

Trabajo Fin de Máster

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV.

Intensificación: RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

ANDRES FELIPE TELLEZ ROJAS

Director:

DR. JAVIER PAREDES ARQUIOLA

Codirector/es:

DR. JAVIER GARCÍA HERNÁNDEZ

MARZO, 2016



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título: MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV

Alumno: Andres Felipe Tellez Rojas **E-mail:** antelro1@posgrado.upv.es

Director: Dr. Javier Paredes Arquiola

Codirector: Javier García Hernández

Resumen

El presente trabajo de final de máster trata sobre la modelación hidrológica a escala mensual del sistema de explotación Gállego-Cinca con una superficie de 12208 Km² de la confederación hidrográfica del Ebro mediante el modelo de precipitación-escorrentía HBV desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia (SMHI). El modelo computacional utilizado es el RS Minerve desarrollado en conjunto por el Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) y la oficina de ingeniería HydroCosmos SA junto con la colaboración de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL), es un programa para la simulación de la formación y propagación de la escorrentía superficial, capaz de modelar redes hidráulicas e hidrológicas complejas de acuerdo a un esquema semidistribuido conceptual.

Primero se realiza la modelación de 2 subsistemas (Gállego 4008 Km² y Cinca 8080 Km²), mediante la subdivisión de cada una de ellas en diferentes subcuencas más pequeñas para realizar la modelación hidrológica de cada una de éstas teniendo en cuenta los datos meteorológicos históricos, además se utilizaron las estaciones de aforo pertenecientes a la Red Oficial de Estaciones de Aforo (R.O.E.A) presentes en la zona de estudio y los valores de demandas de agua registradas en un modelo de gestión del software Aquatool previamente desarrollado por la confederación hidrográfica del Ebro, con lo cual se iba realizando un contraste de la simulación que entrega el software RS Minerve y los datos observados a través de los años por dichas estaciones de aforo, permitiendo realizar las calibraciones de los parámetros



del modelo HBV de cada subcuenca con el fin de obtener simulaciones acordes a la realidad con la ayuda de varios índices de eficiencia y una función objetivo estipulada. Al tener ya la subcuenca calibrada se procedía a hacer la validación en otro período diferente a dicha calibración obtenida, con lo cual finalmente se lograba la caracterización de las subcuencas, cuencas y en sí de todo el sistema de explotación, logrando con esto estudiar y evaluar el comportamiento de los recursos hídricos, flujos superficiales, subsuperficiales, subterráneos e influencia de los embalses presentes en la zona de estudio, obteniendo por lo tanto un modelo parametrizado capaz de reproducir cualquier tipo de evento en el sistema de explotación con otros datos de entrada diferentes a los utilizados para su calibración.

Se logró una correcta calibración y parametrización general del modelo hidrológico obteniendo buenos resultados y a su vez se encontró una clara afección y alteración del régimen natural de caudales en el sistema de explotación, primero debido a la gran cantidad de zonas agrarias en donde la mayoría se ubican en el subsistema del río Cinca y segundo a la cantidad de embalses existentes situados casi en su totalidad en el subsistema del río Gállego produciendo regulaciones de caudales bien considerables.

Finalmente se realizaron distintas comparaciones entre las aportaciones en régimen natural del modelo SIMPA registradas en el modelo de gestión de Aquatool y las obtenidas del modelo HBV calibrado. Para determinar la bondad del primero debido a que es un modelo más general y el realizado en este trabajo tiene un nivel de detalle superior. Evidenciándose que las del modelo SIMPA suelen ser mayores a las de HBV, y también respecto a un año típico medio se ha comprobado que se están sobreestimando las aportaciones generadas naturalmente de octubre a junio y subestimando las de julio a septiembre al utilizar el modelo de SIMPA.



Resum

El present treball de fi de màster tracta sobre la modelació hidrològica a escala mensual del sistema d'explotació Gállego-Cinca de la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre, amb una superfície de 12208 km², mitjançant el model de precipitació-escorrentia HBV, desenvolupat per l'Institut Meteorològic i Hidrològic de Suècia (SMHI). El model computacional utilitzat és el RS Minerve desenvolupat conjuntament pel Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) i l'oficina d'enginyeria HydroCosmos SA, amb la col·laboració de la Universitat Politècnica de València (UPV) i l'Escola Politècnica Federal de Lausanne (EPFL), és un programa per a la simulació de la formació i propagació del vessament superficial, capaç de modelar xarxes hidràuliques i hidrològiques complexes d'acord a un esquema semidistribuit conceptual.

