a lo largo de los demás ensambles, donde en la mayor parte del tiempo los caudales observados, simulados con ERA5 y la mediana de los pronósticos oscila entre 0.3 m³/s y 2 m³/s, pero se presentan valores anómalos hasta 10 veces mayores, especialmente en periodos de antelación mayores a los 10 días. Las crecientes en los diferentes ensambles se logran captar con una antelación menor a 10 días, aunque en algunos conjuntos de pronóstico se representan crecientes que no se observan ni en los caudales observados ni en los simulados con ERA5. (Anexo 9).

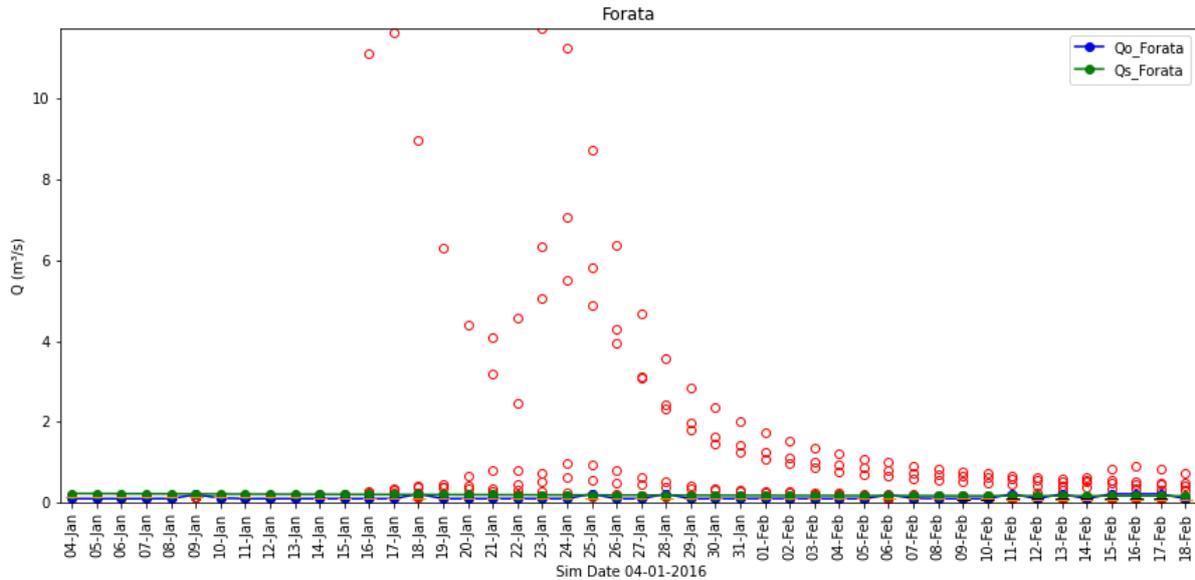


Figura 70. Predicciones de caudal en la entrada del embalse Forata para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.

En la Figura 71 se presenta los diagramas de caja para el pronóstico de precipitación lanzado 4 de enero de 2016. En este se observa que hasta la antelación de 10 días se registra el evento de precipitación, pero para antelaciones mayores los eventos anómalos abundan, similar y coherente a lo observado en los caudales en la Figura 70. Para los demás lanzamientos el comportamiento es similar a lo observado en la cuenca de Bellús, los pronósticos registran el evento y su intensidad si la antelación es menor a 5 días, en ocasiones hasta 10 si el evento es muy intenso, comenzando a evidenciarse en ocasiones con 15 días de antelación pero con una magnitud menor. Para antelaciones mayores o eventos no tan intensos los pronósticos tienden a mostrar una gran cantidad de valores anómalos, coherentes con los valores anómalos vistos en los pronósticos de caudal (Anexo 10).

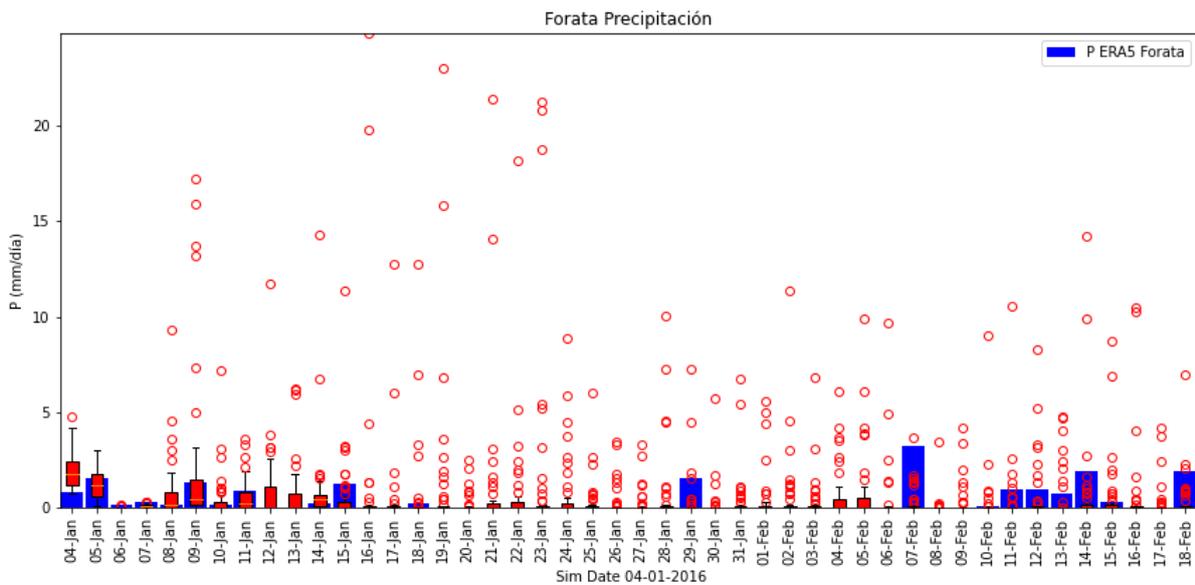


Figura 71. Comparación lluvia ERA5 vs predicciones de precipitación, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Forata.

La calidad para los caudales de entrada en el embalse Forata se encuentran en la Figura 72. El porcentaje de acierto más bajo se presenta en los ensambles lanzados en los meses de febrero- abril y octubre- diciembre, con valores de porcentaje de cierto que van entre 0% y 37% para antelaciones superiores a tres semanas. En contraposiciones los meses de mayo a julio presentan porcentajes de acierto iguales o superiores a 55% para cualquier antelación y para la antelación de 1 semana el porcentaje de acierto mínimo es de 55% en el mes de junio.

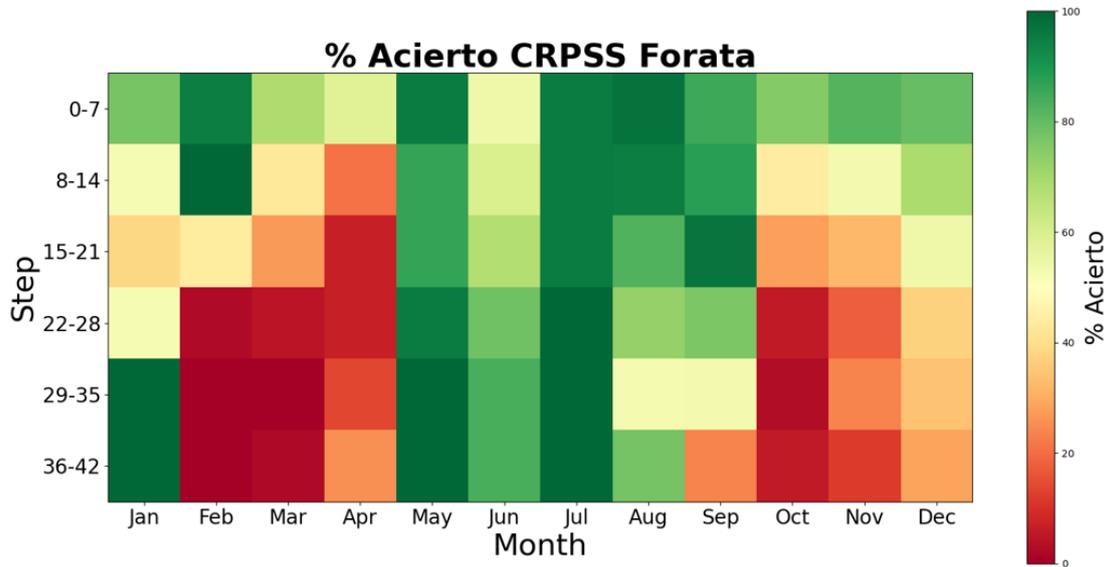


Figura 72. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales de entrada de Forata.

Los porcentajes de acierto para el escenario de modelo perfecto se presentan en la Figura 73. En esta se observan patrones similares a los presentes en la Figura 74 que presenta la comparativa de la precipitación, dando a entender que posiblemente los fallos al asumir un modelo perfecto se deban a diferencia entre la precipitación pronosticada y la precipitación de ERA5 que se propagaron por el modelo hidrológico. En ambas figura los valores más altos de acierto se dan para 1 y 2 semanas de antelación y para los meses de enero, mayo, junio y diciembre. Asimismo se observa en ambas figuras que valores bajos en los meses de febrero agosto y septiembre.

Para el caso de asumir modelo perfecto el porcentaje de acierto con antelación de 1 o 2 semanas es igual o mayor al 66%, y para los meses de diciembre-enero y abril-junio es mayor o igual a 84% sin importar la antelación.

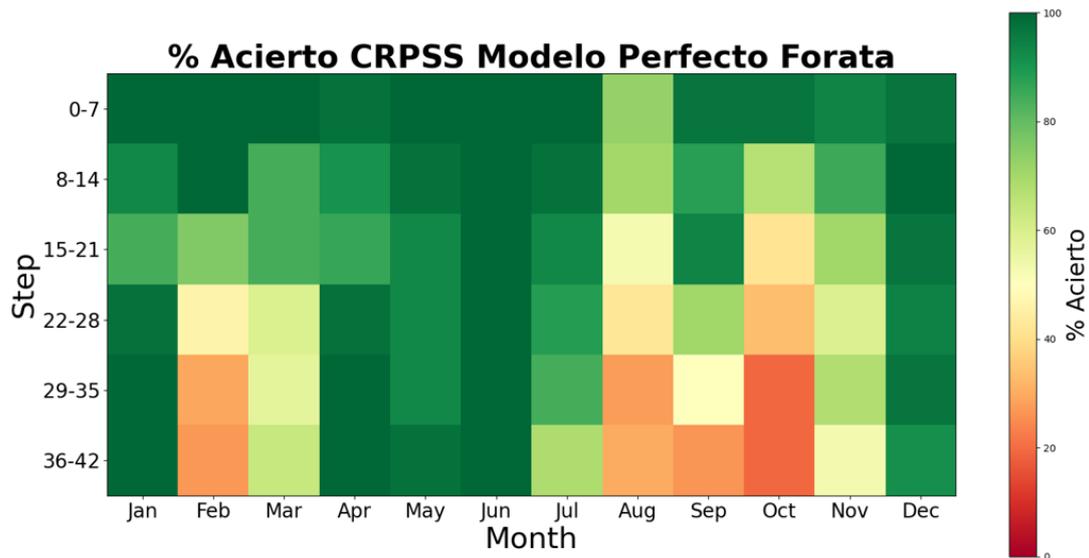


Figura 73. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en la entrada de Forata bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.

Al comparar la precipitación pronosticada del S2S con la precipitación del ERA5, se obtiene un porcentaje de acierto mayor o igual a 80% y 52% para antelación de 1 y 2 semanas respectivamente. Así mismo se tiene que el porcentaje de acierto para los meses de diciembre-enero y abril-junio es mayor o igual a 51% sin importar la antelación (Figura 74).

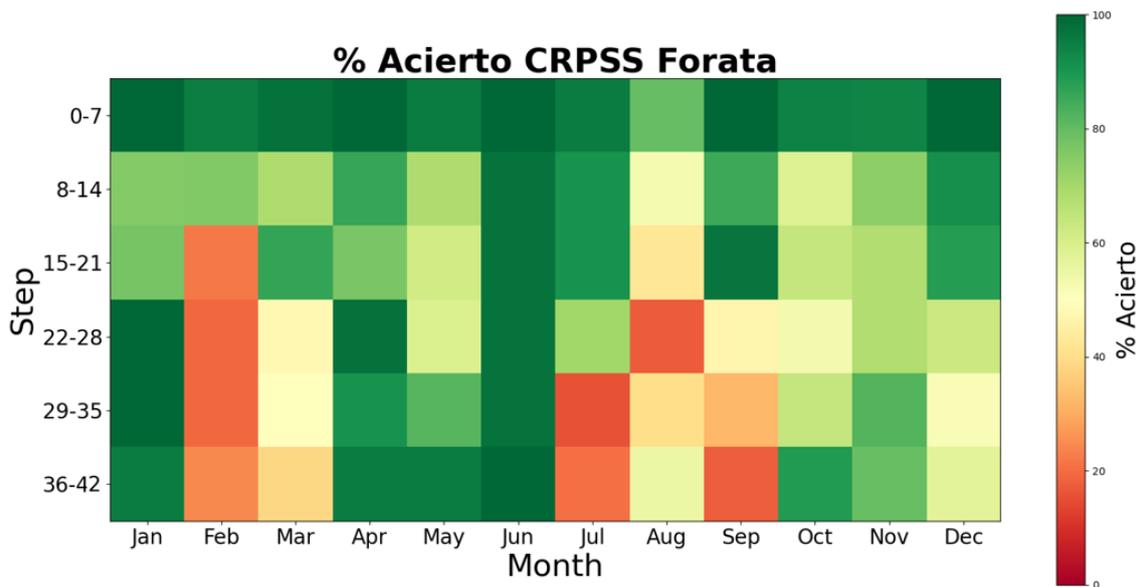


Figura 74. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Forata.

3.2.6 Tous.

Para el análisis de resultados en Tous vale la pena volver a recordar que en el modelo hidrológico de TETIS se implementó el submodelo de embalses, por lo cual desde el punto en el que se marca el embalse se ignora la hidrología aguas arriba de este y se imponen las sueltas reportadas por el CEDEX. En este caso se interfiere en la capacidad de predecir sobre los caudales generados en toda la cuenca de Tous, ya que se imponen los valores conocidos

de sueltas en los embalses aguas arriba: Escalona y Naranjero. Lo que se busca es ver la capacidad de predecir los caudales generados por la intercuenca, pero en este caso puede ser poco visible ya que esta corresponde al 1% del total de la cuenca de Tous.

Acorde a lo anterior es entendible que los pronósticos de caudal generados a partir de información del S2S tienen tanta semejanza con los generados con ERA5 (Figura 75). En general el comportamiento observado en el lanzamiento del 4 de enero de 2016 se repite a lo largo de todos los lanzamientos, donde los box-plot se ciñen al caudal simulado con ERA5, y en ciertas ocasiones el abanico de pronósticos se amplía, en un intento de capturar picos del caudal observado. En este punto los valores anómalos de los pronósticos tienden a coincidir con frecuencia con el valor del caudal observado (Anexo 11).

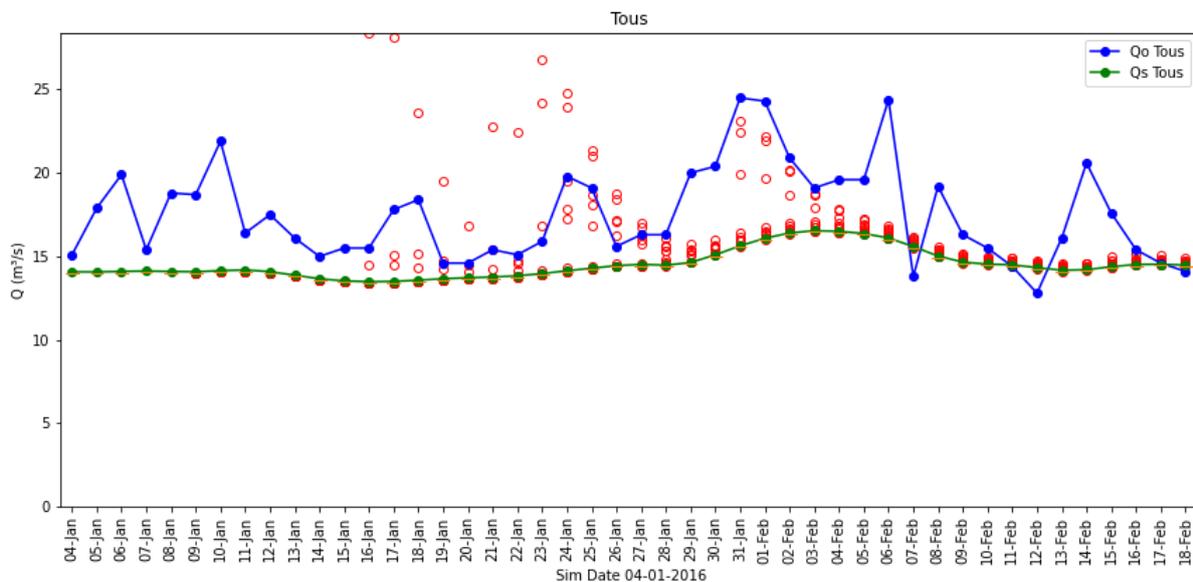


Figura 75. Predicciones de caudal en la entrada del embalse Tous para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.

En la Figura 76 se presenta los diagramas de caja para el pronóstico de precipitación lanzado 4 de enero de 2016. En este se observa un comportamiento similar a lo que se registra en otras cuencas, hasta la antelación de 10 días se registra el evento de precipitación, pero para antelaciones mayores los eventos anómalos abundan. Para los demás lanzamientos, como en otras cuencas, los pronósticos registran el evento y su intensidad si la antelación es menor a 10 días, comenzando a evidenciarse en ocasiones con 15 o 20 días de antelación pero con una magnitud menor. Para antelaciones mayores o eventos no tan intensos los pronósticos solo registran la tendencia a una temporada seca o húmeda (Anexo 12).

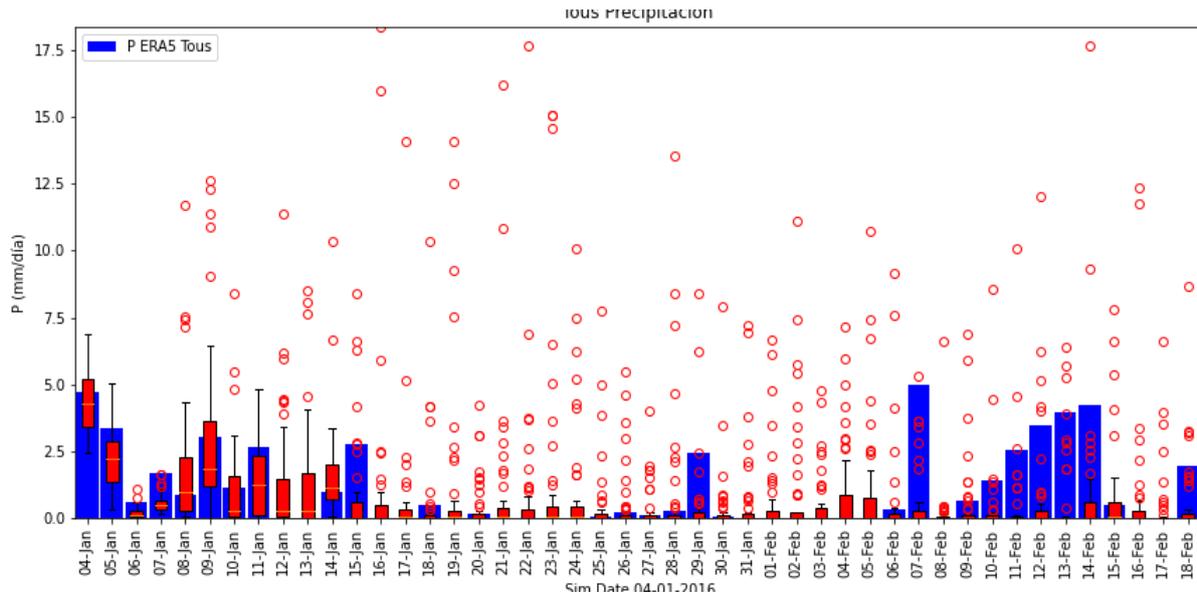


Figura 76. Comparación lluvia ERA5 vs predicciones de precipitación, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Tous.

En la Figura 77 se presenta el mapa de calor con el porcentaje de aciertos de CRPSS para los caudales en la entrada del embalse de Tous. En esta se observan que los porcentajes de acierto, independiente del mes o la antelación, son iguales o mayores a 70%. Esto se debe en gran medida a la implementación del submodelo de embalses, que fuerzan a los pronósticos a adoptar las sueltas observadas en Naranjero y Escalona. Es por esto que lo que genera mayor interés en esta figura son los puntos de valor más bajo, donde la diferencia en el aporte de la interconexión parece ser lo suficientemente significativo para marcarse visualmente. Por ejemplo los meses de octubre y noviembre en antelación de una semana (que suele ser la de mejores valores), presentan un porcentaje de acierto del 75%, que para una interconexión tan pequeña puede ser indicador de fallos de mayor magnitud a la hora de pronosticar.

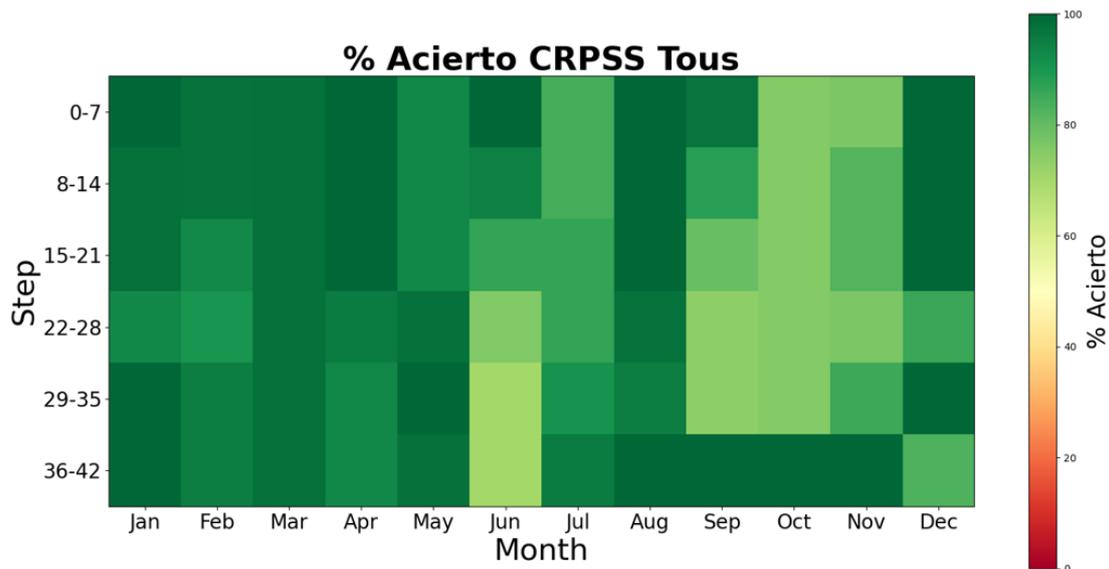


Figura 77. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales de entrada de Forata.