Primer, es realitza la modelació de 2 subsistemes (Gállego 4008 Km² i Cinca 8080 Km²), mitjançant la subdivisió de cadascuna d'elles en diferents subconques més menudes per realitzar la modelació hidrològica de cadascuna d'aquestes, tenint en compte les dades meteorològiques històriques. A més, es van utilitzar les estacions d'aforament pertanyents a la Xarxa Oficial d'estacions d'aforament (ROEA) presents a la zona d'estudi i els valors de demandes d'aigua registrades en un model de gestió del programa Aquatool, prèviament desenvolupat per la confederació hidrogràfica de l'Ebre, amb la qual cosa s'anava realitzant un contrast de la simulació que lliura el programa RS Minerve i les dades observades a través dels anys per aquestes estacions d'aforament, permetent realitzar la calibració dels paràmetres del model HBV de cada subconca, per tal d'obtenir simulacions acords a la realitat amb l'ajuda de diversos índexs d'eficiència i una funció objectiu estipulada. En tenir ja la subconca calibrada, es procedia a fer la validació en un altre període diferent a aquesta calibració obtinguda, amb la qual cosa finalment s'aconseguia la caracterització de les subconques, conques i en si de tot el sistema d'explotació, aconseguint amb això, estudiar i avaluar el comportament dels recursos hídrics, fluxos superficials, subsuperficials, subterranis i influència dels embassaments presents a la zona d'estudi, obtenint per tant un model parametrizat capaç de reproduir qualsevol tipus d'esdeveniment en el sistema d'explotació amb altres dades d'entrada diferents als utilitzats per a la seua calibració.



Es va aconseguir una correcta calibració i parametrització general del model hidrològic obtenint bons resultats i també es va trobar una clara afecció i alteració del règim natural de cabals en el sistema d'explotació, primer, a causa de la gran quantitat de zones agràries, on la majoria se situen en el subsistema del riu Cinca i segon, a la quantitat d'embassaments existents situats gairebé íntegrament en el subsistema del riu Gállego produint regulacions de cabals ben considerables.

Finalment, es van realitzar diferents comparacions entre les aportacions en règim natural del model SIMPA registrades en el model de gestió de Aquatool i les obtingudes del model HBV calibrat., per determinar la bondat del primer, a causa de que és un model més general i el realitzat en aquest treball té un nivell de detall superior. Evidenciant que les del model SIMPA solen ser majors a les de HBV, i també respecte a un any mig típic, s'ha comprovat que s'estan sobreestimant les aportacions generades naturalment d'octubre a juny i subestimant les de juliol a setembre a l'utilitzar el model de SIMPA.



Summary

This final work of master is about the hydrological modelling at a monthly scale of the Gallego-Cinca water resources system with an area of 12208 Km² of the Ebro river basin agency using the HBV rainfall-runoff model developed by the Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI).

The software used is the RS-Minerve developed by the Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) and the engineering office HydroCosmos SA with the collaboration of the Polytechnic University of Valencia (UPV) and the Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL), is a program for the simulation and propagation of the surface runoff, capable of model complex hydraulic and hydrological networks according to a semi-distributed conceptual scheme.

First the modelling of 2 subsystems (Gallego 4008 Km² and Cinca 8080 Km²) is performed, by the subdivision of each one in different smaller subbasins to make the hydrological modelling of each one of these taking into account the historical meteorological data, besides gauging stations belonging to the official network of gauging stations (R.O.E.A) present in the study area and the values of the water demand registered in a management model of the Aquatool software previously developed by the Ebro river basin agency were used, with which making a contrast of the simulation that provides the RS-Minerve software and the observed data through the years by those gauging stations, allowing to make the calibrations of the HBV model parameters of each subbasin in order to obtain simulations according to the reality with the help of some efficiency criteria and an objective function stipulated. Having calibrated the subbasin the next step was make the validation in other different period of the obtained calibration, thus finally the characterization of the subbasins, basins and the water resources system itself was achieved, achieving with this study and evaluate the behavior of the water resources, surface, subsurface and groundwater flows and influence of reservoirs present in the study area, obtaining then a parameterized model capable of reproducing any type of event in the water resources system with other input data different to those used in the calibration process.