En esta misma línea de pensamiento, se observa grandes semejanzas entre los patrones mostrados en la Figura 77 con respecto al escenario de modelo perfecto presentado en la

Figura 78, debido seguramente al submodelo de embalses y a la buena bondad de ajuste del modelo en este punto, haciendo que los caudales simulados se parezcan a los observados. Aun así en el escenario de modelo perfecto se observa mucho más marcadamente la ligera disminución del porcentaje de acierto entre los meses de septiembre y diciembre, el cual no parece poder asociarse con las diferencias de la precipitación, ya que este patrón no se observa en la Figura 79. En general los porcentajes de acierto en este escenario son mayores o iguales al 73%.

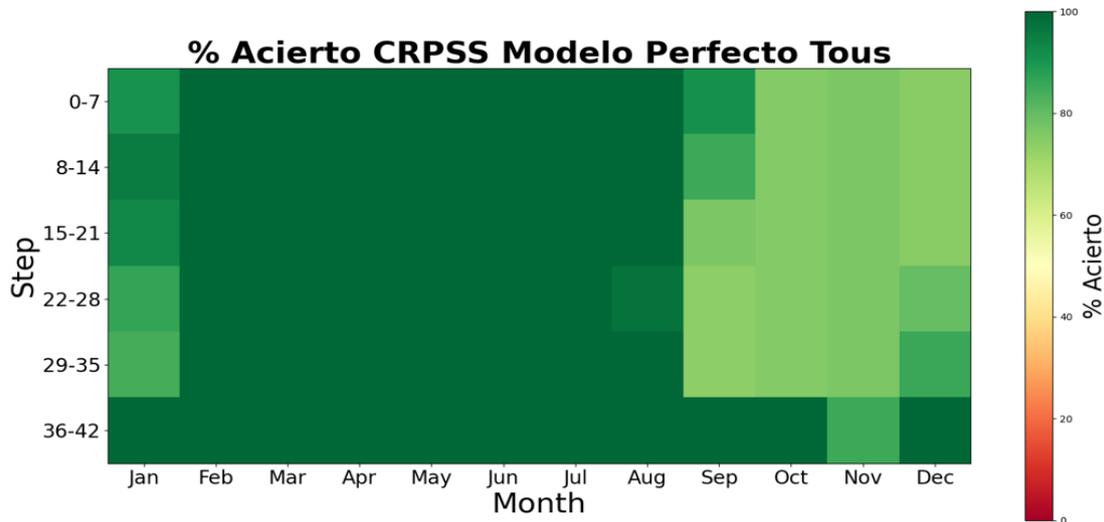


Figura 78. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en la entrada de Tous bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.

En contraste con lo anterior, en la Figura 79 se observa que la precipitación entre el ERA5 y los pronósticos presentan discrepancias mayores, ya que acá no interviene el submodelo de embalses. El mes de junio, como en gran parte de las figuras previamente observadas, es el que presenta mayor porcentaje de acierto, siendo el mínimo igual a 95%, y para la antelación de una semana los porcentajes de acierto son mayores o iguales al 88%. En esta figura se reconoce nuevamente valores bajos para el mes de febrero, un patrón que parece repetirse en la variable precipitación a lo largo de todos los puntos de interés, además de bajos porcentajes de acierto en el mes de julio, una tendencia que también se ve en varias estaciones.

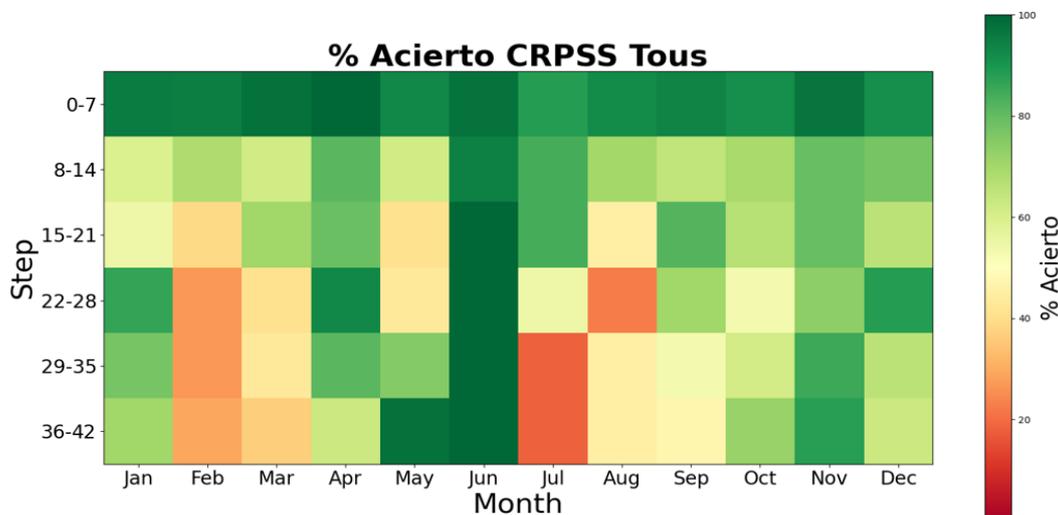


Figura 79. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Tous.

3.2.7 Huerto Mulet (Desembocadura).

Los resultados de en Huerto Mulet (Desembocadura) presentan un caso parecido al del embalse Tous, ya que está afectado por las sueltas forzadas de los embalses Tous, Bellús y Forata ubicados aguas arriba. Para este punto la intercuenca representa un 13% del total de la cuenca.

En la Figura 80 se presentan los diagramas de bigotes para los caudales pronosticados en la desembocadura del Júcar para el lanzamiento del 4 de enero de 2016. Tanto para este como los demás lanzamiento en esta estación, se presenta un caso muy semejante al presentado en el embalse de Tous, donde los caudales pronosticados son muy semejantes a los simulados con información del ERA5, en gran medida debido a los las sueltas impuestas aguas abajo en los embalses de Tous, Escalona y Naranjero. Aun así, a los pronósticos les cuesta identificar crecientes pronunciadas con una antelación mayor a los 10 a 15 días, y en ocasiones para antelación menor a 10 días estos representan crecientes que no se ven reflejadas en los caudales observados ni en los caudales generados con ERA5 (Anexo 13).

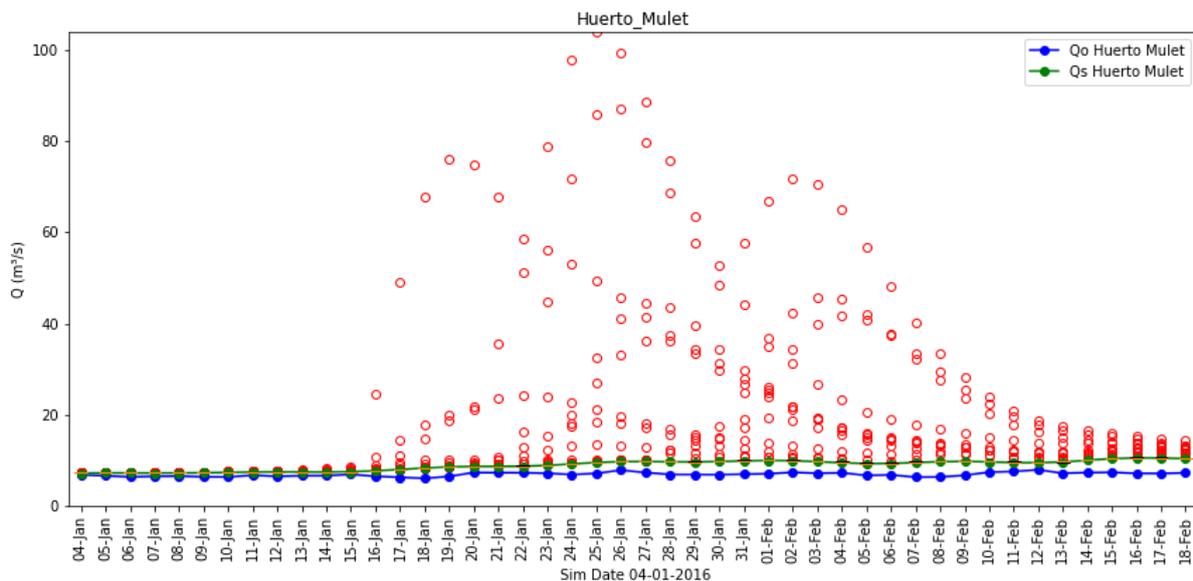


Figura 80. Predicciones de caudal en la estación Huerto Mulet (Desembocadura) para el lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016.

En la Figura 81 que contiene los diagramas de caja para los pronósticos de precipitación del lanzamiento del 4 de enero de 2016 en la desembocadura, se puede observar un patrón similar al presentado en las demás cuencas. En este lanzamiento se puede observar nuevamente como los eventos de precipitación de menos de 10 días alcanzan a ser representados por el modelo, pero más allá de este horizonte los pronóstico no registran estos eventos y proliferan los avalores anómalos. En los otros pronósticos de precipitación se continúa viendo este patrón y para antelaciones mayores a 10 días, o eventos no tan intensos, los pronósticos solo registran la tendencia a una temporada seca o húmeda, mas no los eventos de precipitación más puntuales (Anexo 14).

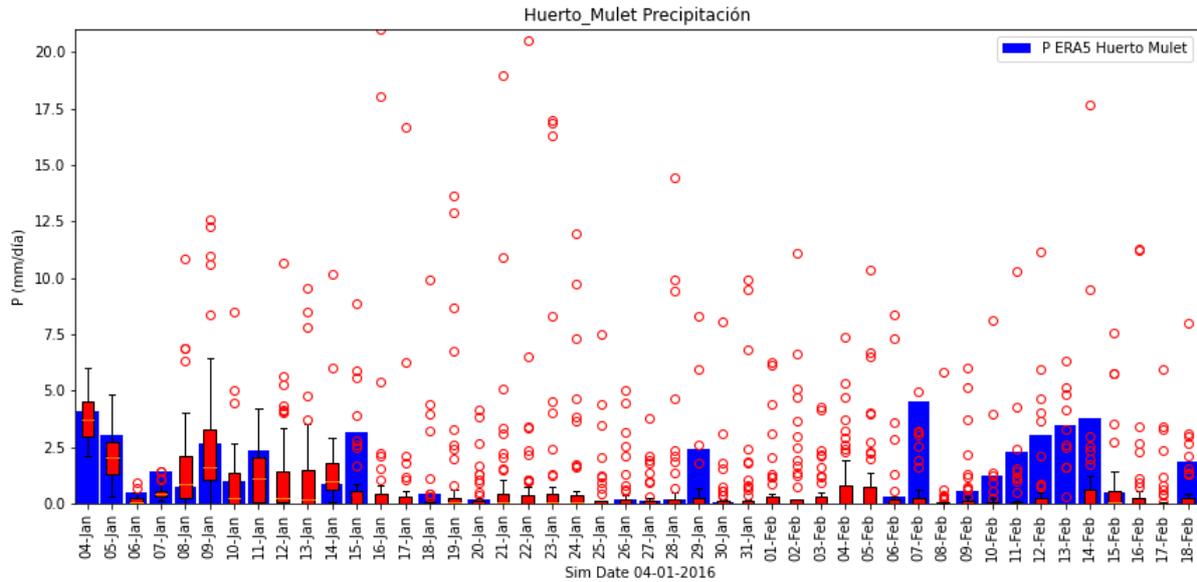


Figura 81. Comparación lluvia ERA5 vs predicciones de precipitación, lanzamiento del modelo el 4 de enero de 2016 en la cuenca de Huerto Mulet (Desembocadura).

En la Figura 82 se presenta el mapa de calor con el porcentaje de aciertos de CRPSS para los caudales en la estación de aforo de Huerto Mulet. En este destaca los bajos porcentajes de acierto presentes en los meses de mayo a agosto, indicando un pobre desempeño de los pronósticos hidrológicos al representar los caudales observados del verano, porcentaje de acierto entre el 0% y 41%. Esto llama la atención especialmente cuando se imponen las caudales de la gran mayoría de la cuenca, pero se puede deber a que en esta estación se presentan valores muy bajos durante el verano. En esta estación el porcentaje de acierto está altamente marcado por el mes de lanzamiento del pronóstico, más que por la antelación, si bien la primera semana de antelación es ligeramente mejor, no es algo muy marcado.

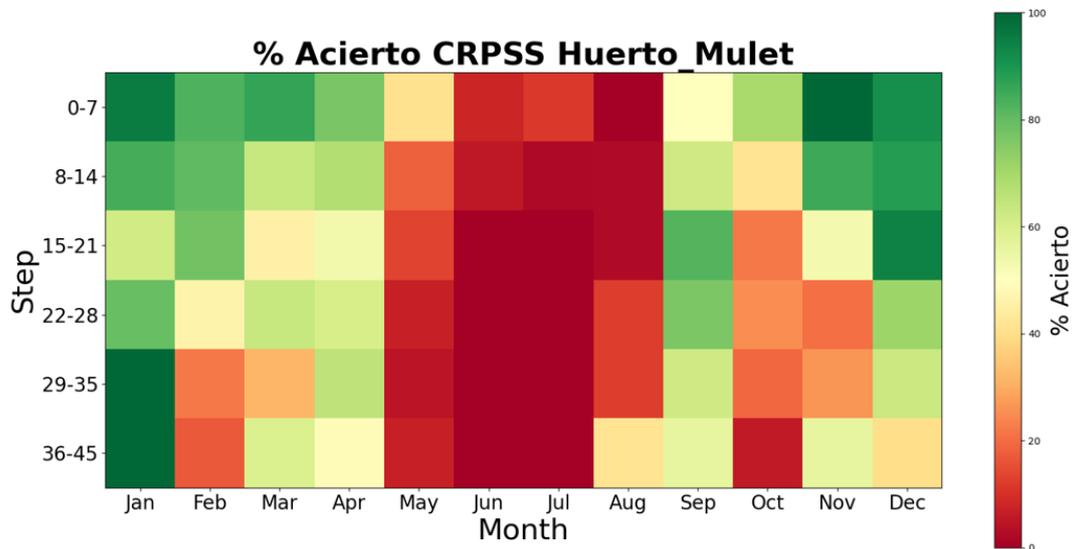


Figura 82. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales en Huerto Mulet (Desembocadura).

La Figura 83 muestra un mejor desempeño para el escenario de modelo perfecto, apuntando que los caudales pronosticados logran representar el caudal simulado con ERA5, pero no el caudal observado, indicando tal vez el problema radique el modelo hidrológico. Esto es

coherente con lo visto en la Figura 39, donde se observa que para el periodo de calibración el modelo en este punto no captura los caudales bajos.

En la Figura 83 también se observa que para las semanas 1 y 2 de antelación este escenario muestra un porcentaje de acierto mínimo del 92% y 61% respectivamente. En contraste, en los meses de octubre y noviembre se ven valores más bajos de porcentaje de acierto a partir de la segunda semana de antelación, con valores que van del 14% hasta el 53%.

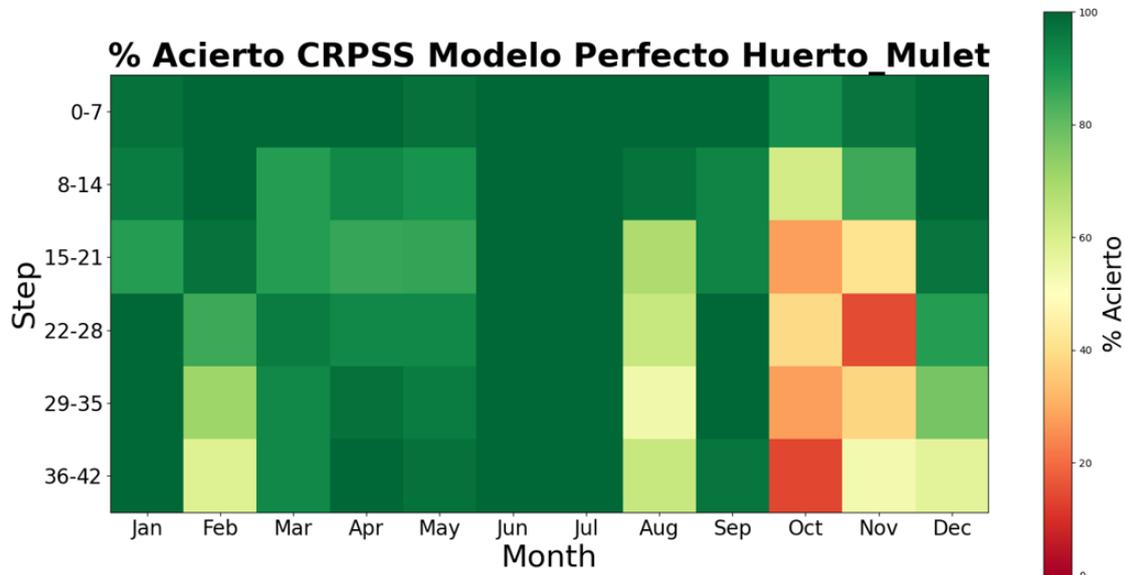


Figura 83. Porcentaje de acierto en predicciones de caudales Huerto Mulet (Desembocadura) bajo el escenario de modelo hidrológico perfecto y lluvia ERA5 perfecta.

El porcentaje de acierto de la precipitación pronosticada en la cuenca de Huerto Mulet se presenta en la Figura 84, presentando un patrón similar al visto en otras cuencas anteriores, valores de porcentaje de acierto alto para la primera semana de antelación (mayores al 87%) y el mes de junio (mayores al 97%), en contraste con los valores bajos entre febrero-marzo (entre 21% y 43%) y julio-septiembre (entre 18% y 50%) para antelación mayor a 3 semanas.

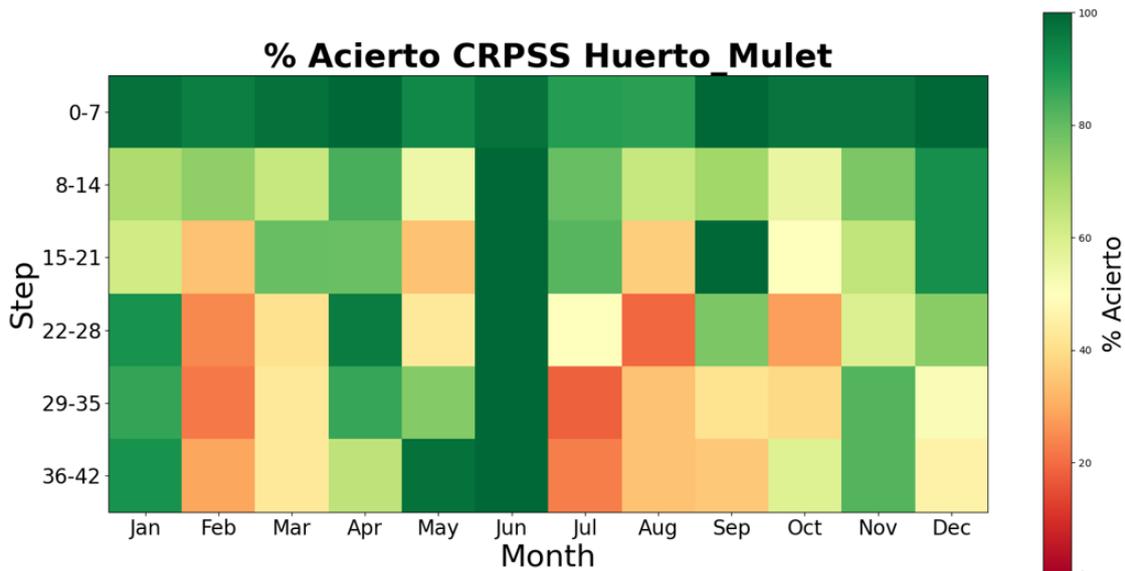


Figura 84. Porcentaje de acierto en predicciones de precipitación vs ERA5, en la cuenca de Huerto Mulet (Desembocadura).

3.3 ANÁLISIS SENSIBILIDAD DE LA AGREGACION TEMPORAL.

En este apartado se presentan los resultados del porcentaje de acierto del CRPSS para las estaciones de Pajaroncillo, Contreras y Huerto Mulet (Desembocadura) en resolución diaria y de 1, 2, 3 y 4 semanas, incluyendo en cada uno los diferentes casos estudiados: caudales, caudales en escenario de modelo perfecto y precipitación

3.3.1 Pajaroncillo

En la Figura 85 se presenta los resultados del porcentaje de acierto a resolución diaria para las variables caudal, caudal en escenario de modelo perfecto y precipitación en la cuenca de Pajaroncillo. Se observa que las tendencias vistas anteriormente se conservan, los primeros 4 días son los que tienen un mejor porcentaje de acierto, conservando estos valores muy altos previo al día 10 de antelación. Los meses de febrero y la temporada de otoño continúan siendo los periodos con menor porcentaje de acierto, particularmente para antelaciones mayores 15 días. En el pronóstico de caudales se observa que los meses de junio, julio y agosto tienen menor variabilidad, mostrando un patrón más homogéneo y con el porcentaje de acierto altos, en contraste como es de esperarse, la variable precipitación presenta un comportamiento más heterogéneo frente a la antelación diaria, pero conservando el patrón de aciertos y fallos descrito anteriormente, el cual logra propagarse en cierta medida a través del modelo hidrológico.

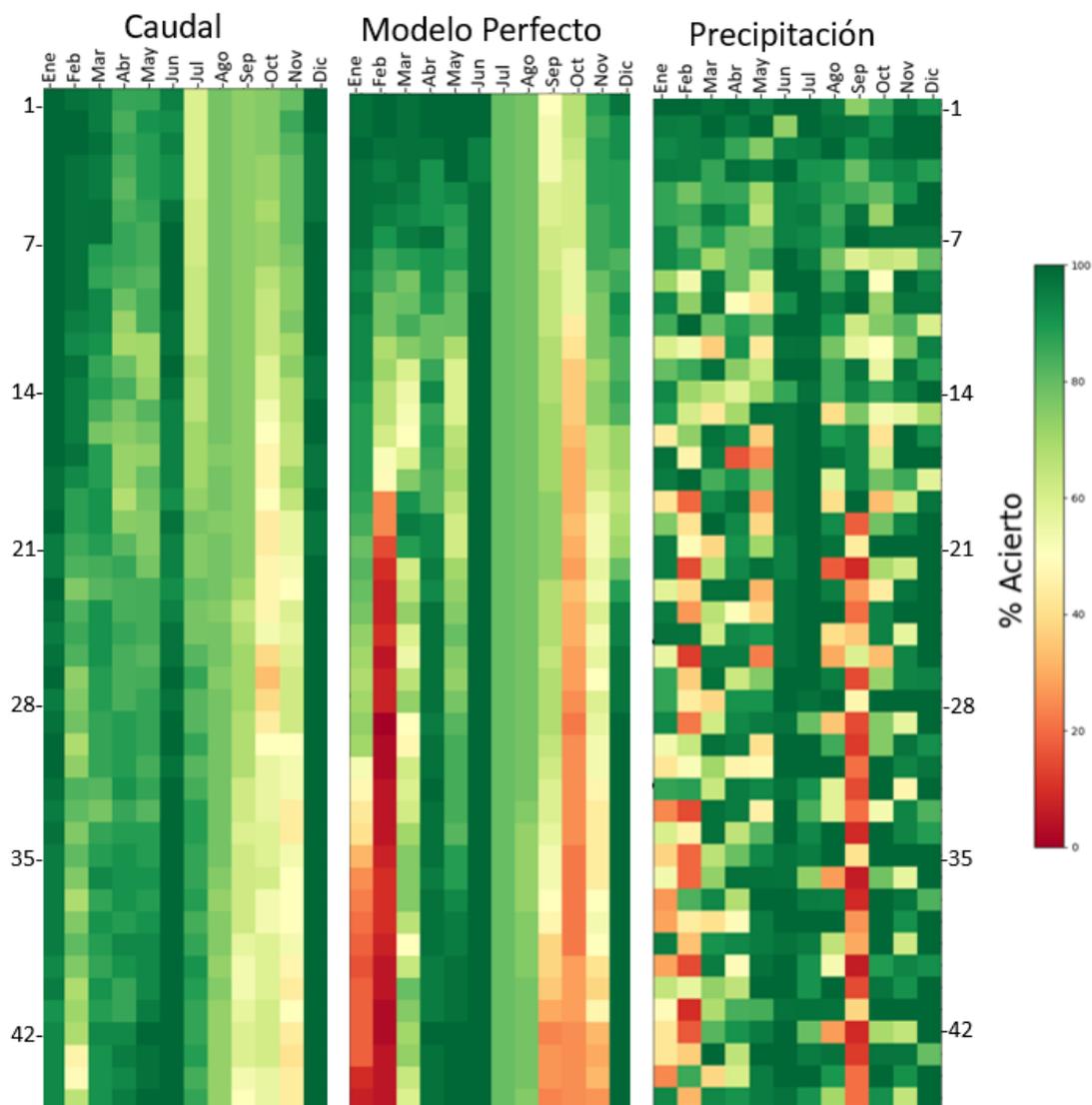


Figura 85. Porcentaje de acierto del CRPSS para valores diarios de Caudal, Escenario de Modelo Perfecto y Precipitación en la cuenca de Pajaroncillo.

En la Figura 86 se observa que el modelo hidrológico tiene un porcentaje de acierto superior 60% para encontrar el caudal medio mensual, mientras que el pronóstico de las primeras dos semanas se conserva sobre 65% para agregación semanal y de 2 semanas. En contraste para horizontes de pronóstico más amplios a 4 semanas el mes de febrero presenta valores porcentajes de acierto del 21%.

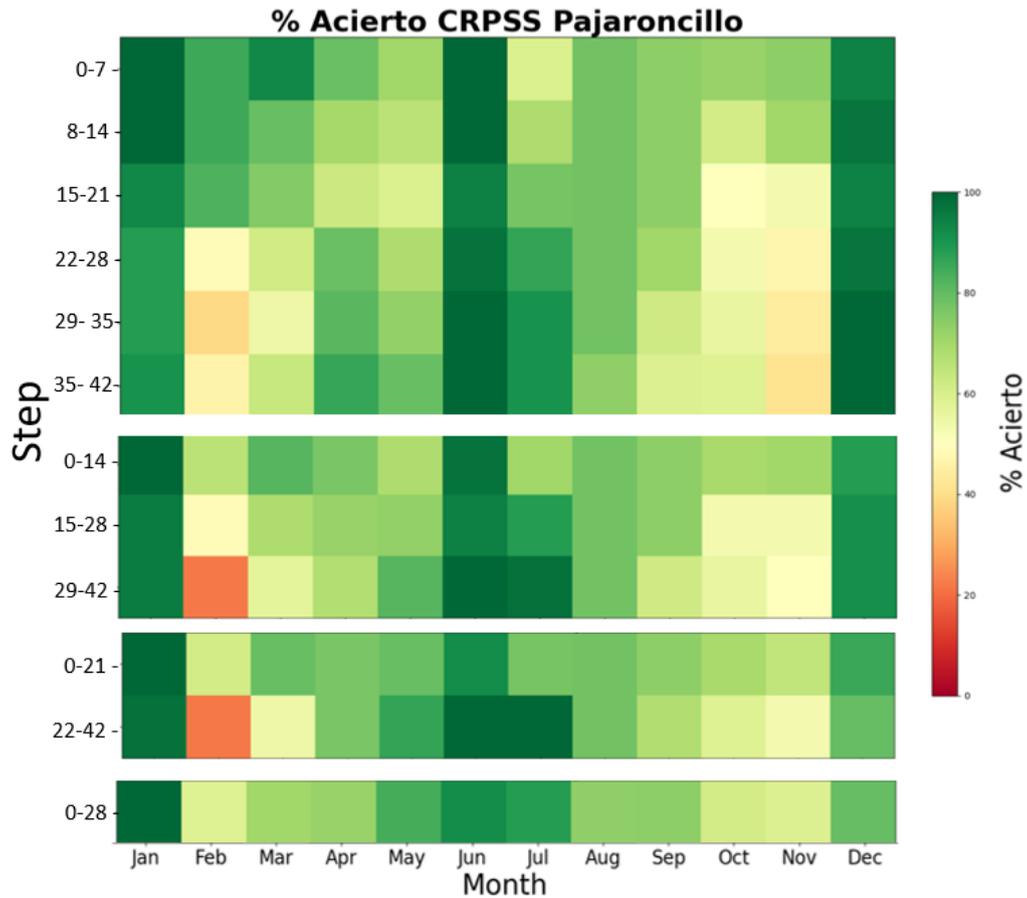


Figura 86. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones de valores de caudal en la cuenca de Pajaroncillo.

En figuras presentadas a continuación se observa que los fallos en la predicción de precipitación (Figura 88) se propagaran por el escenario de modelo perfecto (Figura 87) aun con una agregación de 4 semanas en los meses de febrero, octubre y septiembre. Las primeras dos semanas, tanto para agregación de una y dos semanas, son las que conservan un porcentaje de acierto superiores al 50% para todos los meses.

Por otro lado, en la Figura 88 se observa que el pronóstico de la precipitación se deteriora con una agregación temporal superior a una semana. En el caso de los pronósticos de la media a 4 semanas, los valores de porcentaje de acierto de los meses febrero, octubre y noviembre rondan entre el 47% y el 50%, mientras para los demás meses está sobre el 66%.

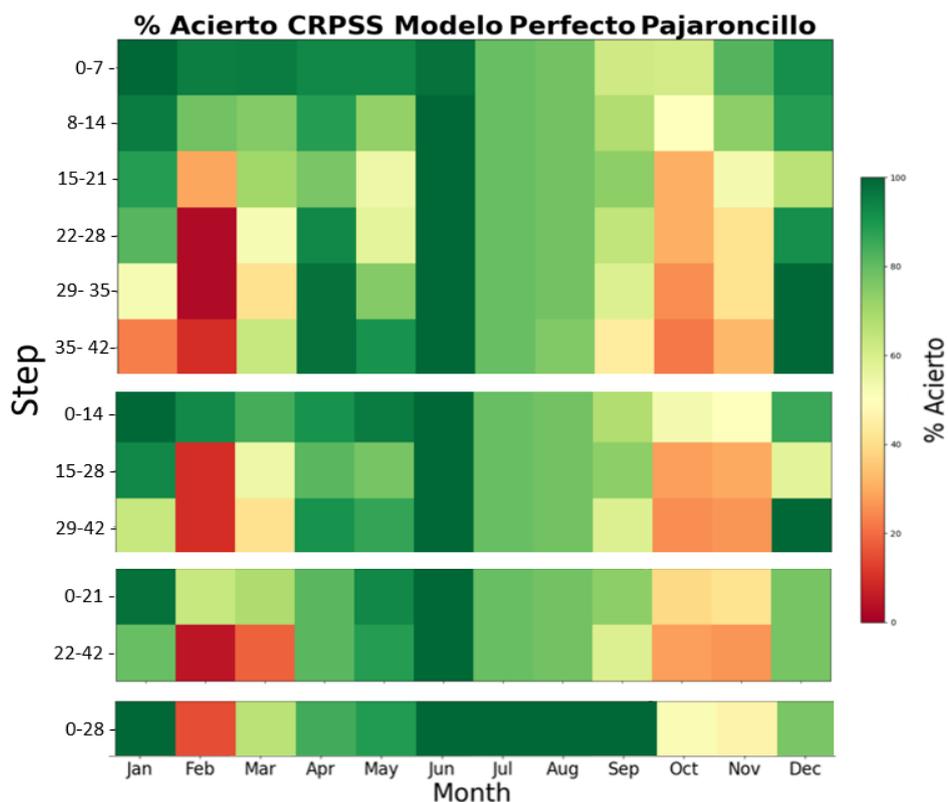


Figura 87. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones en el escenario de Modelo Perfecto en la cuenca de Pajaroncillo.

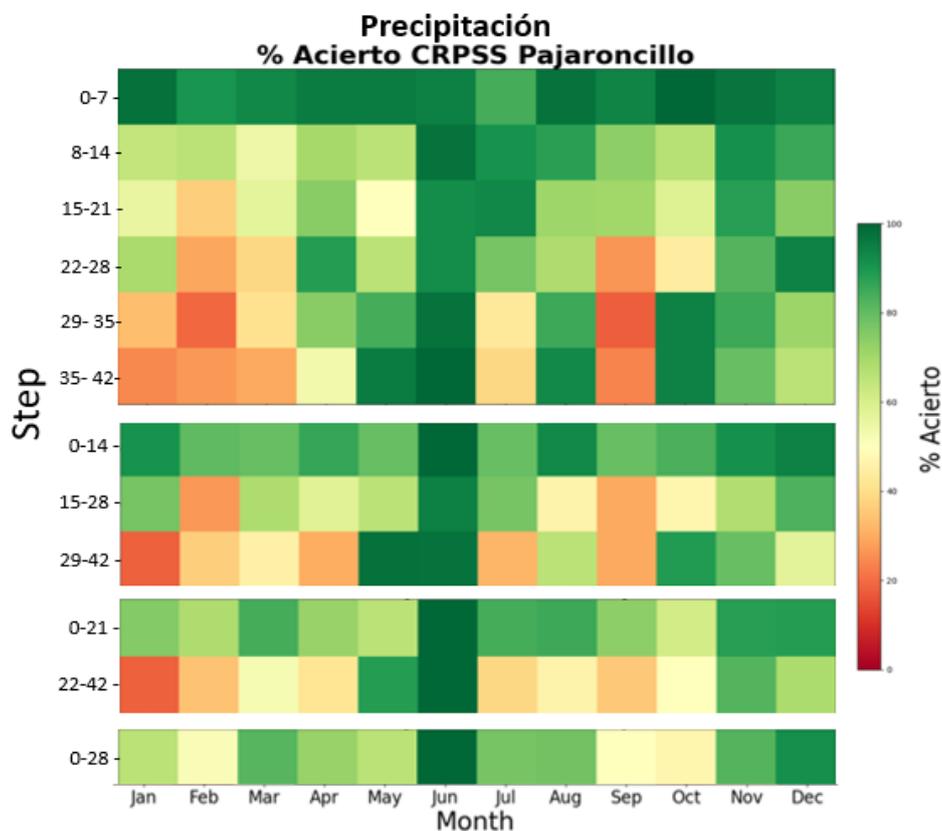


Figura 88. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones de valores de precipitación total en la cuenca de Pajaroncillo.

3.3.2 Contreras

En la Figura 89 se presenta los resultados del porcentaje de acierto a resolución diaria para las variables caudal, caudal en escenario de modelo perfecto y precipitación. Nuevamente se observa como es de esperarse un patrón más heterogéneo en la variable de precipitación, pero aun así es posible observar como los porcentajes de acierto bajos en la precipitación para febrero y septiembre en una antelación mayor a 20 días se propagan por el modelo hidrológico. Aun así, parece que independiente del alto porcentaje de acierto la precipitación en los primeros días de pronóstico, el escenario de modelo perfecto deteriora su capacidad de pronóstico en los meses de julio, agosto y septiembre independiente de la escala temporal.

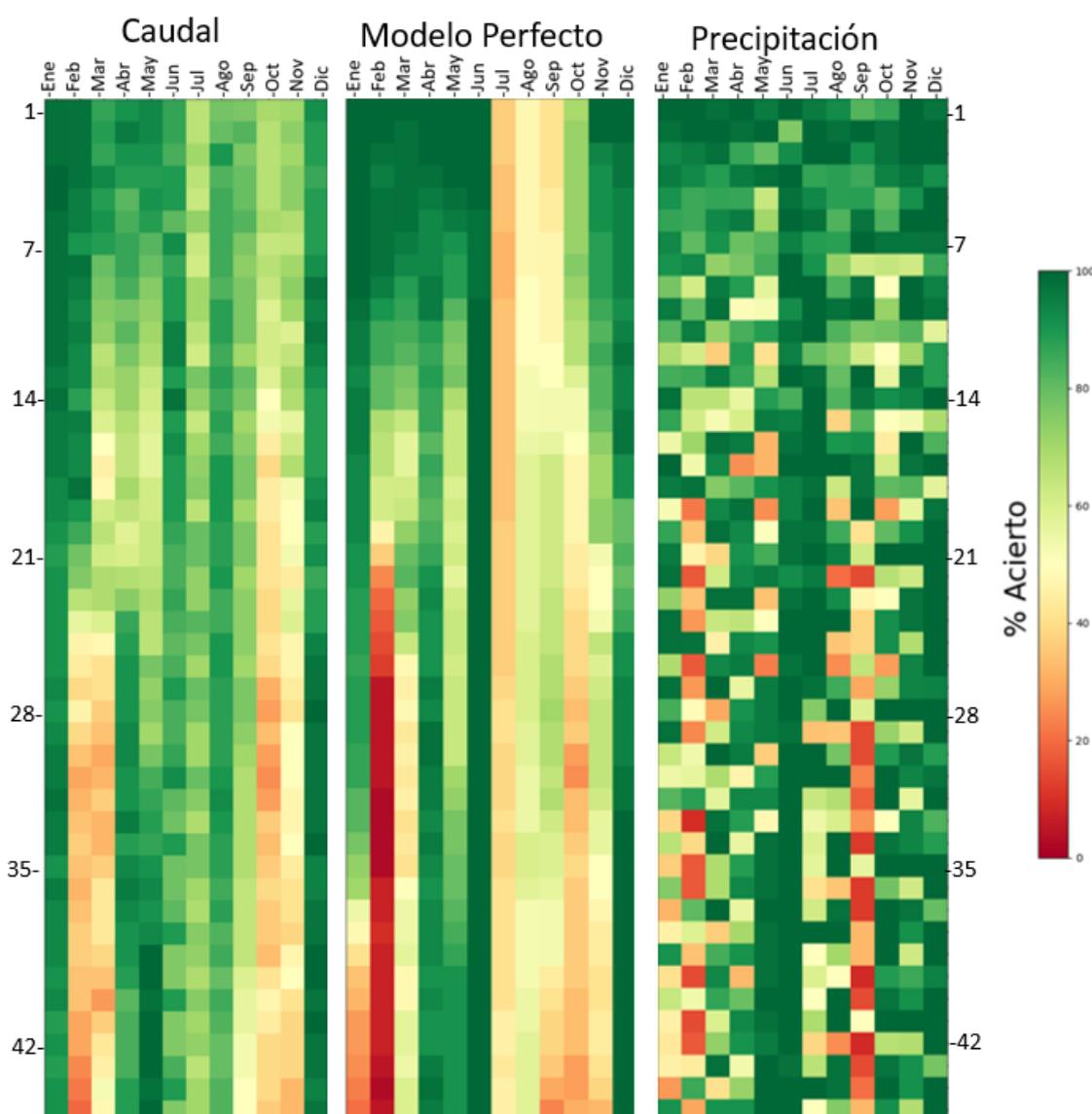


Figura 89. Porcentaje de acierto del CRPSS para valores diarios de Caudal, Escenario de Modelo Perfecto y Precipitación en la cuenca de Contreras.

Al comparar la Figura 90 con la Figura 89 parece que la agregación semanal es apropiada, ya que los cambios de patrón en el porcentaje de acierto diarios parecen darse en esta resolución. La agregación a dos semanas presenta a su vez una buena representación pero pierde el detalle en los primeros días que es cuando el pronóstico es el mejor. Por otro lado el pronóstico del caudal medio mensual tiene un porcentaje de acierto del 47% en el mes de febrero, pero es superior al 53% en los demás meses.

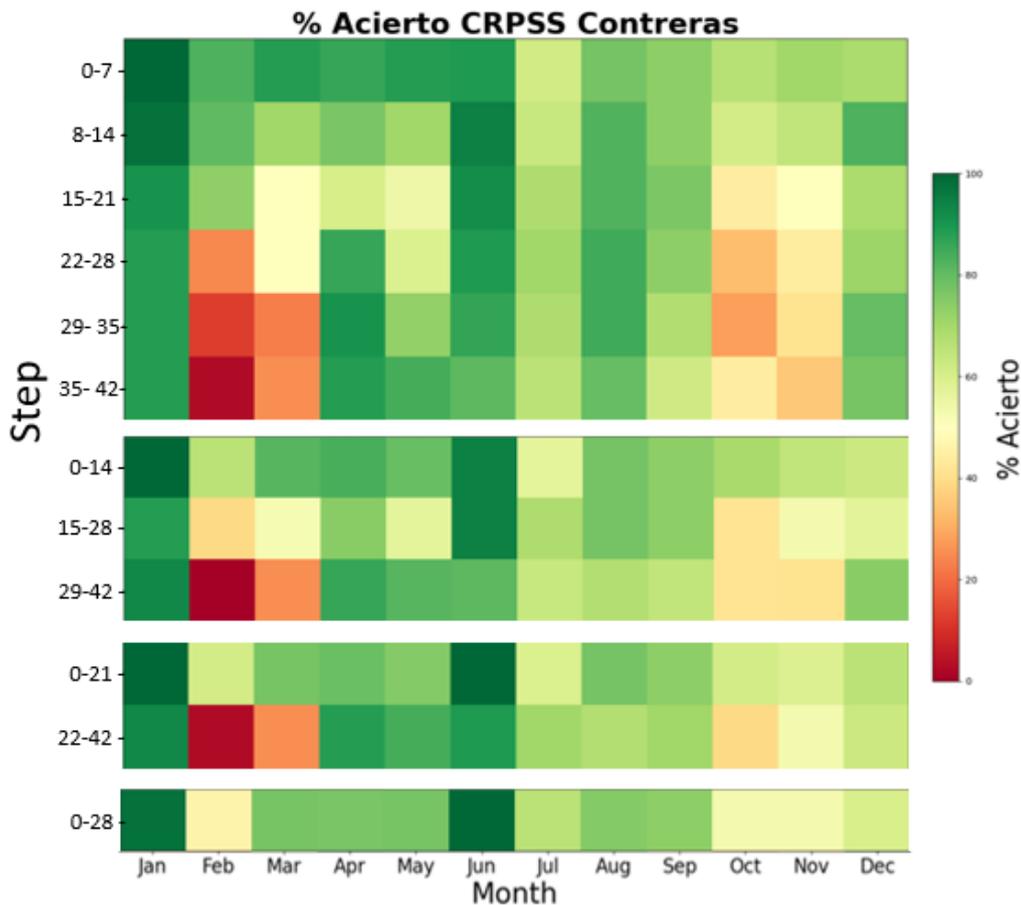


Figura 90. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones de valores de caudal en la entrada del embalse de Contreras.

En la Figura 91 se observa que en el escenario de modelo perfecto incluso en una agregación de 2 semanas se conservan los patrones observados a resolución diaria, pero para la precipitación presentada en la Figura 92, se observa que para resoluciones mayor a 1 semana se pierde capacidad de pronóstico de esa primera ventana de tiempo. En la Figura 92 también se puede observar que los pronósticos tienen un porcentaje de acierto igual o mayor al 50% para estimar la precipitación total del siguiente mes en la cuenca de Contreras.

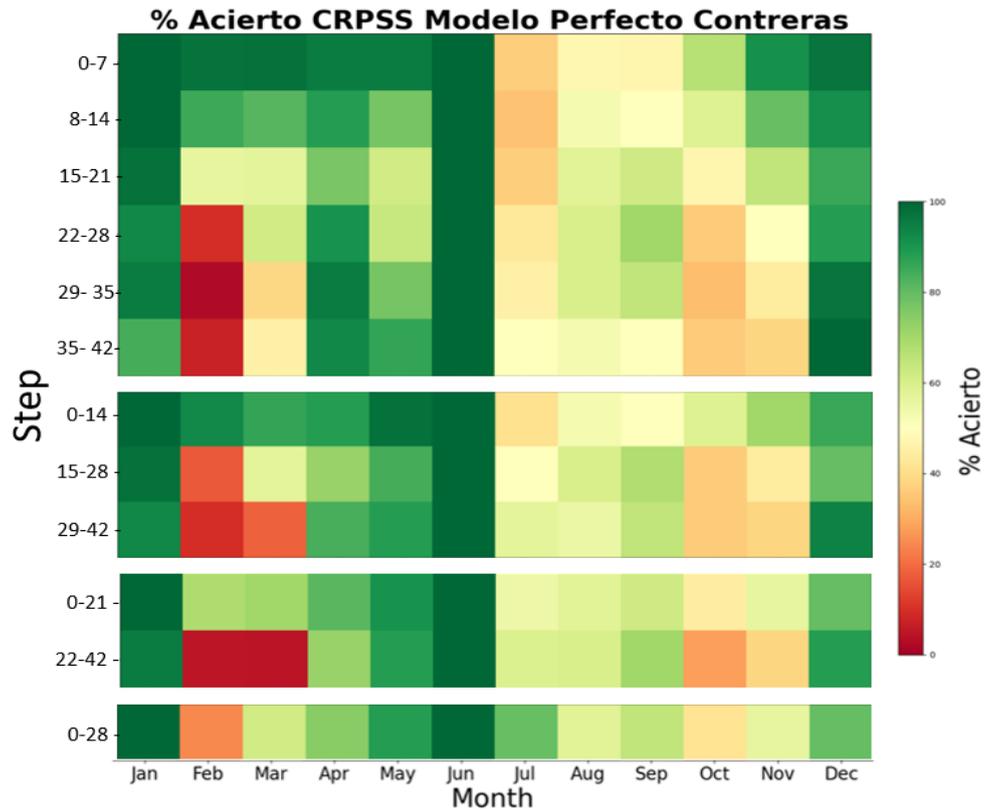


Figura 91. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones en el escenario de Modelo Perfecto en la cuenca de Contreras.