A correct calibration and a general parameterization of the hydrological model was achieved, getting good results and at the same time was found a clear alteration of



the natural flow regime in the water resources system, first of all because of the large number of agricultural areas where the most of them are located in the subsystem of the Cinca river and second to the amount of existing reservoirs located almost entirely in the subsystem of the Gallego river producing considerable flow regulations.

Finally different comparisons were realized between the contributions in natural regime of the SIMPA model registered in the management model of Aquatool and the obtained from the calibrated HBV model, to determine the goodness of the first one because is a more general model and the used in this work has a higher detail level. Evidencing that the ones from the SIMPA model are usually higher than those of HBV, and also respect to a typical year the naturally generated contributions are being overestimated from October to June and underestimated from July to September when the SIMPA model is used.

Palabras clave: *Modelación hidrológica, HBV, calibración, sistema Gállego-Cinca.*

Paraules Claus: *Modelació hidrològica, HBV, calibració, sistema Gállego-Cinca*

Key words: *Hydrological modelling, HBV, calibration, Gallego-Cinca system.*



AGRADECIMIENTOS

Ante todo deseo agradecerle enormemente a mi papá, mamá y hermana por apoyarme en todo momento de mi vida, más aún en este proceso desde antes de venir a España cuando tomé la decisión de estudiar en otro país así como lo que ha sido toda mi estancia fuera, son una parte fundamental en mi existencia, siempre lo serán, los aprecio y quiero demasiado.

Quisiera mencionar a mi gran amigo Sebastián Bonilla que lastimosamente no pudo viajar conmigo para estudiar el máster, hiciste bastante falta, pero como la vida nos enseña, todo sucede por algo y siempre para mejor.

A mi director Javier Paredes por su ayuda, recomendación y colaboración durante el transcurso del desarrollo de este trabajo ya que sin éstos no hubiera sido posible su finalización.

Finalmente le agradezco a la vida por haberme dado la oportunidad de dar un gran paso hacia mi futuro al cursar este máster y poder culminarlo con éxito, con cuyo título y conocimientos podré hacer grandes cosas y a partir de aquí con mucho esfuerzo forjar un mejor mañana.



Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivo	2
1.2	Estructura del documento.....	4
2	ESTADO DEL ARTE DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA	6
2.1	Generalidades	6
2.2	Clasificación	8
2.2.1	Naturaleza de los algoritmos empleados	8
2.2.2	Técnicas involucradas en el proceso de modelamiento.....	9
2.2.3	Representación espacial.....	9
2.2.4	Escala temporal	11
2.3	Calentamiento, calibración y validación.....	12
2.3.1	Calentamiento.....	12
2.3.2	Calibración	12
2.3.3	Validación	12
3	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA.....	14
3.1	Subsistema del río Gállego	17
3.2	Subsistema del río Cinca.....	20
4	METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS.....	26
4.1	Software RS-Minerve	28
4.2	Modelo HBV	30
4.3	Algoritmo de calibración SCE-UA.....	37
5	APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO	44
5.1	Particularización de la metodología al caso de estudio	44
5.1.1	Función objetivo e índices de eficiencia.....	44
5.1.2	Resumen de las calibraciones llevadas a cabo	47
5.2	Estaciones de aforo y datos meteorológicos	48



5.2.1	Estaciones de aforo	49
5.2.2	Precipitación y temperatura	52
5.2.3	Evapotranspiración	53
5.3	Calibración y validación del sistema de explotación.....	58
5.3.1	Subsistema del río Gállego.....	58
5.3.2	Subsistema del río Cinca	83
5.4	Comparación de aportaciones en régimen natural entre SIMPA y HBV....	144
5.4.1	Subsistema del río Gállego.....	146
5.4.2	Subsistema del río Cinca	147
5.5	Valoración de resultados	156
5.5.1	Calibración y validación del sistema de explotación	156
5.5.2	Comparación de aportaciones en régimen natural entre SIMPA y HBV 161	
6	CONCLUSIONES	165
7	REFERENCIAS	171
8	ANEJOS.....	177
8.1	Estaciones de aforo.....	177
8.1.1	Subsistema del río Gállego.....	177
8.1.2	Subsistema del río Cinca	185