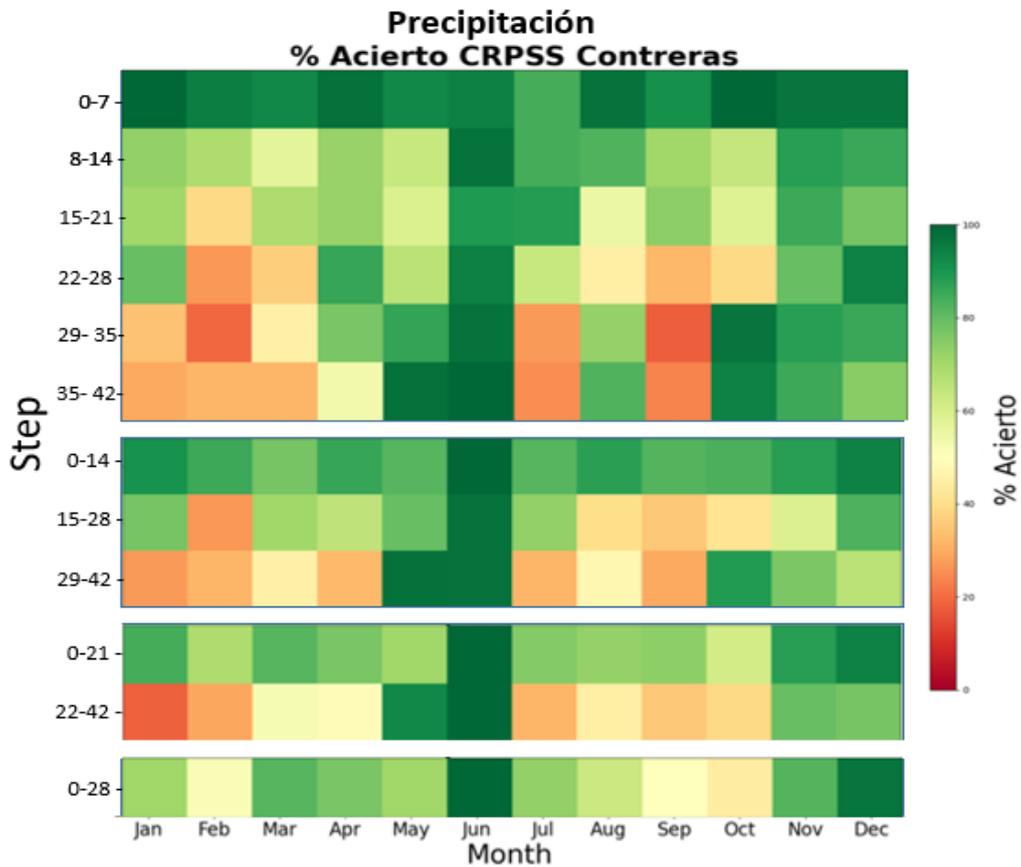


Figura 92. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones de valores de precipitación total en la cuenca del embalse de Contreras.

3.3.3 Huerto Mulet (Desembocadura).

En la Figura 93 se presenta los resultados del porcentaje de acierto a resolución diaria para las variables caudal, caudal en escenario de modelo perfecto y precipitación en la cuenca de Huerto Mulet. En esta figura se observan los patrones vistos previamente, mayor heterogeneidad en el porcentaje de acierto de la precipitación en resolución diaria y un mejor desempeño en valores con antelación menor a 7 días, patrones más continuos en el porcentaje de acierto del caudal, pero un pésimo desempeño del modelo en predecir caudales en la temporada de verano independiente de la antelación en este punto. Se observan que el deterioro existente en la predicción de la precipitación para antelaciones superiores a 14 días en los meses de febrero y final del verano se propaga por el modelo hidrológico, presentando un rezago témpora de 1 a 2 meses, el cual hace que se manifieste en los meses de otoño.

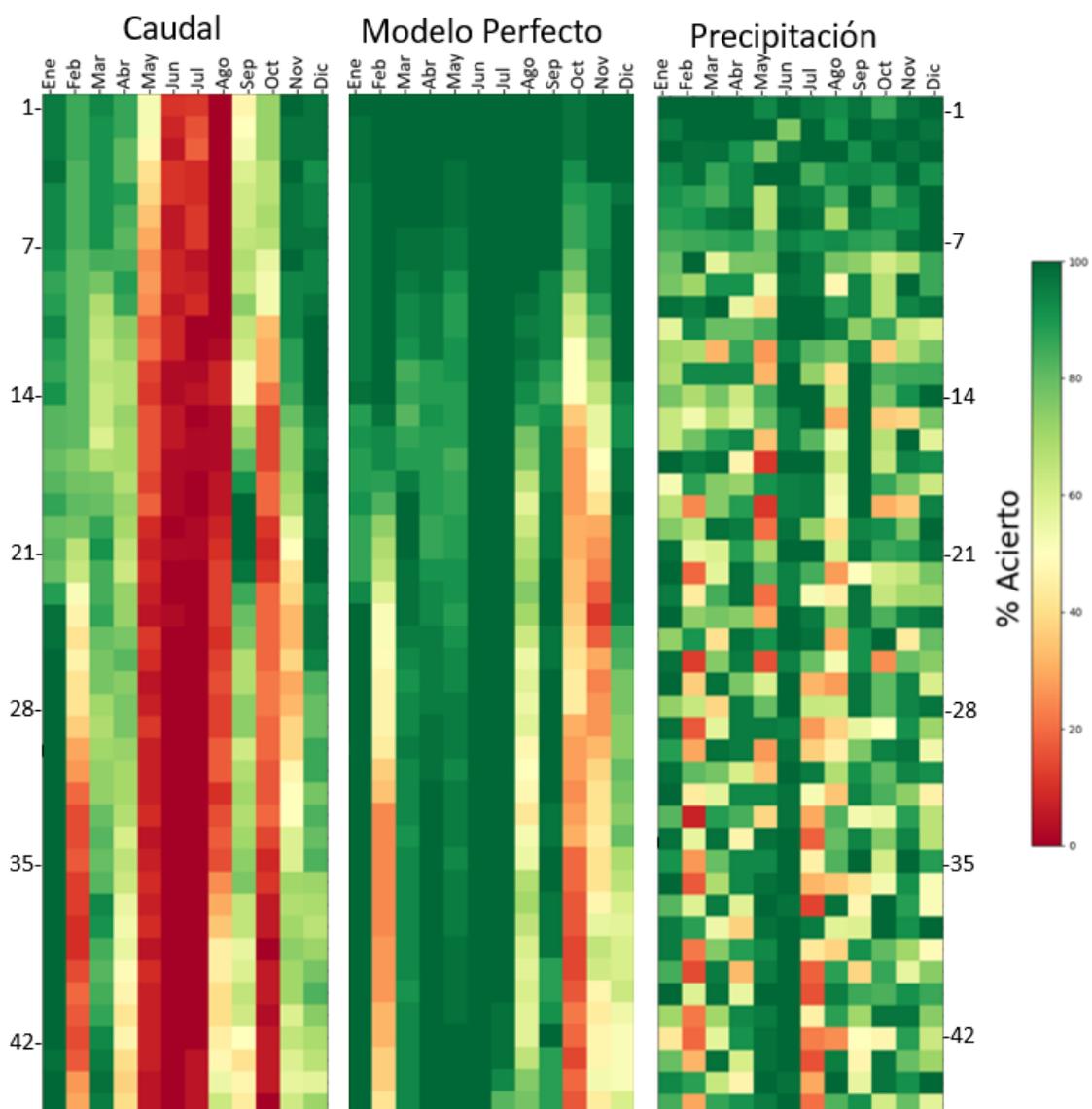


Figura 93. Porcentaje de acierto del CRPSS para valores diarios de Caudal, Escenario de Modelo Perfecto y Precipitación en la cuenca de Huerto Mulet (Desembocadura).

En la Figura 94 se observa que sin importar la agregación temporal, el modelo no reproduce bien los caudales del verano de Huerto Mulet. Para los demás meses del año con una agregación semanal, la primera ventana temporal tiene un porcentaje de acierto igual o mayor a 50%, para una agregación de dos semanas igual o mayor a 53% y para 4 semanas igual o mayor a 40%.

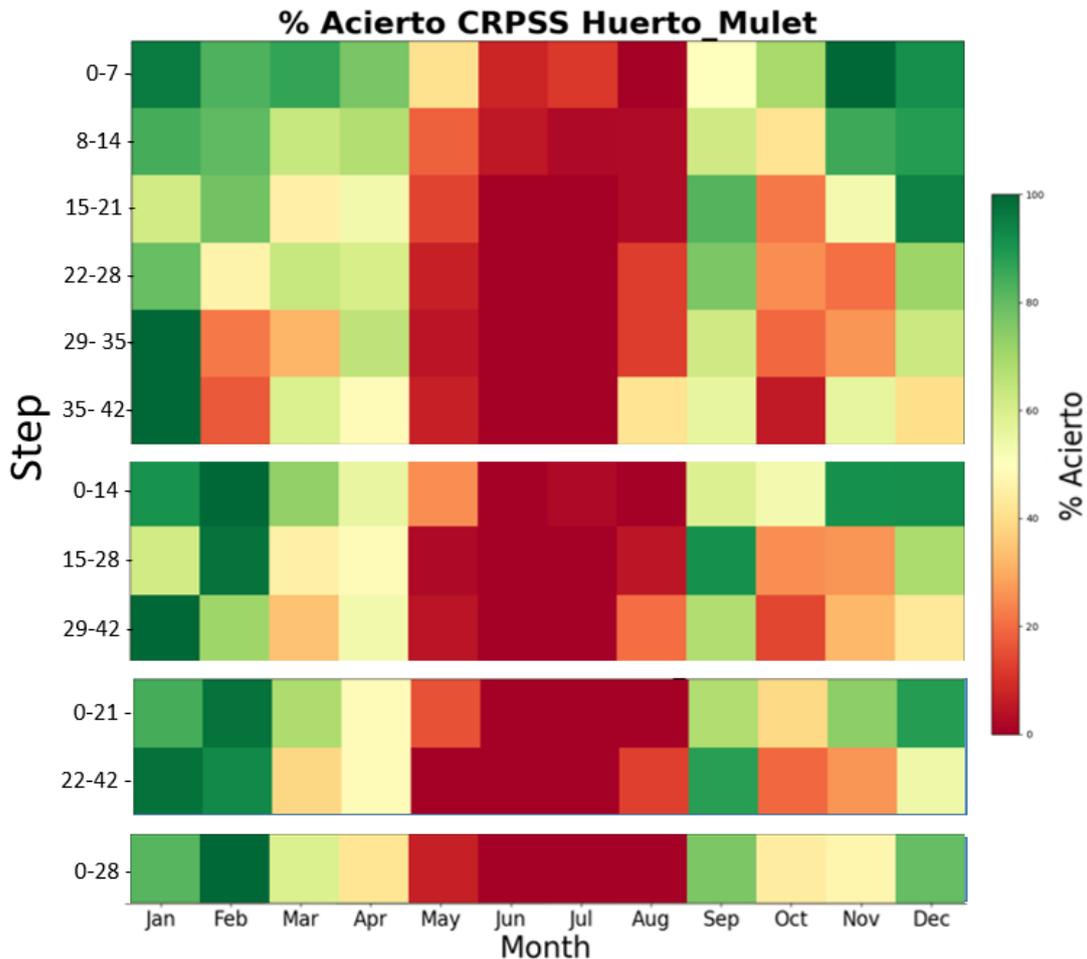


Figura 94. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones de valores de caudal en la cuenca de Huerto Mulet (Desembocadura).

En la Figura 95 se observa que el escenario de modelo perfecto en Huerto Mulet tiene muchos mejores resultados, presentando un gran desempeño incluso para agregación de 2 semanas y siendo noviembre el mes con mayores fallos de pronóstico. Por otro lado se reitera que al agregar la precipitación en intervalos mayores a una semana, se pierde el valor predictivo de los primeros días, pero con agregación de 2 semanas el porcentaje de acierto sigue siendo igual o mayor al 70%. Los pronósticos poseen un porcentaje de acierto mayor o igual al 50% para estimar la precipitación total del mes.

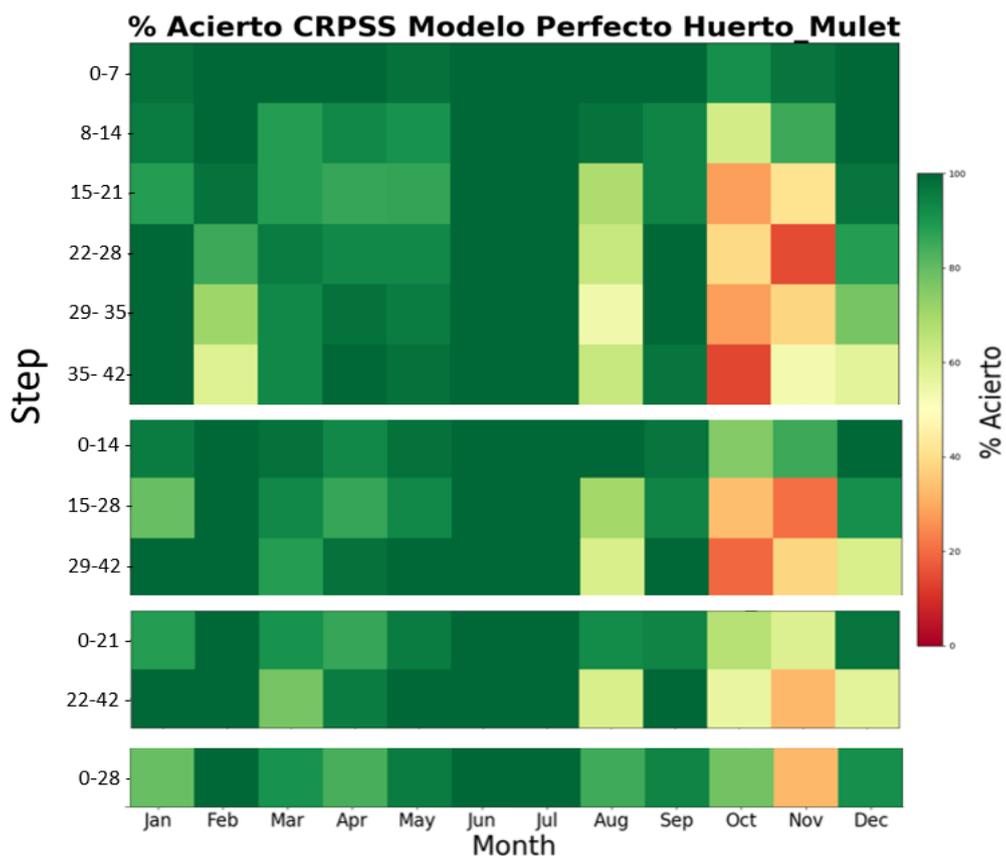


Figura 95. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones en el escenario de Modelo Perfecto en la cuenca de Huerto Mulet (Desembocadura).

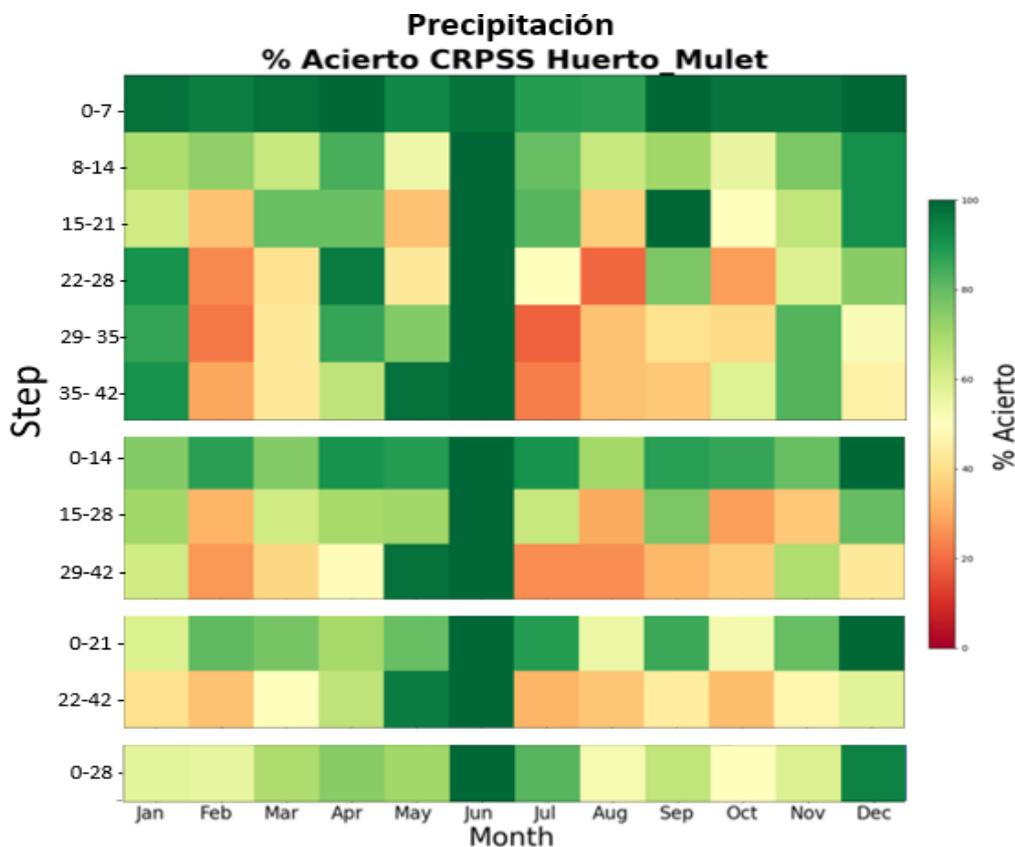


Figura 96. Porcentaje de acierto del CRPSS para diferentes agregaciones de valores de precipitación total en la cuenca de Huerto Mulet (Desembocadura).

4 CONCLUSIONES

En esta investigación se ha elaborado un modelo de hidrológico en la cuenca del Júcar para realizar predicciones subestacionales haciendo uso de los pronósticos meteorológicos del modelo ECMWF del proyecto de investigación S2S. Se estimó la capacidad predictiva de los caudales pronosticados haciendo uso del Skill Score CRPSS como métrica.

Al crear y calibrar el modelo hidrológico se encontraron resultados satisfactorios en Pajaroncillo, donde se ha calibrado el modelo, obteniendo un NSE de 0.55. Si bien, tanto en la validación espacial como en la validación espacio- temporal los índices presentaban un deterioro del modelo, el ajuste visual se consideró aceptable, ya que en la mayoría de los puntos se representaba adecuadamente la dinámica temporal de los caudales, fallando en algunos puntos, principalmente en la magnitud del caudal base y siendo el desempeño muy sensible al calentamiento previo.

La calibración puntual del factor corrector del flujo subterráneo profundo (FC7) para cada punto utilizado en la validación espacial y espaciotemporal, permitió un mejor desempeño del modelo en cada uno de estos. Esto se vio representado en mejores índices de bondad, mejor ajuste visual y un mejor comportamiento de los almacenamientos dentro del modelo hidrológico. Aun así vale señalar que los caudales de entradas a los embalses no son medidos si no estimados por balance, lo que introduce en si algo de incertidumbre en el modelo.

Una vez con el modelo hidrológico plenamente calibrado para cada uno de los puntos de interés, se procedió a la simulación de los pronósticos meteorológicos para ver el comportamiento de las predicciones hidrológicas obtenidas en este proceso.

En Pajaroncillo y Alarcón fueron los puntos donde se encontró un mejor porcentaje de acierto de los pronósticos de caudal, que a su vez son los puntos que obtuvieron mejores ajuste en el proceso de validación del modelo hidrológico, seguidos de Contreras, que presenta valores de porcentaje de acierto aceptables hasta las tres semanas de antelación del pronóstico. Bellús y Forata para antelación superior a una semana presentan bajos porcentajes de acierto para los meses de febrero-marzo y octubre noviembre, meses asociados al pronóstico del inicio de la primavera y de pleno otoño.

Los altos porcentajes de acierto en Tous se asocian a las sueltas observadas impuestas de los embalses aguas arriba, más que a la capacidad de predecir la intercuenca que es relativamente pequeña, mientras que en la desembocadura se presenta grandes fallos en el pronóstico hidrológico entre mayo y agosto, meses de verano, debido principalmente al fuerte grado de antropización.

Aun así, algunos de estos fallos en la predicción hidrológica se pudieran asociar a fallos en la predicción meteorológica, ya que analizando la precipitación pronosticada frente a la observada en la cuencas de interés, tomando como observada el ERA5, se observa que los pronóstico meteorológicos tienen un alto porcentaje de acierto para la primera semana de antelación, pero para plazos mayores cae sensiblemente la capacidad predictora. También se

observa que el porcentaje de acierto de los pronósticos meteorológicos lanzados en junio es mayor al de los otros meses, lo que parece repercutir en mejores porcentajes de acierto para los caudales de este mes. Así mismo parece que el aumento de los fallos en la predicción meteorológica en el mes febrero y en los meses otoño para antelaciones superiores a una semana, se propagan por el modelo hidrológico afectando la calidad del pronóstico de este.

Se considera que los bajos porcentajes de acierto en los pronósticos del otoño son asociados a la dificultad de predecir con rigor la temporada de lluvias, en especial cuando estas pueden tener un carácter torrencial, y teniendo en cuenta que predecir lluvias si aún se está en período seco puede ser más difícil. En contraste los altos porcentaje de acierto en el mes de junio, diciembre y enero se asocian a que estos meses no representan un punto de inflexión tan marcado en la climatología de la cuenca, por lo que para la venta de 47 días las condiciones iniciales no son tan distinta a lo que se puede ver en los días siguientes.

En general para la precipitación y caudales pronosticados, se observa la tendencia que los eventos con una antelación de menos de 10 días alcanzan a ser representados por el modelo, para antelaciones de 15 o hasta 20 días los eventos de gran magnitud pueden empezar a capturarse, pero con una magnitud menor, y para antelaciones mayores los pronósticos de caudal y precipitación tan solo prevén temporadas secas-húmedas o aumento-disminución gradual del caudal, sin visualizar los eventos de gran intensidad.

Lo anterior se rectificó en el análisis del porcentaje de acierto para diferentes agregaciones temporales. En el caso de la variable precipitación, se encontró un descenso significativo en el porcentaje de acierto para agregaciones mayores a una semana, ya que se perdía el valor predictivo de los primeros días del pronóstico, pero aun así para agregación de dos semanas los porcentajes de acierto del primer intervalo suelen ser iguales o mayores al 50%.

En el caso de los caudales, las agregaciones de hasta dos semanas tienen un buen desempeño en los pronósticos, pero la mayoría de aciertos se observan en la primera semana del pronóstico. Es por esto que se considera adecuado el análisis de los pronósticos subestaciones del S2S con una agregación temporal semanal.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome, 300(9)*, D05109.
- Burman, R. D., & Pochop, L. O. (1994). *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data*. Elsevier.
- CHJ. (s. f.-a). *ANUARIO DE AFOROS 2018—2019. EMBALSES. Organismo de cuenca*. ANUARIO DE AFOROS 2018 - 2019. Recuperado 26 de abril de 2023, de https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/afo/embalse-cdr_datos.asp?gr_cuenca_id=8
- CHJ. (s. f.-b). *Confederación Hidrográfica del Júcar | Hispagua*. Recuperado 31 de enero de 2023, de <https://hispagua.cedex.es/instituciones/confederaciones/jucar>
- CHJ. (2007). *Estudio general sobre la Demarcación Hidrográfica del Júcar*. https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Documents/Plan-Hidrologico-cuenca-2009-2015/Est_Gral_CHJ_ini.pdf
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158(3), 265-284. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90057-4)
- ECMWF. (2022, julio). *S2S archive—S2S - ECMWF Confluence Wiki*. <https://confluence.ecmwf.int/display/S2S/S2S+archive>
- Francés, F. (2018). Implementación de un modelo distribuido. *MIHMA*.

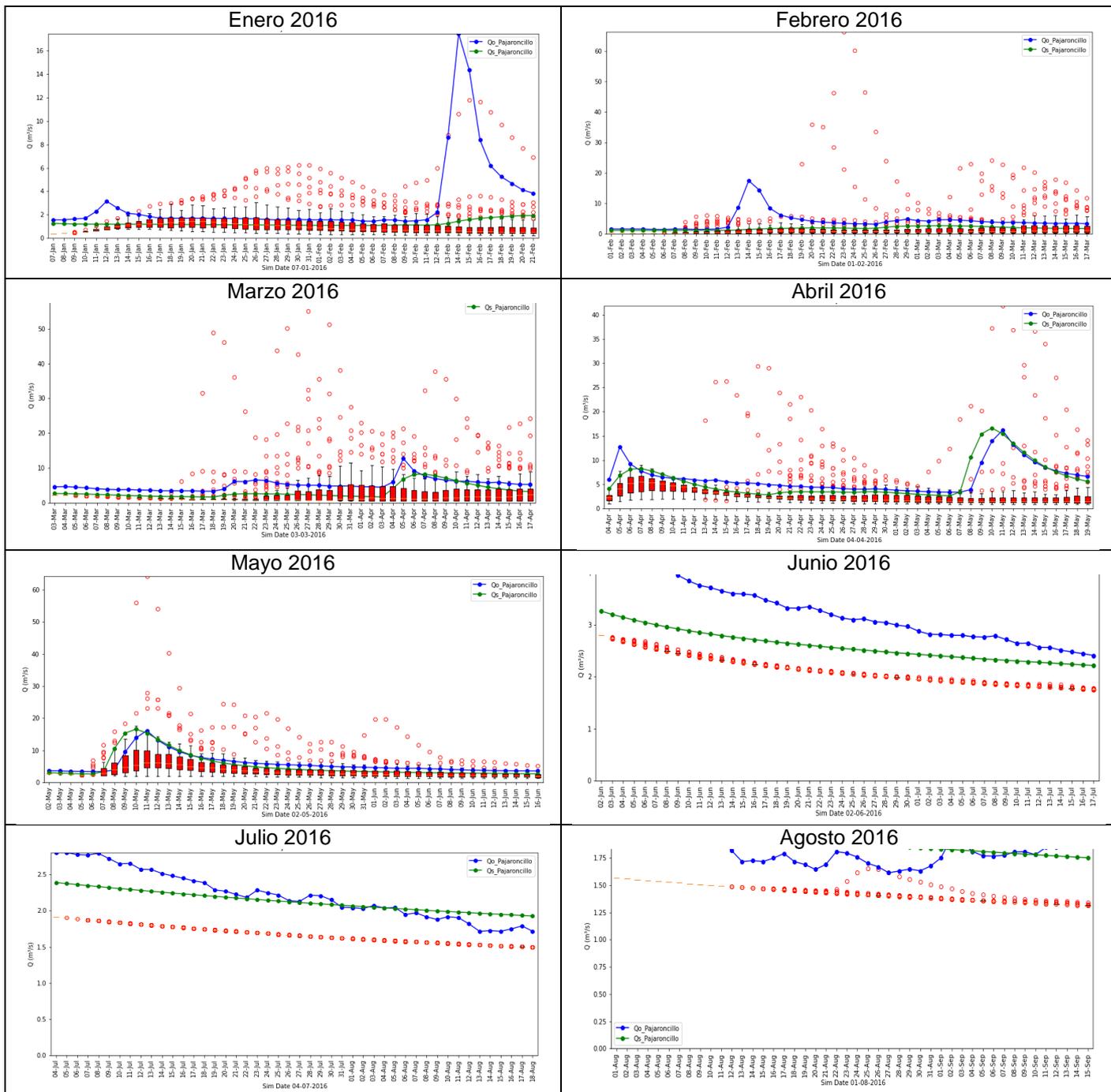
- GIMHA, E. (2014). DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DISTRIBUIDO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA TETIS v.9. *Ingeniería del agua*, 18(1), ix. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3293>
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). Reference Crop Evapotranspiration From Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Huscroft, J., Gleeson, T., Hartmann, J., & Börker, J. (2018). Compiling and Mapping Global Permeability of the Unconsolidated and Consolidated Earth: GLobal HYdrogeology MaPS 2.0 (GLHYMPS 2.0). *Geophysical Research Letters*, 45(4), 1897-1904. <https://doi.org/10.1002/2017GL075860>
- Leonards, G. A. (1962). *Foundation Engineering*. McGraw-Hill.
- Li, W., Duan, Q., Miao, C., Ye, A., Gong, W., & Di, Z. (2017). A review on statistical postprocessing methods for hydrometeorological ensemble forecasting. *WIREs Water*, 4(6), e1246. <https://doi.org/10.1002/wat2.1246>
- METEOGALICIA. (s. f.). *Glosario: La predicción por conjuntos* [Glosario: La predicción por conjuntos]. METEOGALICIA. Recuperado 11 de julio de 2023, de https://www.meteogalicia.gal/web/informacion/glosario/pred8.action?request_locale=es
- Mishra, N., Prodhomme, C., & Guemas, V. (2019). Multi-model skill assessment of seasonal temperature and precipitation forecasts over Europe. *Climate Dynamics*, 52. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4404-z>

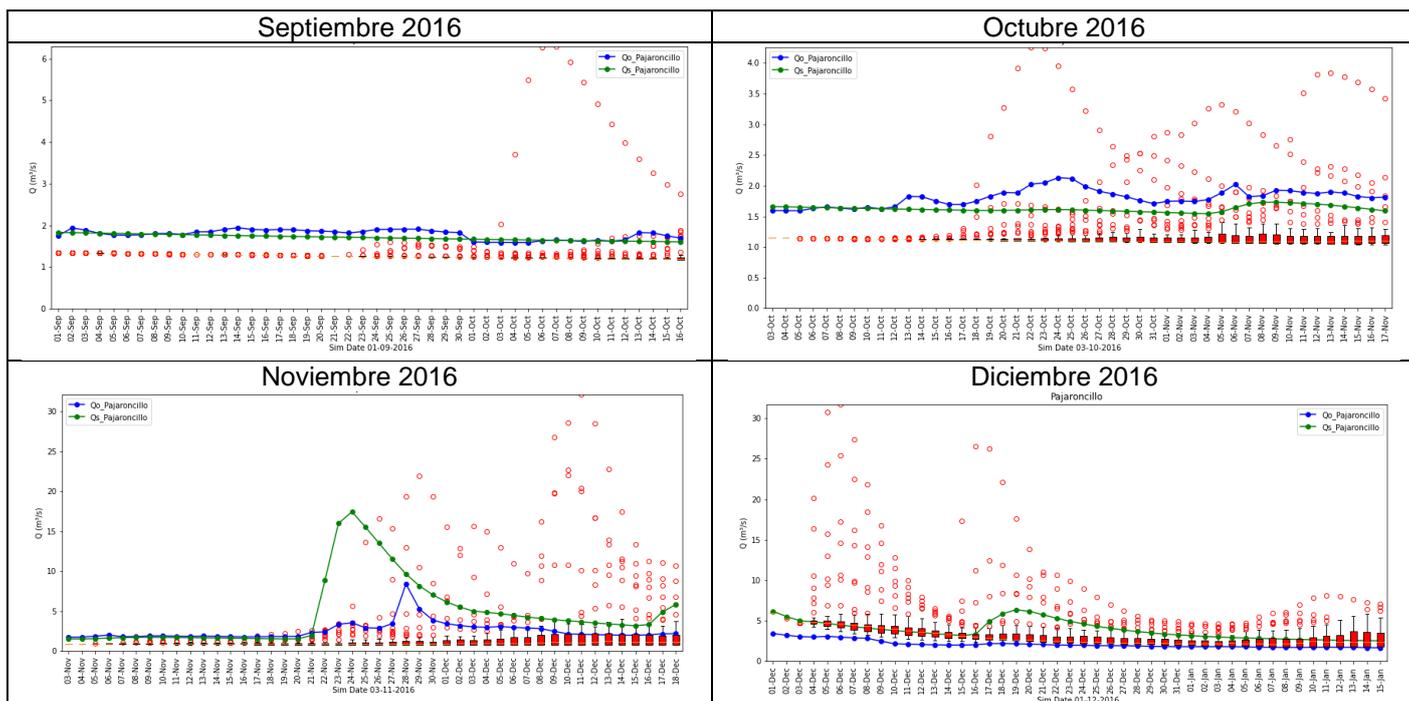
- Múnera, J. C., Francés, F., Todini, E., & Coccia, G. (2011). *Evaluación de la incertidumbre en la simulación de caudales en puntos no aforados con un modelo distribuido y mediante un procesador estocástico*.
- Pastor Saavedra, A., Sánchez García, E., Voces Aboy, J., Navascués Fernández-Victorio, B., & Doblas-Reyes, F. (2018). Predicciones mensual, estacional y anual. En C. Santos Burguete, *Física del caos en la predicción meteorológica* (pp. 447-476). Agencia Estatal de Meteorología. <https://doi.org/10.31978/014-18-009-X.28>
- Pastor Saavedra et al. - 2018—Predicciones mensual, estacional y anual.pdf.* (s. f.).
- Romero, Sergio. (2023). *EVALUACIÓN DEL USO DE PREDICCIONES METEOROLÓGICAS SUBESTACIONALES COMO APOYO A LA GESTIÓN DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR* [Unversitat Politèctina de Valencia]. <http://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/3293>
- Samani, Z. (2000). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data (Hargreaves-Samani equation). 2000.
- Santos Burguete, C. (2018). Sistemas de predicción por conjuntos (SPC). En C. Santos Burguete (Ed.), *Física del caos en la predicción meteorológica* (pp. 165-192). Agencia Estatal de Meteorología. <https://doi.org/10.31978/014-18-009-X.13>
- Todini, E. (2008a). A model conditional processor to assess predictive uncertainty in flood forecasting. *International Journal of River Basin Management*, 6(2), 123-137. <https://doi.org/10.1080/15715124.2008.9635342>
- Todini, E. (2008b). A Model Conditional Processor to Assess Predictive Uncertainty in Flood Forecasting. *IAHR, June 2008*. <https://doi.org/10.1080/15715124.2008.9635342>
- Tóth, B., Weynants, M., Pásztor, L., & Hengl, T. (2017). 3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution. *Hydrological Processes*, 31(14), 2662-2666. <https://doi.org/10.1002/hyp.11203>

Vélez, J. J. (2005). *DESARROLLO DE UN MODELO DISTRIBUIDO DE PREDICCIÓN EN TIEMPO REAL PARA EVENTOS DE CRECIDAS* [Universitat Politècnica de Valencia]. <https://doi.org/10.13140/2.1.4996.1288>

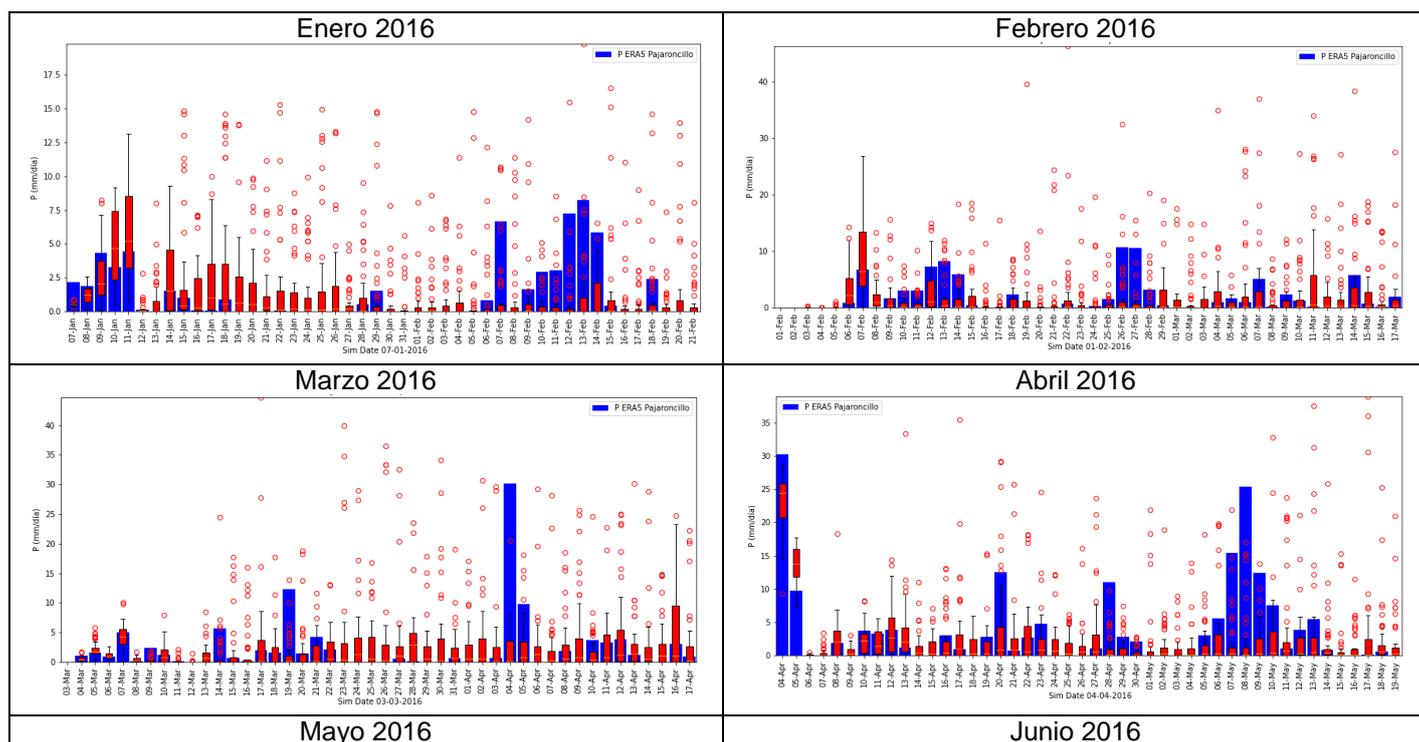
Vitart, F., & Robertson, A. W. (2018). The sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0013-0>

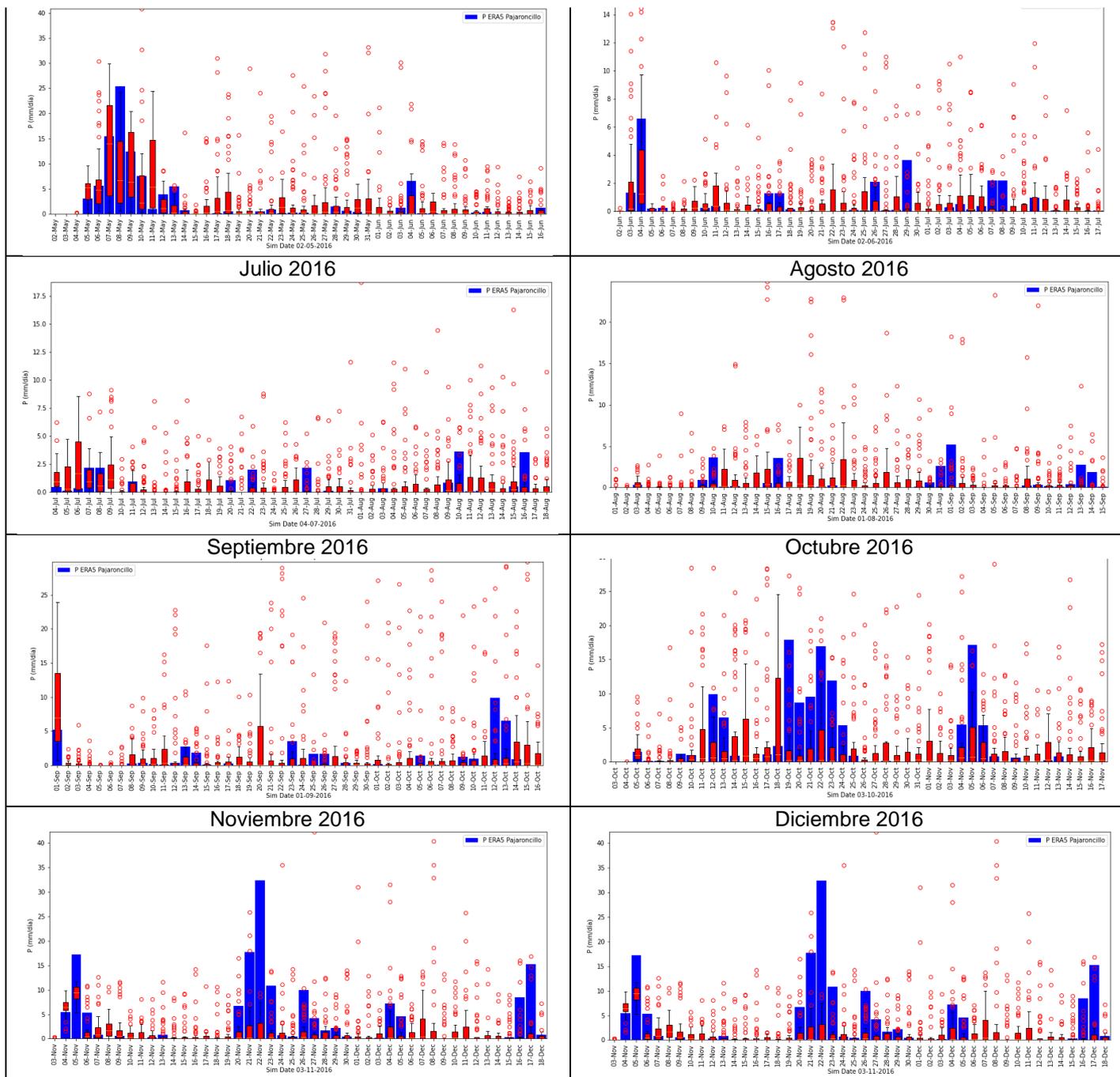
Anexo 1. Diagramas de caja representativos de los pronósticos de caudal en la cuenca de Pajaroncillo



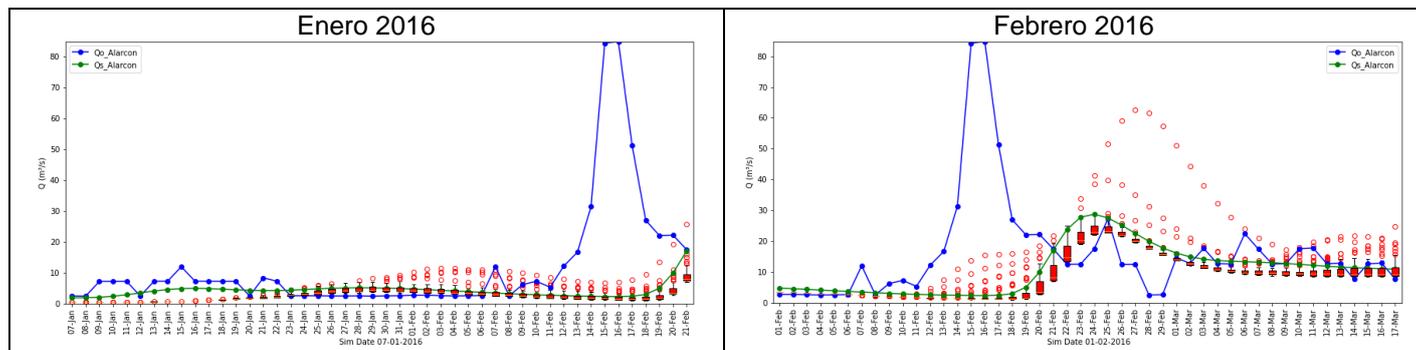


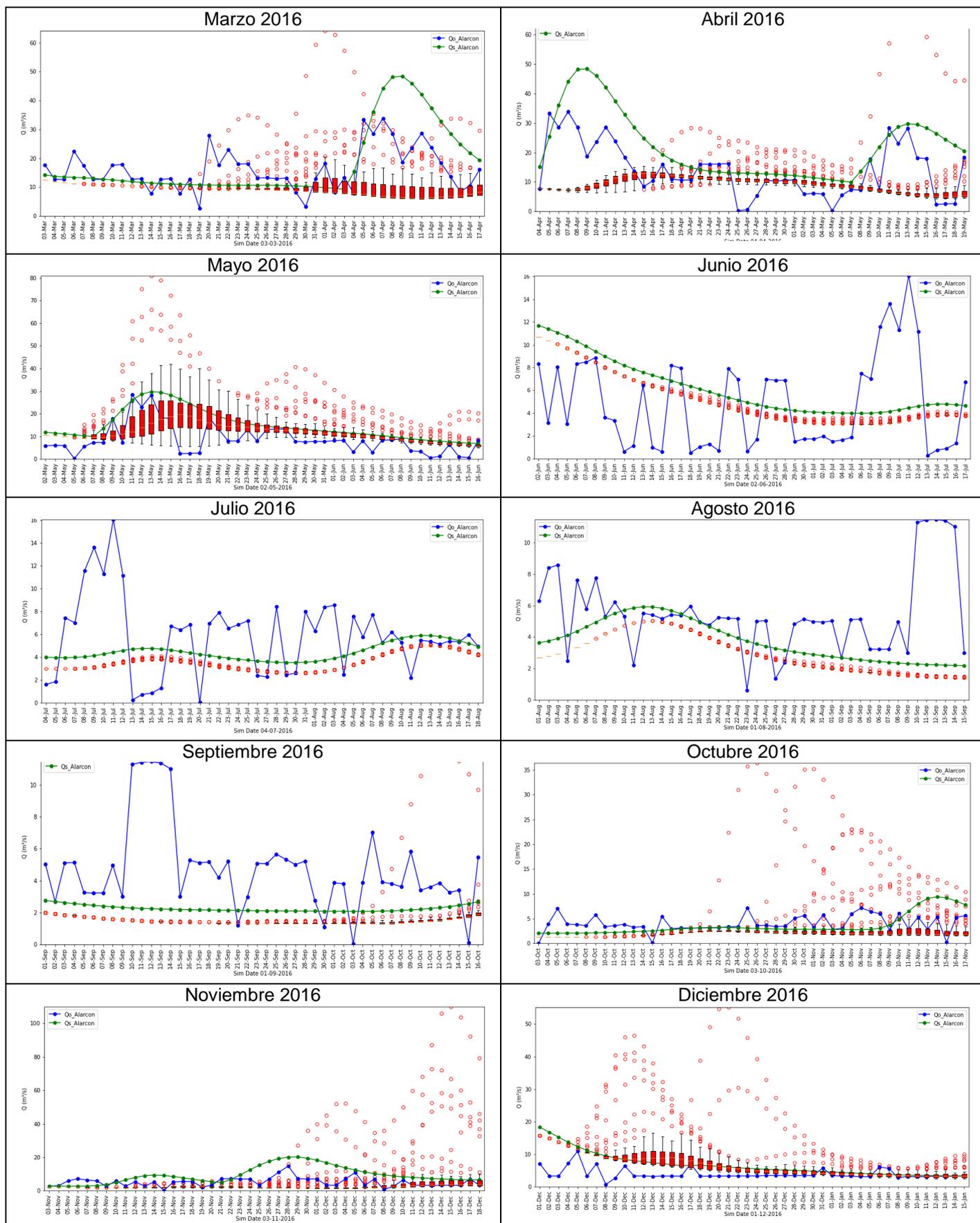
Anexo 2. . Diagramas de caja representativos de los pronósticos de precipitación en la cuenca de Pajaroncillo