Índice de Figuras

Figura 1. Modelos hidrológicos según su distribución espacial.	11
Figura 2. Ubicación confederación hidrográfica del Ebro en España	14
Figura 3. Ubicación del sistema Gállego-Cinca en la confederación hidrográfica del Ebro	15
Figura 4. Red hidrográfica del sistema Gállego-Cinca.	15
Figura 5. Topografía del sistema Gállego-Cinca.	16
Figura 6. Embalses del sistema Gállego-Cinca.	16
Figura 7. Cuenca del subsistema del río Gállego.	17
Figura 8. Precipitación, temperatura y evapotranspiración del subsistema del río Gállego.	19
Figura 9. Cuencas del subsistema del río Cinca.	21
Figura 10. Precipitación, temperatura y evapotranspiración del subsistema del río Cinca.	23
Figura 11. Esquema de ejemplo Aquatool.....	28
Figura 12. Interfaz RS-Minerve y esquema a utilizar.....	30
Figura 13. Modelo HBV.	31
Figura 14. Descripción del método SCE-UA.....	40
Figura 15. Ejemplo gráfico método SCE-UA.	41
Figura 16. Ejemplo gráfico de evolución para un grupo. Algoritmo CCE.....	42
Figura 17. Subcuencas del sistema Gállego-Cinca.	50
Figura 18. Estaciones de aforo sistema Gállego-Cinca.....	51
Figura 19. Usos de suelo sistema Gállego-Cinca.....	57
Figura 20. Unidades de la cuenca del río Gállego.....	59
Figura 21. Unidad 0504.	59
Figura 22. Calibración unidad 0504.....	61
Figura 23. Validación unidad 0504.	61
Figura 24. Unidad 0505.	62
Figura 25. Calibración unidad 0505.....	63
Figura 26. Validación unidad 0505.	64
Figura 27. Unidad 0508_1.	64
Figura 28. Calibración unidad 0508_1.....	66
Figura 29. Validación unidad 0508_1.	66



Figura 30. Unidad 0509_1.	67
Figura 31. Calibraci3n unidad 0509_1.	69
Figura 32. Validaci3n unidad 0509_1.	69
Figura 33. Unidad 0511.	70
Figura 34. Calibraci3n unidad 0511.	71
Figura 35. Validaci3n unidad 0511.	71
Figura 36. Unidad 0512.	72
Figura 37. Calibraci3n unidad 0512.	73
Figura 38. Validaci3n unidad 0512.	74
Figura 39. Unidad 0516.	74
Figura 40. Calibraci3n unidad 0516.	77
Figura 41. Validaci3n unidad 0516.	77
Figura 42. Unidad 0513_1.	78
Figura 43. Regad3os zona baja de la cuenca del r3o G3llego.	79
Figura 44. Calibraci3n unidad 0513_1.	82
Figura 45. Validaci3n unidad 0513_1.	82
Figura 46. Esquema subcuenca 0513_1 en RS-Minerve.	83
Figura 47. Unidades de la cuenca del r3o Flumen.	84
Figura 48. Unidad 1440.	84
Figura 49. Calibraci3n unidad 1440.	86
Figura 50. Validaci3n unidad 1440.	87
Figura 51. Unidad 1441_1.	87
Figura 52. Calibraci3n unidad 1441_1.	89
Figura 53. Validaci3n unidad 1441_1.	89
Figura 54. Unidad 1441_2.	90
Figura 55. Regad3os zona baja de las cuencas de los r3os Flumen, Guatizalema y Alcanadre.	91
Figura 56. Calibraci3n unidad 1441_2.	93
Figura 57. Validaci3n unidad 1441_2.	93
Figura 58. Unidades de la cuenca del r3o Guatizalema.	94
Figura 59. Unidad 1437.	94
Figura 60. Calibraci3n unidad 1437.	96
Figura 61. Validaci3n unidad 1437.	96
Figura 62. Unidad 1438.	97



Figura 63. Calibración unidad 1438.....	98
Figura 64. Validación unidad 1438.	99
Figura 65. Unidad 1439.	99
Figura 66. Calibración unidad 1439.....	101
Figura 67. Validación unidad 1439.	101
Figura 68. Unidades de la cuenca del río Alcanadre.	102
Figura 69. Unidad 1434.	102
Figura 70. Calibración unidad 1434.....	104
Figura 71. Validación unidad 1434.	104
Figura 72. Unidad 1435.	105
Figura 73. Calibración unidad 1435.....	106
Figura 74. Validación unidad 1435.	106
Figura 75. Unidad 1436.	107
Figura 76. Calibración unidad 1436.....	109
Figura 77. Validación unidad 1436.	109
Figura 78. Unidades de la cuenca del río Vero.....	110
Figura 79. Unidad 1422.	110
Figura 80. Calibración unidad 1422.....	112
Figura 81. Validación unidad 1422.	112
Figura 82. Unidad 1423.	113
Figura 83. Calibración unidad 1423.....	114
Figura 84. Validación unidad 1423.	115
Figura 85. Unidad 1424.	115
Figura 86. Comportamiento 1 unidad 1424.	116
Figura 87. Comportamiento 2 unidad 1424.	116
Figura 88. Unidades de la cuenca del río Cinca.....	117
Figura 89. Unidad 1414_1.....	117
Figura 90. Calibración unidad 1414_1.....	119
Figura 91. Validación unidad 1414_1.	119
Figura 92. Unidad 1401.	120
Figura 93. Calibración unidad 1401.....	121
Figura 94. Validación unidad 1401.	121
Figura 95. Unidad 1403_1.	122
Figura 96. Calibración unidad 1403_1.....	124



Figura 97. Validación unidad 1403_1.	124
Figura 98. Unidad 1405_1.	125
Figura 99. Calibración unidad 1405_1.	127
Figura 100. Validación unidad 1405_1.	127
Figura 101. Unidad 1416.	128
Figura 102. Calibración unidad 1416.	130
Figura 103. Validación unidad 1416.	130
Figura 104. Unidad 1420_1.	131
Figura 105. Calibración unidad 1420_1.	133
Figura 106. Validación unidad 1420_1.	133
Figura 107. Unidad 1406_1.	134
Figura 108. Calibración unidad 1406_1.	136
Figura 109. Validación unidad 1406_1.	136
Figura 110. Unidad 1407.	137
Figura 111. Calibración unidad 1407.	138
Figura 112. Validación unidad 1407.	138
Figura 113. Unidad 1411_1.	139
Figura 114. Regadíos zona baja de la cuenca del río Cinca.	140
Figura 115. Calibración unidad 1411_1.	143
Figura 116. Validación unidad 1411_1.	144
Figura 117. Esquema subcuenca 1411_1 en RS-Minerve.	144
Figura 118. Aportaciones totales anuales subsistema del río Gállego.	146
Figura 119. Año medio típico subsistema del río Gállego.	147
Figura 120. Aportaciones totales anuales cuenca del río Flumen.	148
Figura 121. Año medio típico cuenca del río Flumen.	149
Figura 122. Aportaciones totales anuales cuenca del río Guatzalema.	149
Figura 123. Año medio típico cuenca del río Guatzalema.	150
Figura 124. Aportaciones totales anuales cuenca del río Alcanadre.	150
Figura 125. Año medio típico cuenca del río Alcanadre.	151
Figura 126. Aportaciones totales anuales cuenca del río Vero.	152
Figura 127. Año medio típico cuenca del río Vero.	153
Figura 128. Aportaciones totales anuales cuenca del río Cinca.	153
Figura 129. Año medio típico cuenca del río Cinca.	154
Figura 130. Aportaciones totales anuales subsistema del río Cinca.	155