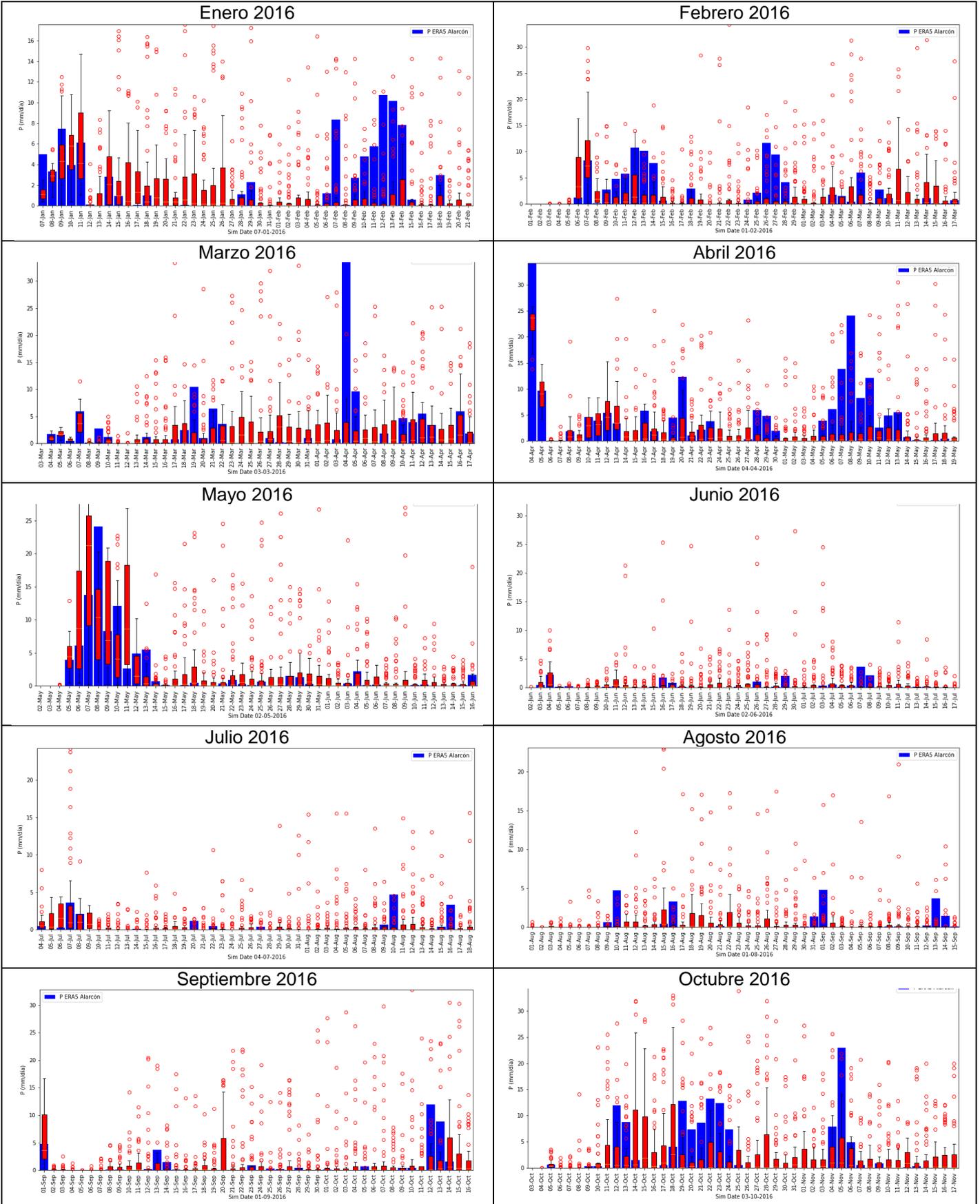


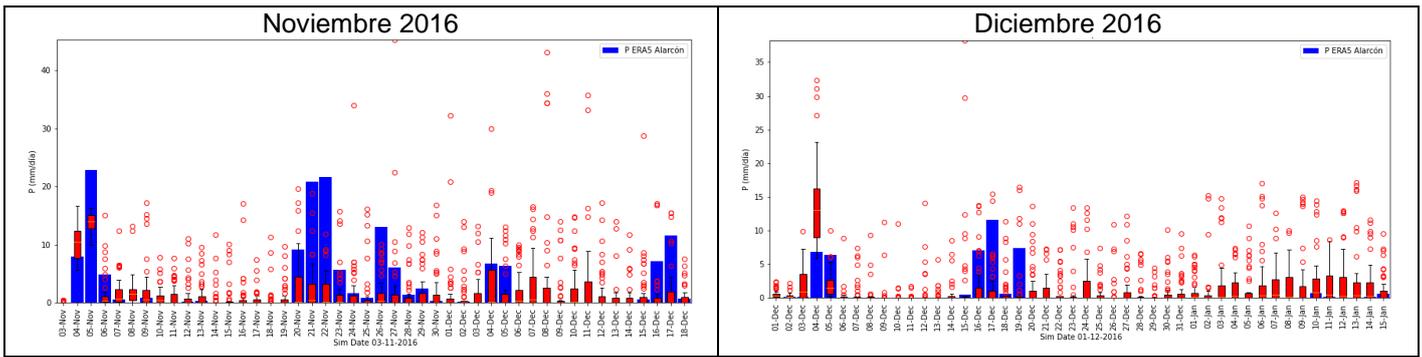
Anexo 3. Diagramas de caja representativos de los pronósticos de caudal en la entrada del embalse Alarcón.



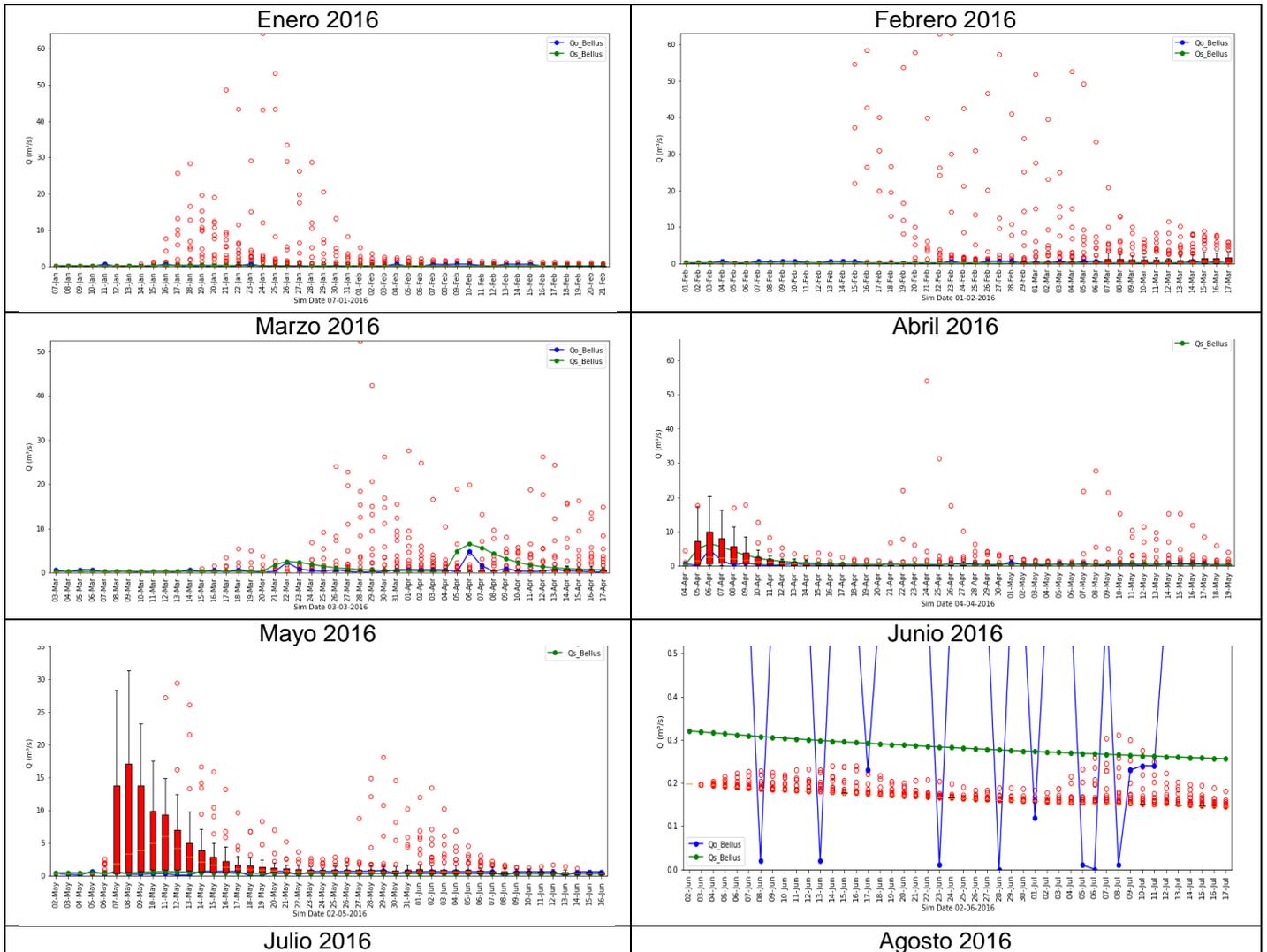


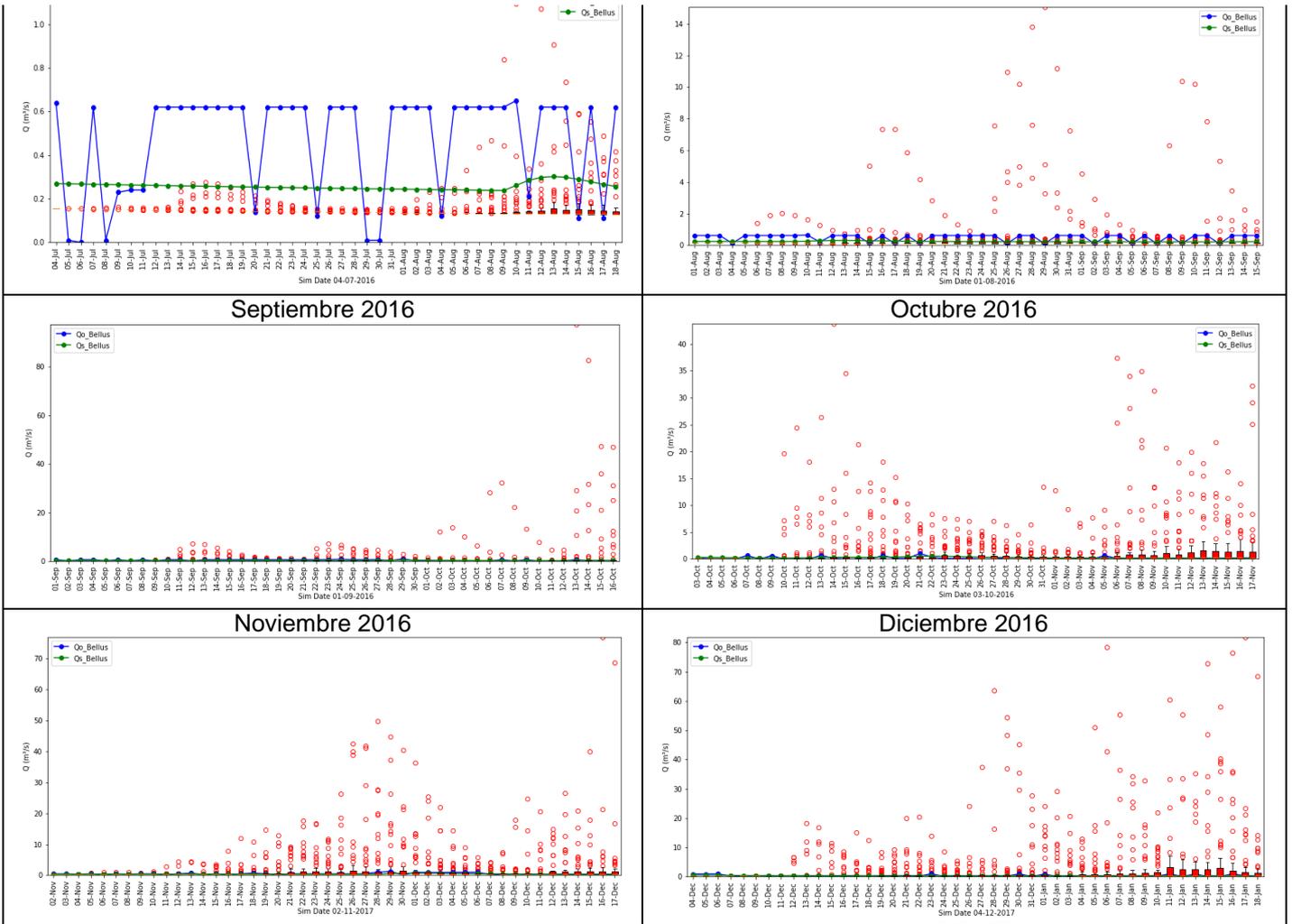
Anexo 4. Diagramas de caja representativos de los pronósticos de precipitación en la cuenca de Alarcón.



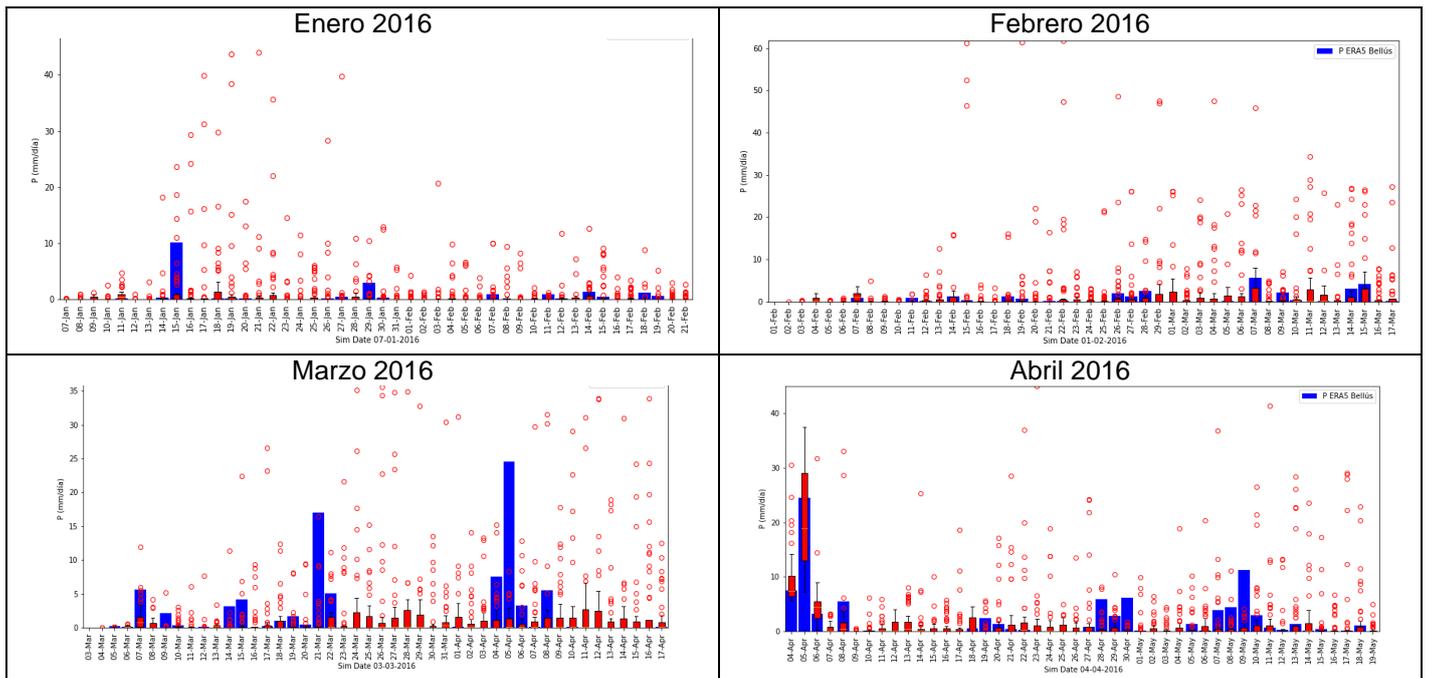


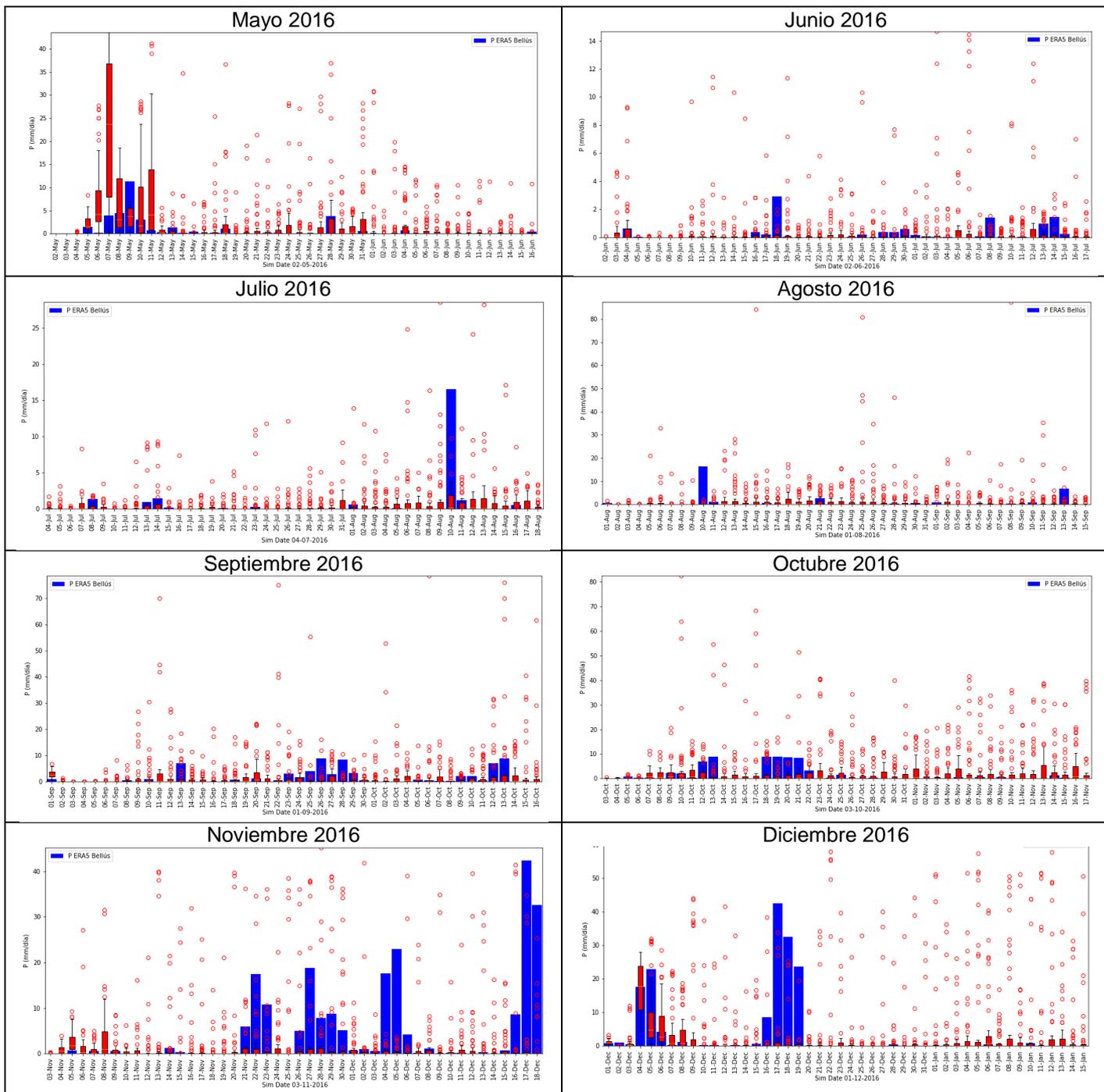
Anexo 5. Diagramas de caja representativos de los pronósticos de caudal en la entrada del embalse Bellús.