Figura 131. Año medio típico subsistema del río Cinca.....	156
Figura 132. Aportaciones totales anuales sistema de explotación Gállego-Cinca..	162
Figura 133. Año medio típico sistema de explotación Gállego-Cinca.....	164
Figura 134. Caudal medio de entrada Estación 9840-Embalse de Lanuza.....	177
Figura 135. Caudal medio de salida Estación 9840-Embalse de Lanuza.....	177
Figura 136. Caudal medio de entrada Estación 9835-Embalse de Búbal.	178
Figura 137. Caudal medio de salida Estación 9835-Embalse de Búbal.	178
Figura 138. Caudal medio Estación 9123-Anzanigo.....	179
Figura 139. Caudal medio de entrada Estación 9836-Embalse de La Peña.	180
Figura 140. Caudal medio de salida Estación 9836-Embalse de La Peña.	180
Figura 141. Caudal medio Estación 9059-Santa Eulalia	181
Figura 142. Caudal medio de entrada Estación 9837-Embalse de Ardisa.	182
Figura 143. Caudal medio de salida Estación 9837-Embalse de Ardisa.	182
Figura 144. Caudal medio de entrada Estación 9838-Embalse de La Sotonera. ...	183
Figura 145. Caudal medio de salida Estación 9838-Embalse de La Sotonera.....	183
Figura 146. Caudal medio Estación 9255-Ortilla.	184
Figura 147. Caudal medio Estación 9089-Zaragoza.	184
Figura 148. Caudal medio Estación 9190-Quicena.	185
Figura 149. Caudal medio Estación 9191-Barbués.	186
Figura 150. Caudal medio Estación 9094-Albalatillo.	186
Figura 151. Caudal medio de entrada Estación 9841-Embalse de Vadiello.....	187
Figura 152. Caudal medio de salida Estación 9841-Embalse de Vadiello.....	187
Figura 153. Caudal medio Estación 9192-Siétamo.	188
Figura 154. Caudal medio Estación 9032-Peralta de Alcofea_Guatizalema.	189
Figura 155. Caudal medio Estación 9091-Lascellas.....	189
Figura 156. Caudal medio Estación 9033-Peralta de Alcofea_Alcanadre.	190
Figura 157. Caudal medio Estación 9193-Ballobar.	191
Figura 158. Caudal medio Estación 9046-Lecina.	191
Figura 159. Caudal medio Estación 9095-Barbastro.	192
Figura 160. Caudal medio de entrada Estación 9849-Embalse de Plandescún.	193
Figura 161. Caudal medio de entrada Estación 9845-Embalse de Pineta.	193
Figura 162. Caudal medio de salida Estación 9845-Embalse de Pineta.	194
Figura 163. Caudal medio Estación 9172-Lafortunada.	194
Figura 164. Caudal medio Estación 9051-Escalona.....	195



Figura 165. Caudal medio Estación 9196-Torla.	196
Figura 166. Caudal medio Estación 9040-Boltaña	196
Figura 167. Caudal medio de entrada Estación 9846-Embalse de Mediano.....	197
Figura 168. Caudal medio de salida Estación 9846-Embalse de Mediano.....	197
Figura 169. Caudal medio de entrada Estación 9847-Embalse de El Grado.	198
Figura 170. Caudal medio de salida Estación 9847-Embalse de El Grado.	198
Figura 171. Caudal medio Estación 9017-Fraga.	199



Índice de Tablas

Tabla 1. Embalses subsistema río Gállego.	20
Tabla 2. Área de las cuencas del subsistema del río Cinca.	22
Tabla 3. Embalses subsistema río Cinca.	25
Tabla 4. Condiciones iniciales y parámetros modelo HBV.	37
Tabla 5. Parámetros algoritmo de calibración SCE-UA.	43
Tabla 6. Rangos de evaluación para calibración y validación.	45
Tabla 7. Áreas de las subcuencas del sistema Gállego-Cinca.	50
Tabla 8. Estaciones de aforo sistema Gállego-Cinca.	52
Tabla 9. Coeficientes de cultivo de referencia.	56
Tabla 10. Usos de suelo sistema Gállego-Cinca.	57
Tabla 11. Coeficiente de cultivo para cada subcuenca.	58
Tabla 12. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0504.	60
Tabla 13. Parámetros finales unidad 0504.	60
Tabla 14. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0505.	63
Tabla 15. Parámetros finales unidad 0505.	63
Tabla 16. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0508_1.	65
Tabla 17. Parámetros finales unidad 0508_1.	66
Tabla 18. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0509_1.	68
Tabla 19. Parámetros finales unidad 0509_1.	68
Tabla 20. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0511.	70
Tabla 21. Parámetros finales unidad 0511.	71
Tabla 22. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0512.	73
Tabla 23. Parámetros finales unidad 0512.	73
Tabla 24. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0516.	76
Tabla 25. Parámetros finales unidad 0516.	76
Tabla 26. Trasvases canales del Gállego y Monegros.	80
Tabla 27. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0513_1.	81
Tabla 28. Parámetros finales unidad 0513_1.	82
Tabla 29. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1440.	86
Tabla 30. Parámetros finales unidad 1440.	86
Tabla 31. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1441_1.	88
Tabla 32. Parámetros finales unidad 1441_1.	89