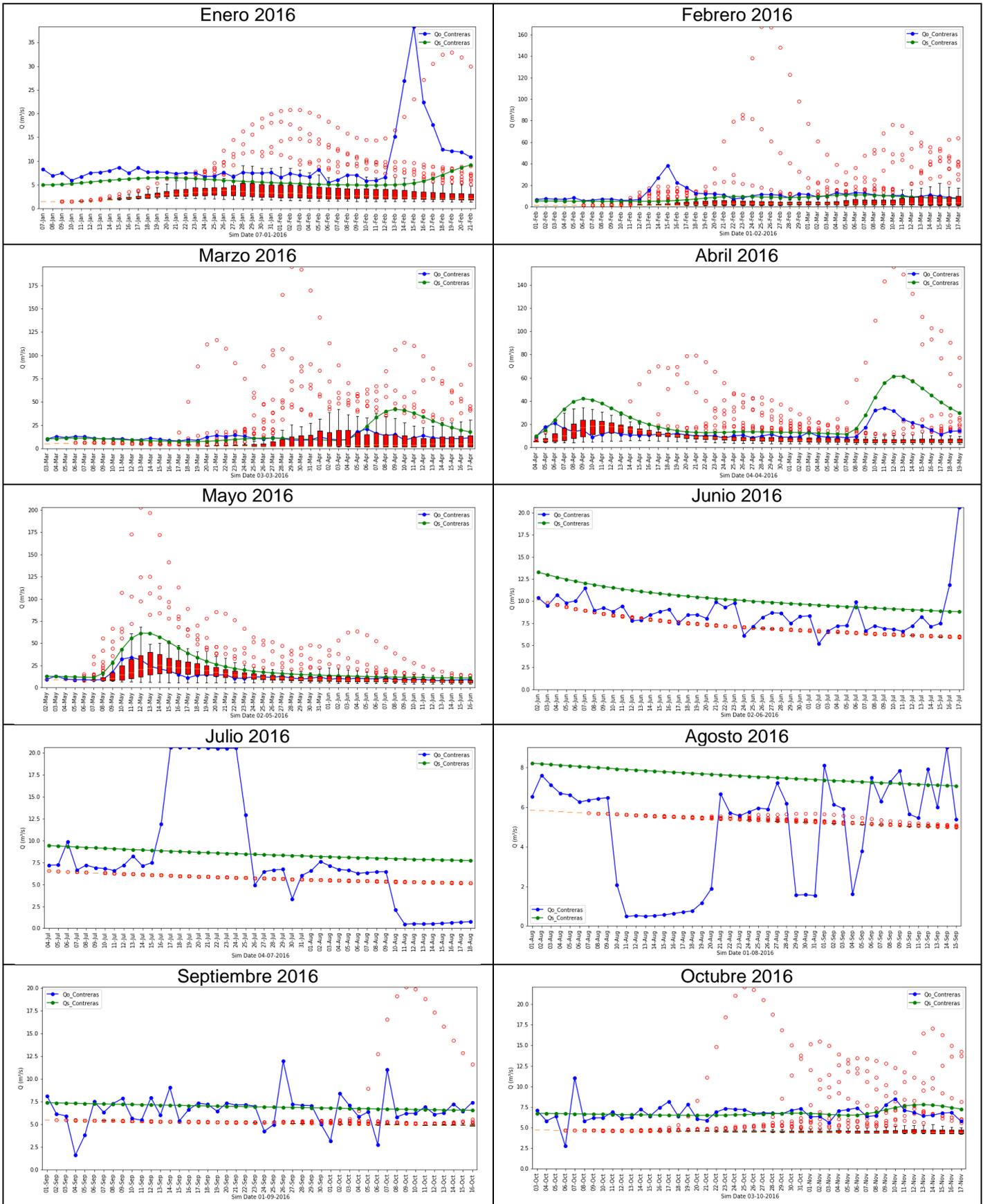


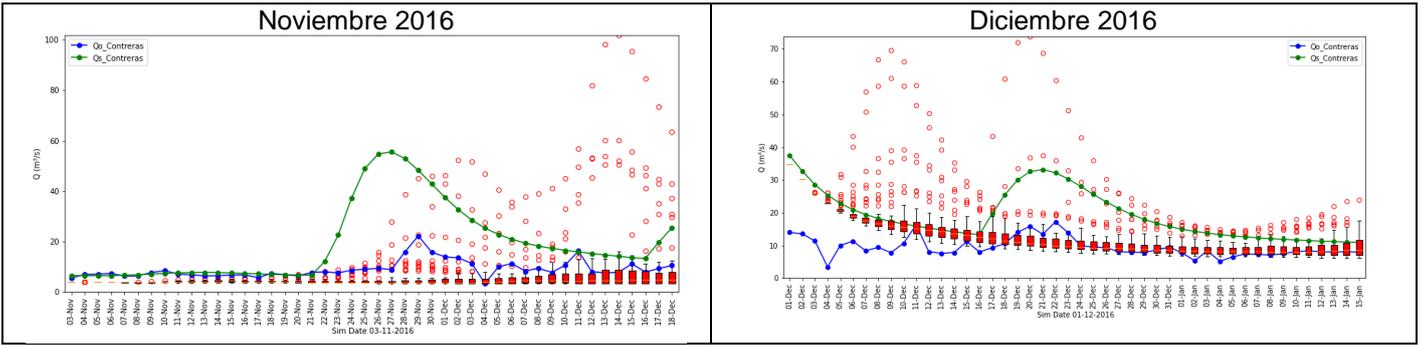
Anexo 6. Diagramas de caja representativos de los pronósticos de precipitación en la cuenca de Bellús.



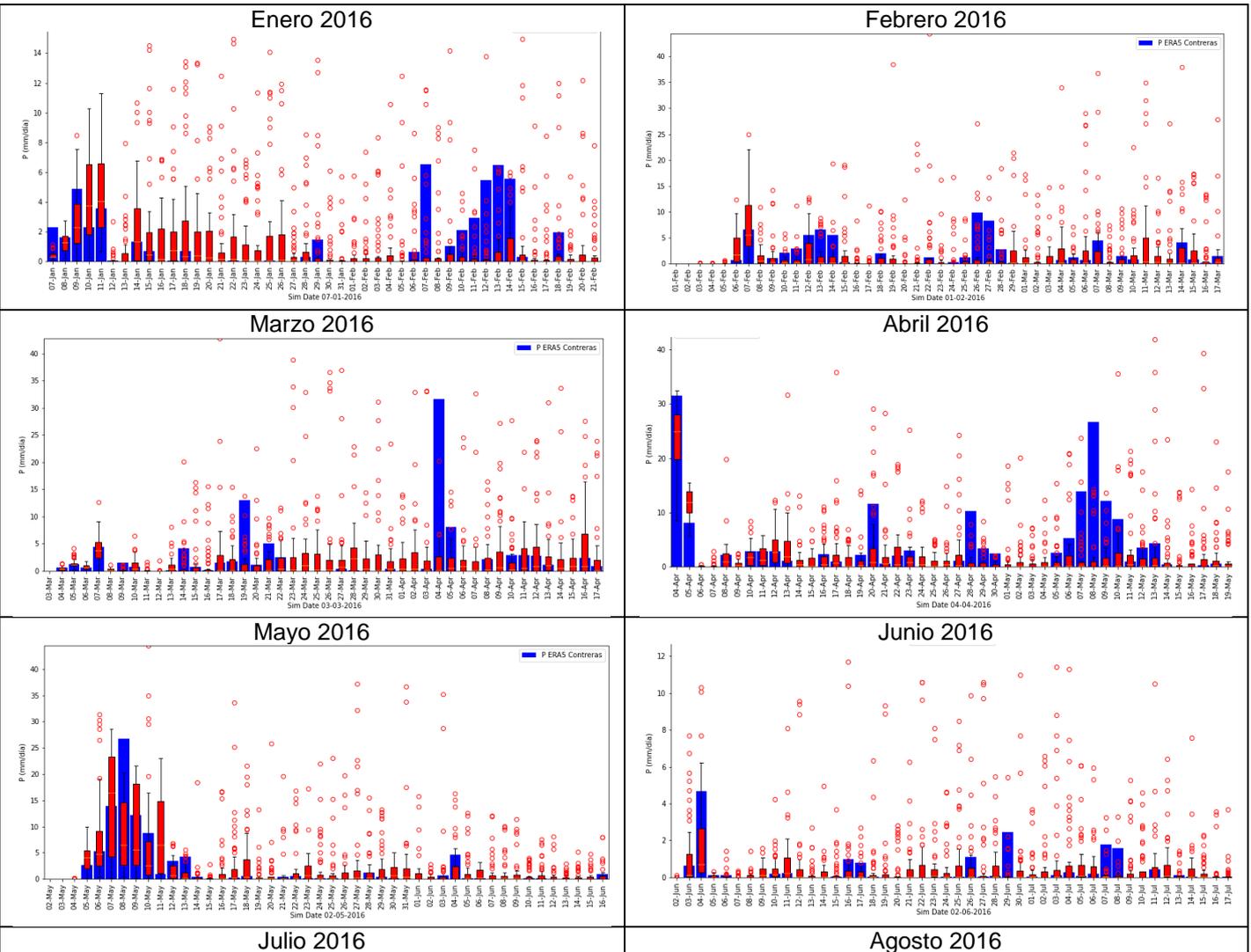


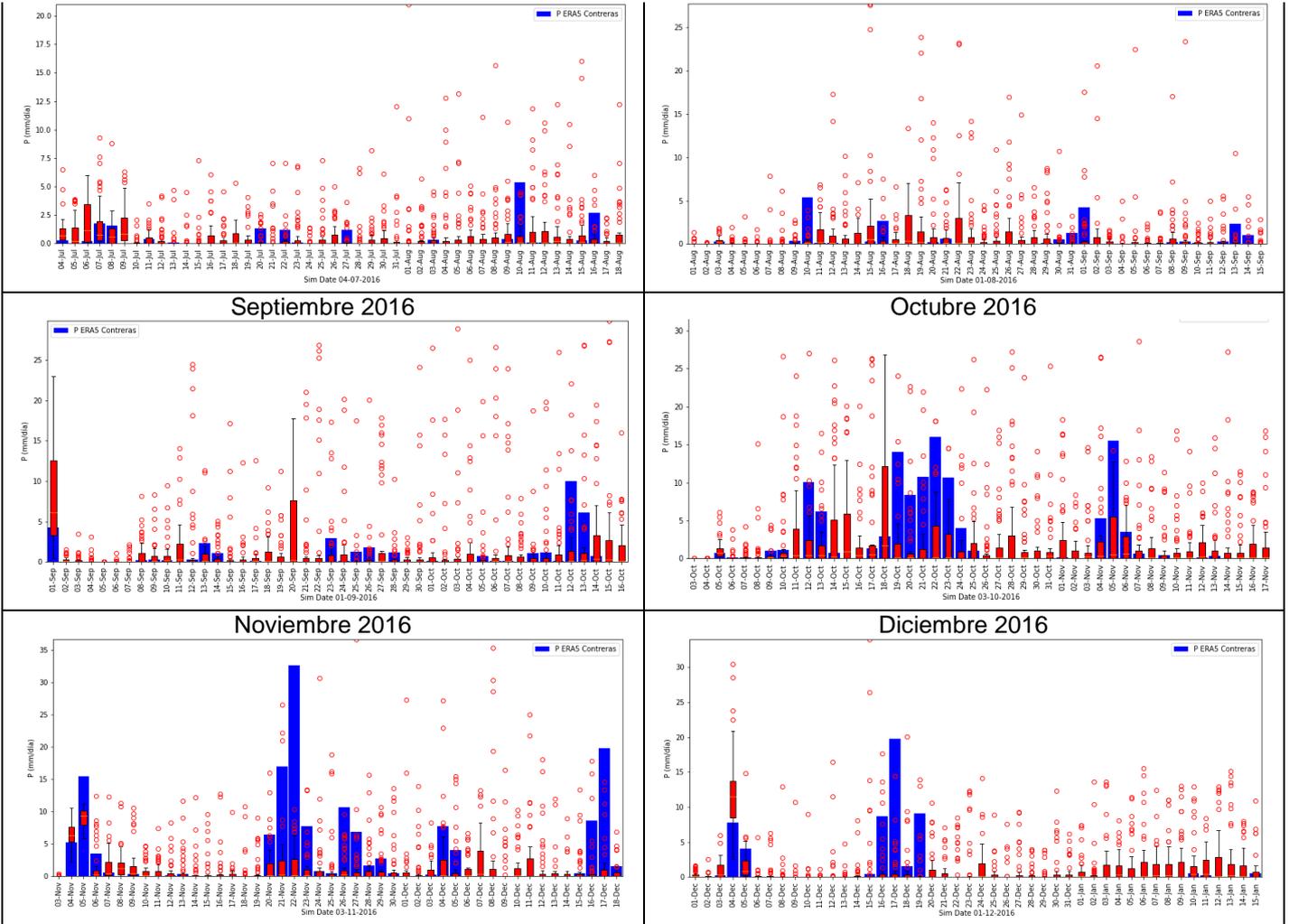
Anexo 7. Diagramas de caja representativos de los pronósticos de caudal en la entrada del embalse Contreras.



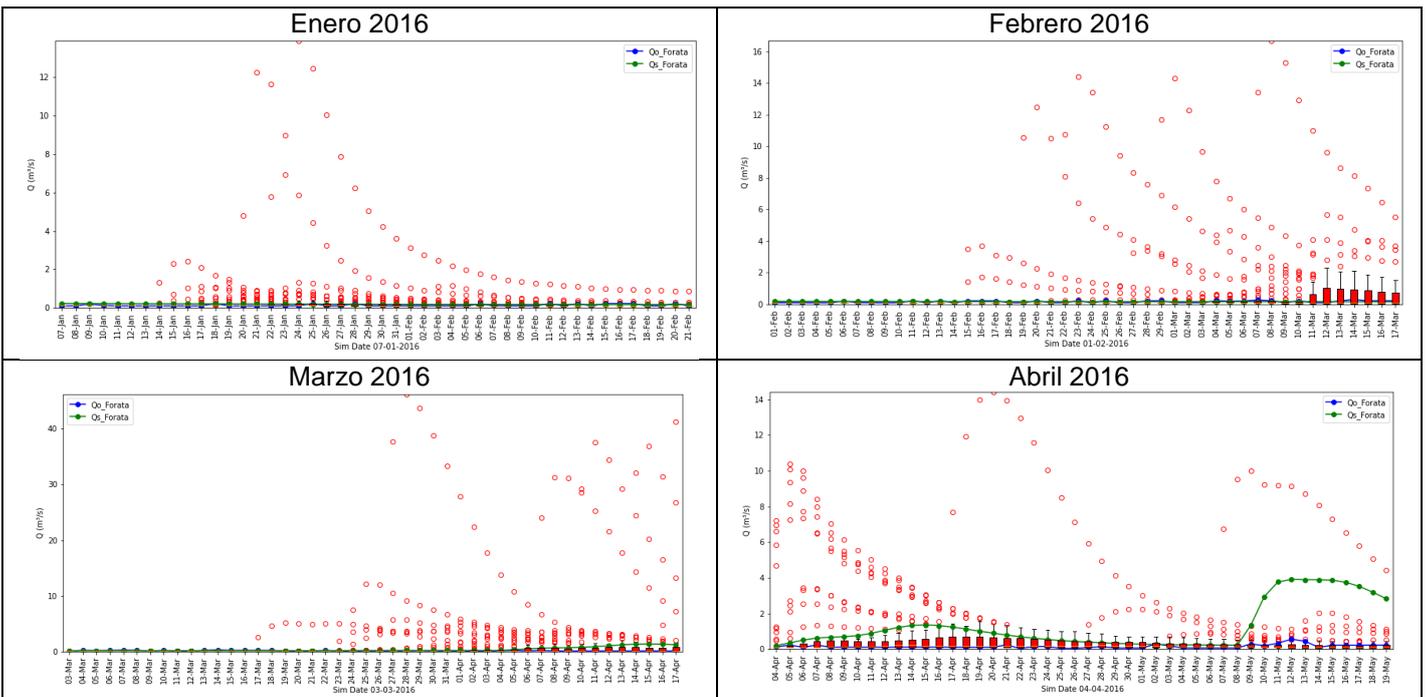


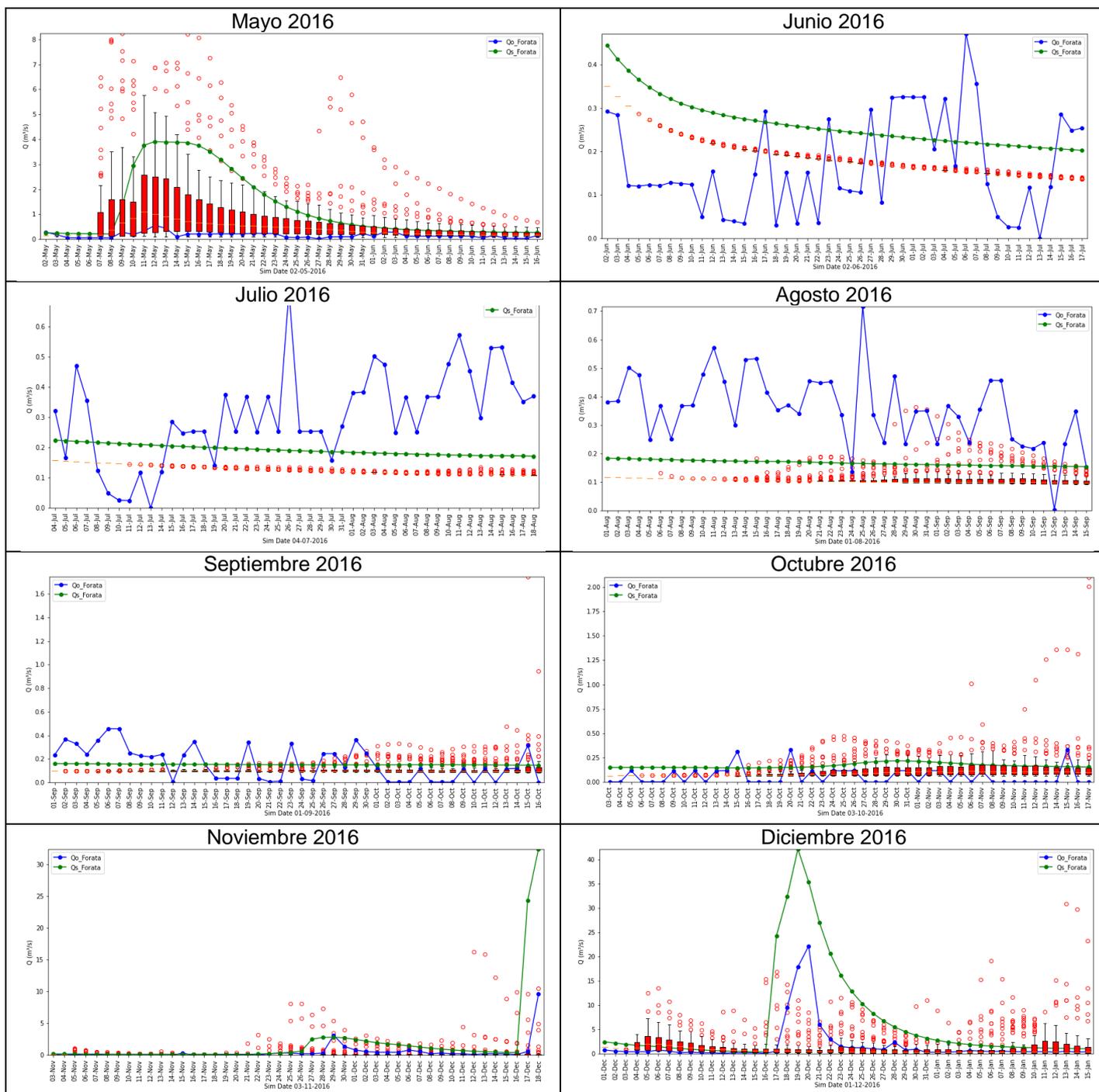
Anexo 8. Diagramas de caja representativos de los pronósticos de precipitación en la cuenca de Contreras.



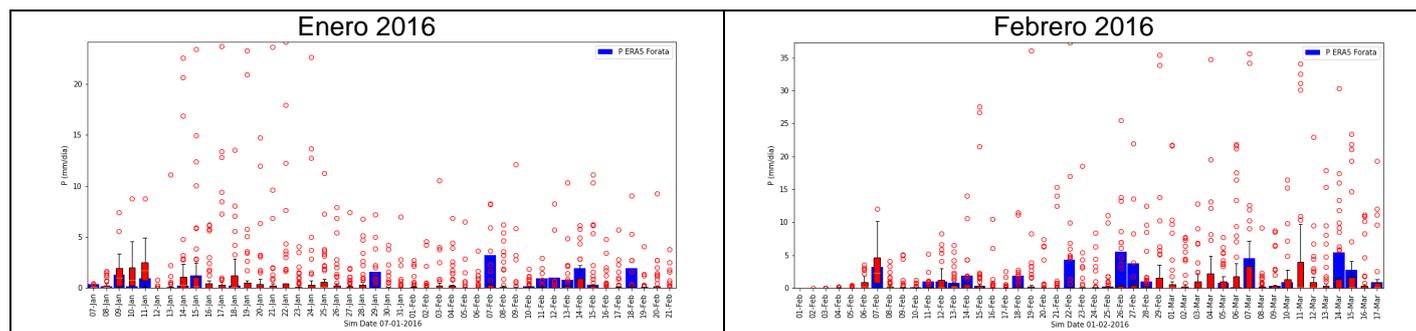


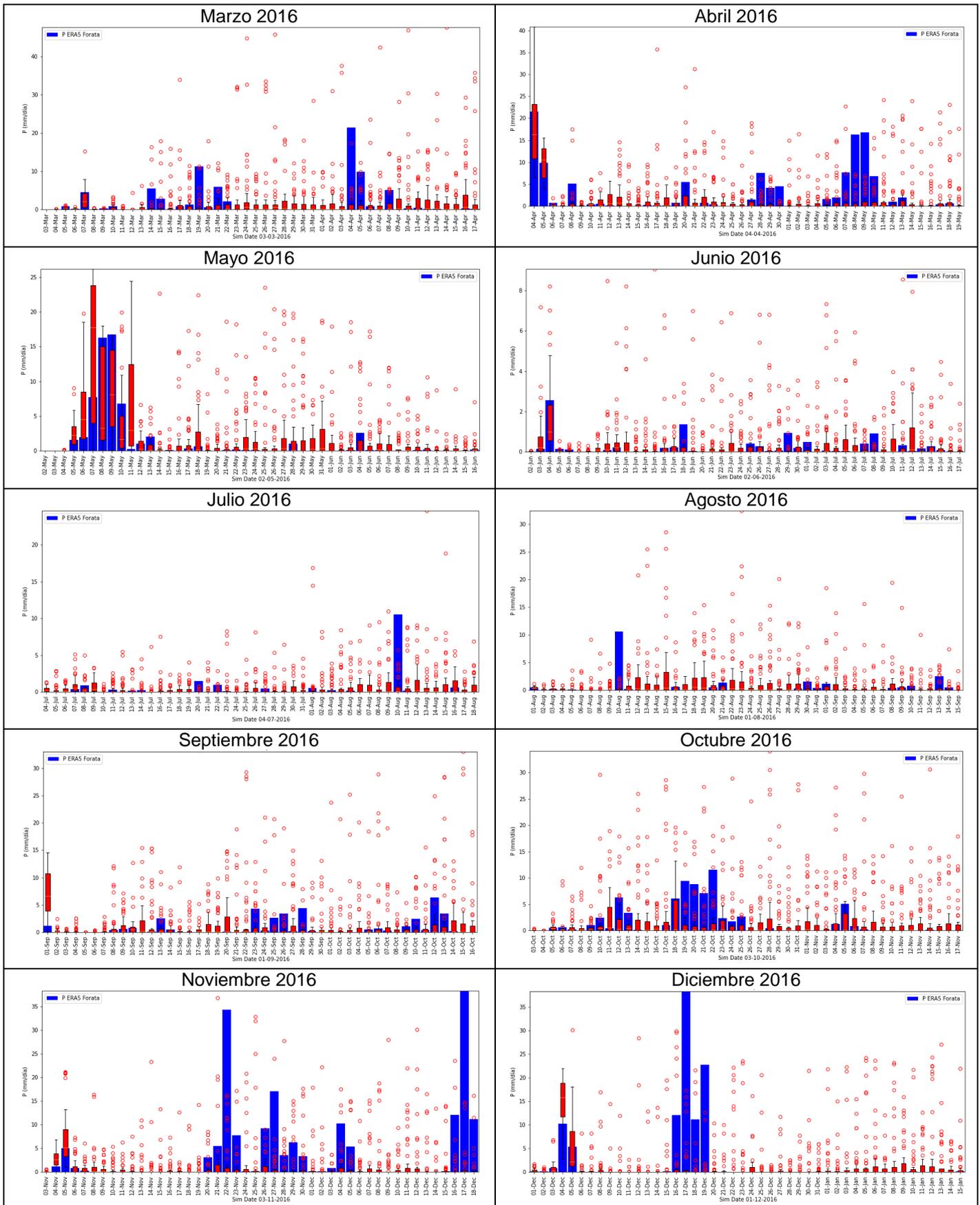
Anexo 9: Diagramas de caja representativos de los pronósticos de caudal en la entrada del embalse Forata.



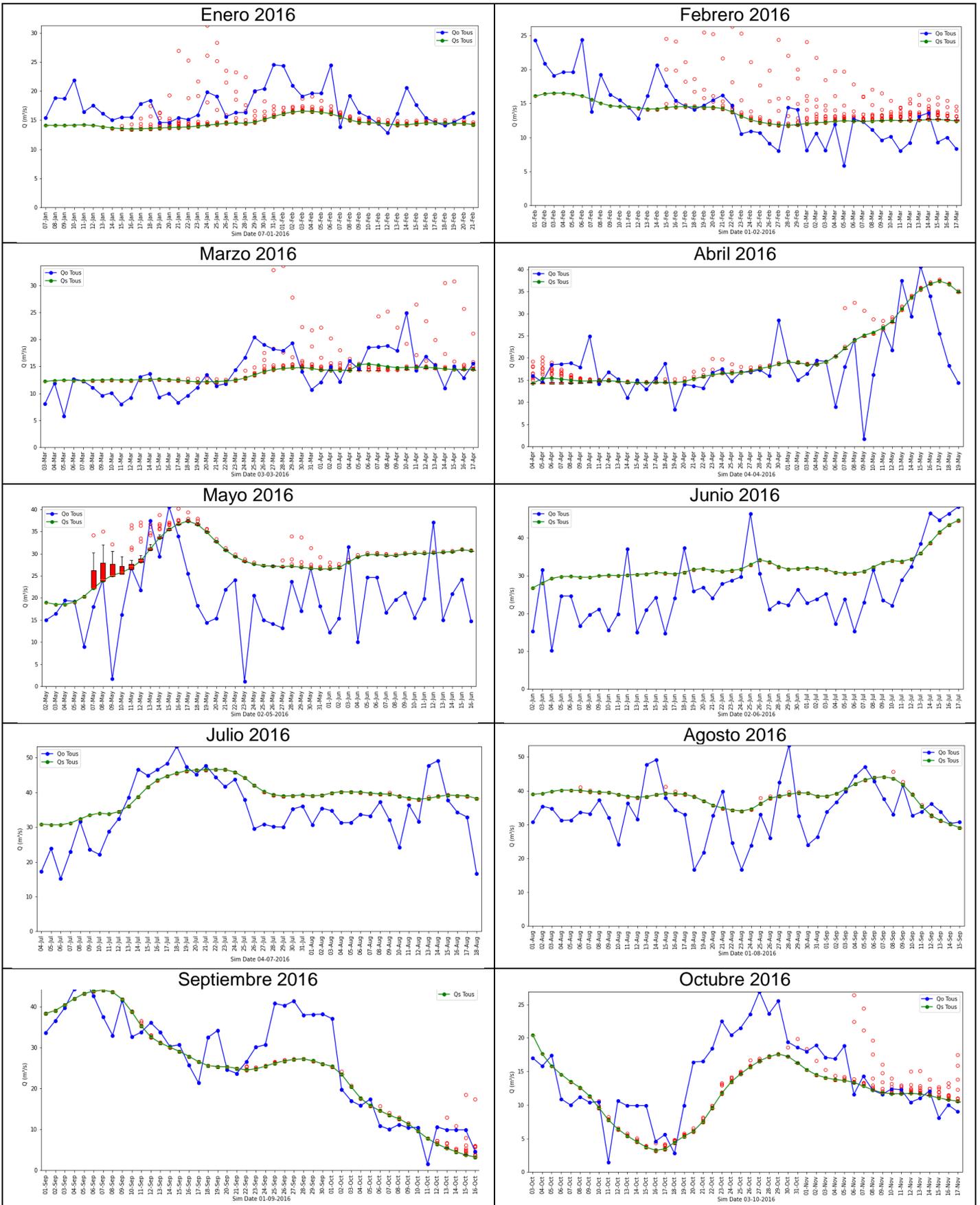


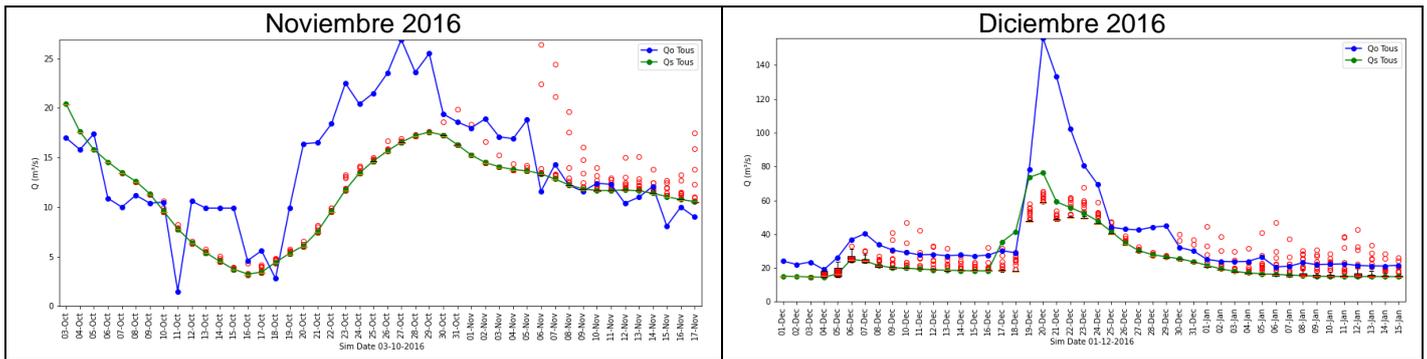
Anexo 10. Diagramas de caja representativos de los pronósticos de precipitación en la cuenca de Forata.



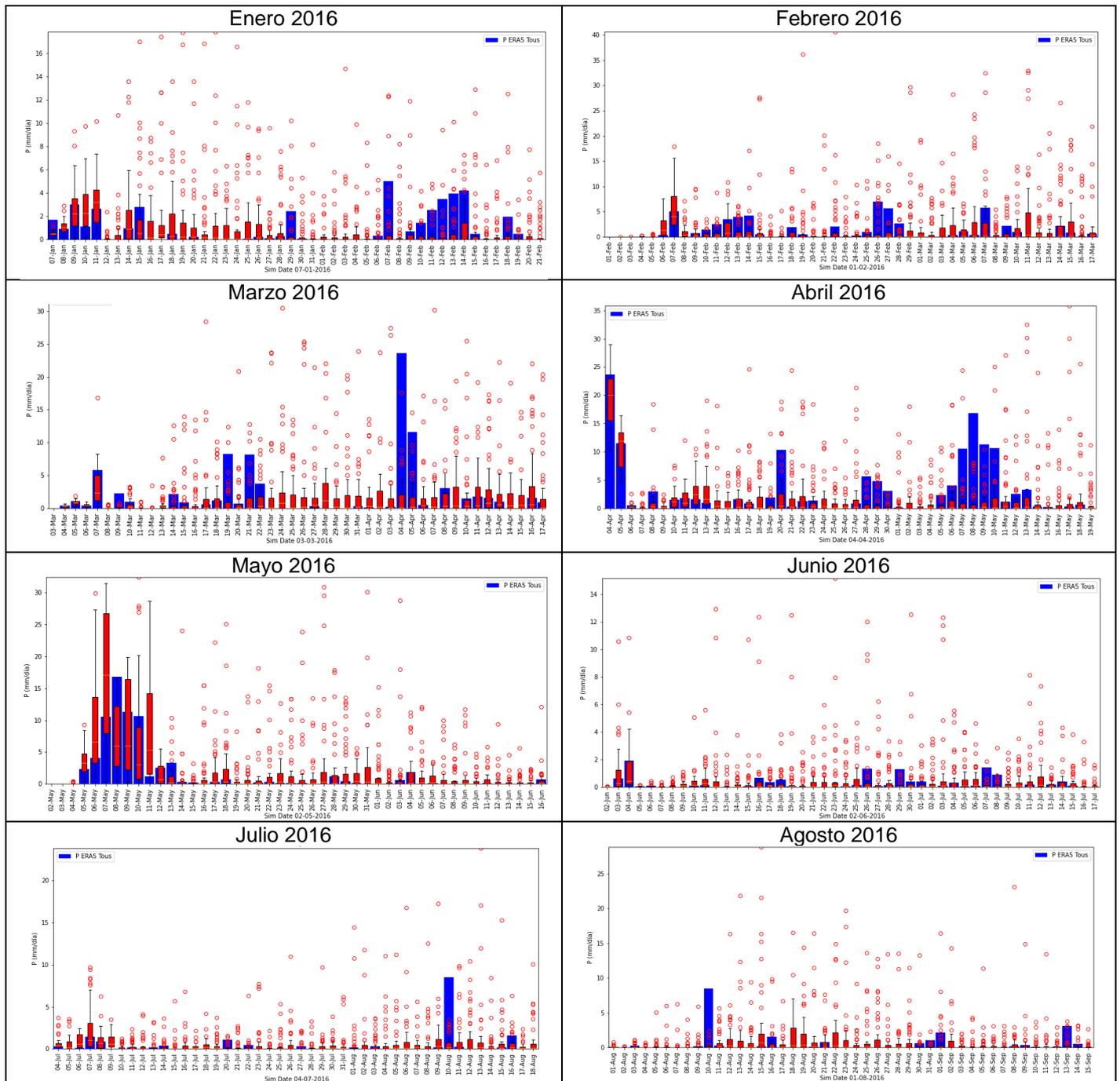


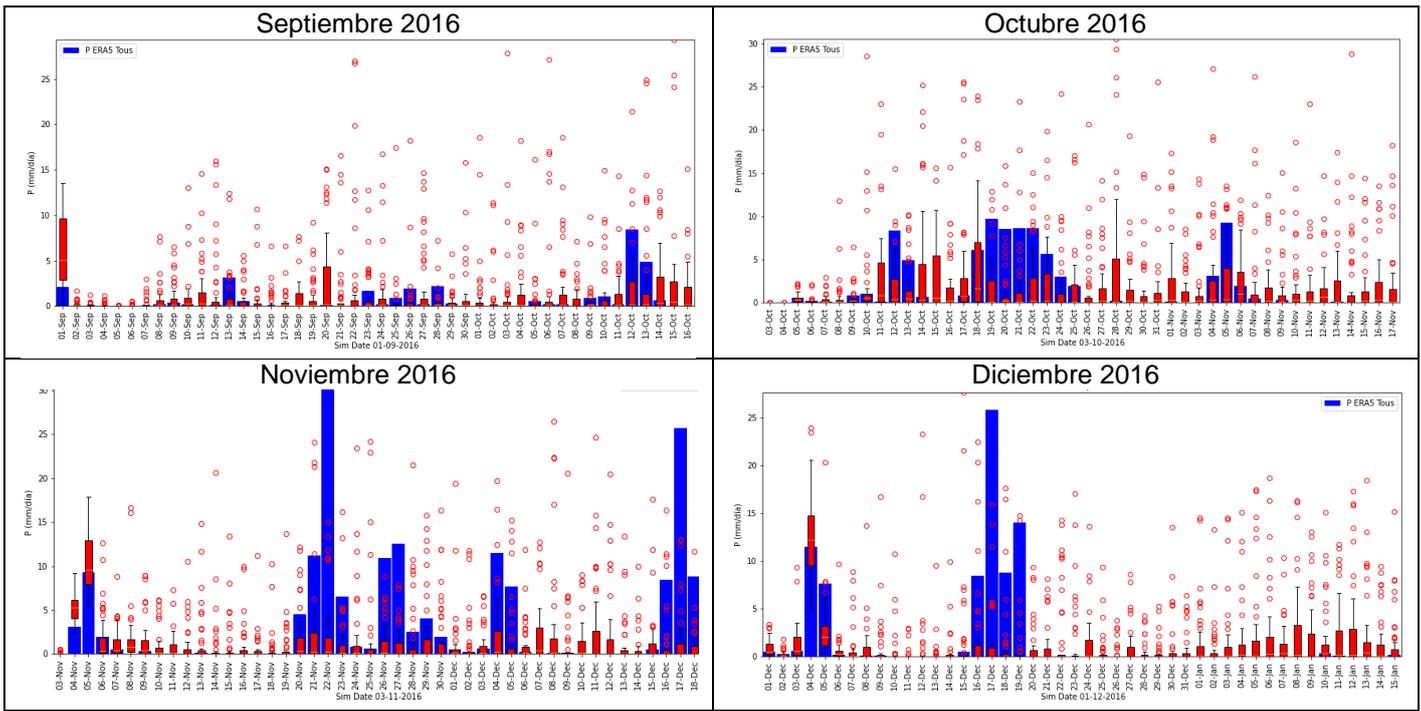
Anexo 11 Diagramas de caja representativos de los pronósticos de caudal en la entrada del embalse Tous.



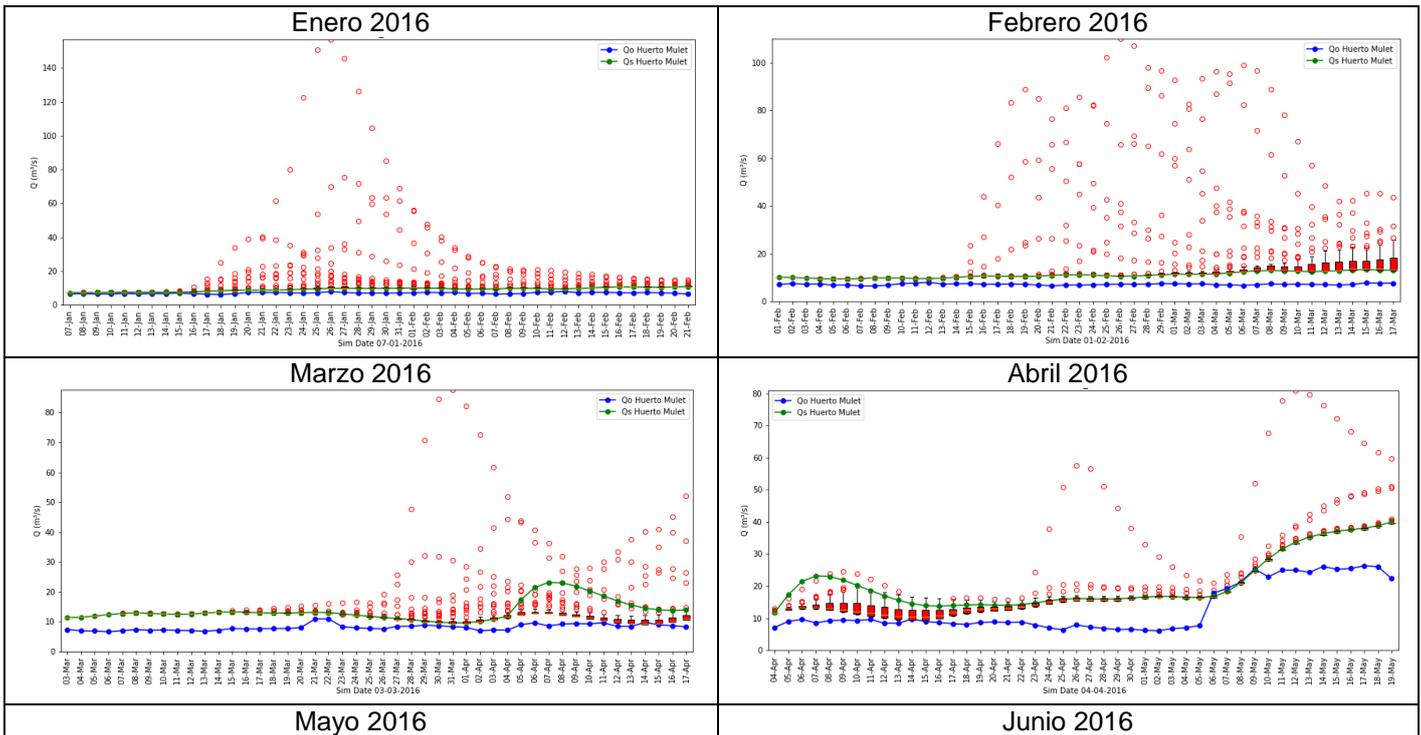


Anexo 12. Diagramas de caja representativos de los pronósticos de precipitación en la cuenca de Tous.

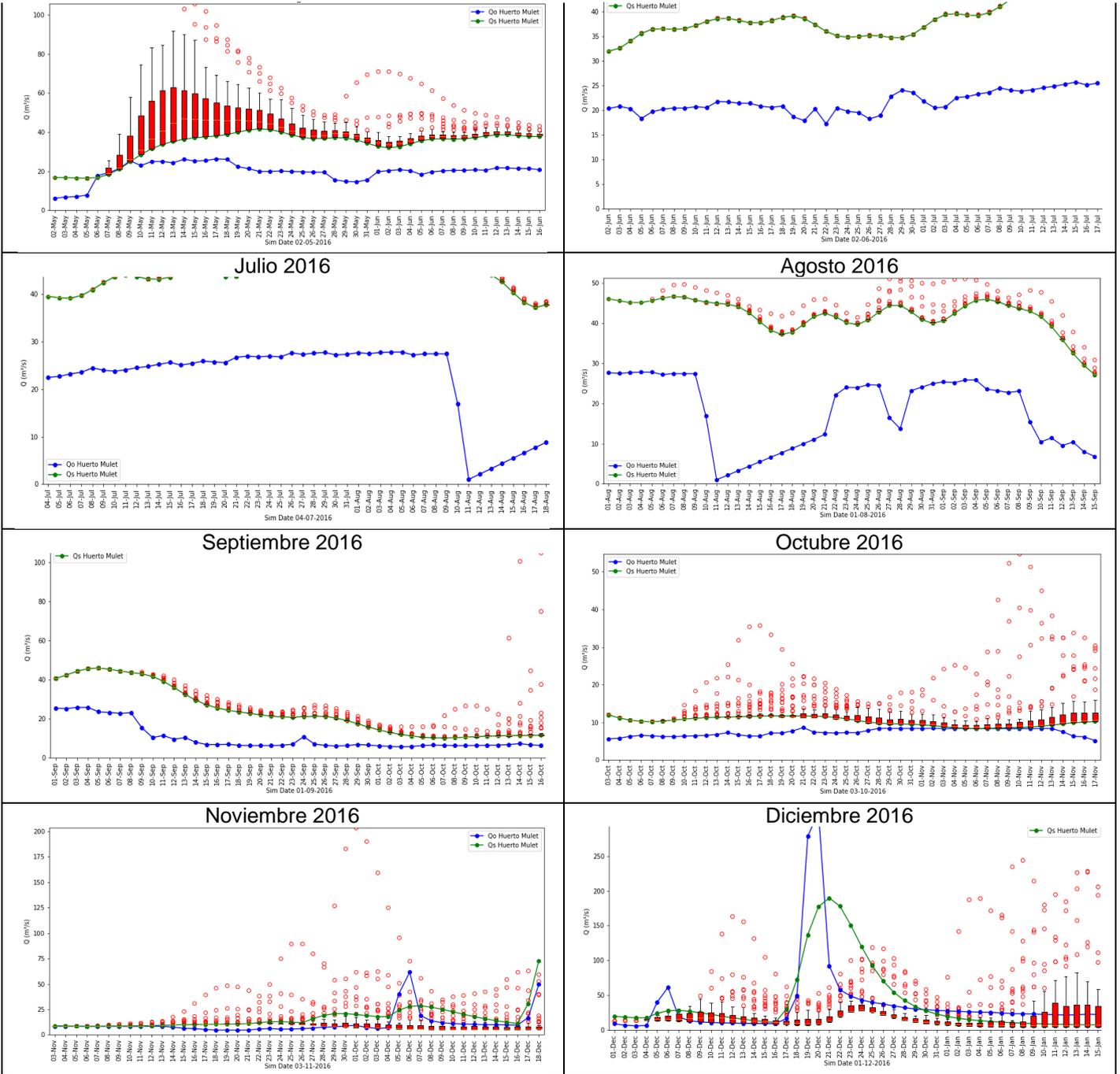




Anexo 13. Diagramas de caja representativos de los pronósticos de caudal en Huerto Mulet (Desembocadura)



Estimación de la incertidumbre hidrológica en modelo hidrológico en la cuenca del Júcar.



Anexo 14. Diagramas de caja representativos de los pronósticos de precipitación en la cuenca de Huerto Mulet (Desembocadura)