Tabla 33. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1441_2.	92
Tabla 34. Parámetros finales unidad 1441_2.	92
Tabla 35. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1437.	95
Tabla 36. Parámetros finales unidad 1437.	95
Tabla 37. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1438.	98
Tabla 38. Parámetros unidad 1438.	98
Tabla 39. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1439.	100
Tabla 40. Parámetros finales unidad 1439.	100
Tabla 41. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1434.	103
Tabla 42. Parámetros unidad 1434.	103
Tabla 43. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1435.	105
Tabla 44. Parámetros finales unidad 1435.	106
Tabla 45. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1436.	108
Tabla 46. Parámetros finales unidad 1436.	109
Tabla 47. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1422.	111
Tabla 48. Parámetros finales unidad 1422.	111
Tabla 49. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1423.	114
Tabla 50. Parámetros finales unidad 1423.	114
Tabla 51. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1414_1.	118
Tabla 52. Parámetros finales unidad 1414_1.	119
Tabla 53. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1401.	120
Tabla 54. Parámetros finales unidad 1401.	121
Tabla 55. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1403_1.	123
Tabla 56. Parámetros finales unidad 1403_1.	124
Tabla 57. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1405_1.	126
Tabla 58. Parámetros finales unidad 1405_1.	127
Tabla 59. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1416.	129
Tabla 60. Parámetros finales unidad 1416.	129
Tabla 61. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1420_1.	132
Tabla 62. Parámetros finales unidad 1420_1.	132
Tabla 63. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1406_1.	135
Tabla 64. Parámetros finales unidad 1406_1.	135
Tabla 65. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1407.	137
Tabla 66. Parámetros finales unidad 1407.	138



Tabla 67. Trasvase Canal del Cinca.....	141
Tabla 68. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1411_1.	143
Tabla 69. Parámetros finales unidad 1411_1.	143
Tabla 70. Estadísticos aportaciones totales anuales subsistema del río Gállego...	146
Tabla 71. Año medio típico subsistema del río Gállego.....	147
Tabla 72. Estadísticos aportaciones totales anuales cuenca del río Flumen.....	148
Tabla 73. Año medio típico cuenca del río Flumen.....	148
Tabla 74. Estadísticos aportaciones totales anuales cuenca del río Guatizalema.	149
Tabla 75. Año medio típico cuenca del río Guatizalema.	150
Tabla 76. Estadísticos aportaciones totales anuales cuenca del río Alcanadre.	151
Tabla 77. Año medio típico cuenca del río Alcanadre.	151
Tabla 78. Estadísticos aportaciones totales anuales cuenca del río Vero.....	152
Tabla 79. Año medio típico cuenca del río Vero.....	152
Tabla 80. Estadísticos aportaciones totales anuales cuenca del río Cinca.	153
Tabla 81. Año medio típico cuenca del río Cinca.	154
Tabla 82. Estadísticos aportaciones totales anuales subsistema del río Cinca.....	155
Tabla 83. Año medio típico subsistema del río Cinca.....	156
Tabla 84. Resumen de parámetros finales de las cuencas.	157
Tabla 85. Resumen calibración y validación del sistema Gállego-Cinca.....	158
Tabla 86. Valores generales promedio calibración y validación.	161
Tabla 87. Aportación y período dominante cuencas y subsistemas.....	161
Tabla 88. Aportaciones medias anuales cuencas y subsistemas.....	162
Tabla 89. Estadísticos aportaciones totales anuales sistema de explotación Gállego- Cinca.	163
Tabla 90. Año medio típico sistema de explotación Gállego-Cinca.....	163



1 INTRODUCCIÓN

El ser humano como ser pensante y activo siempre ha tenido en mente a lo largo de toda su existencia desde los tiempos antiguos en ir más allá de lo que posee en su vida cotidiana, tratando de mejorar las condiciones de vida de sí mismo para sobrevivir de una manera más cómoda y adecuada, con el fin de llevar una vida plena a gusto y con lo cual sus descendientes puedan llevar una mejor vida de la que ellos tuvieron que experimentar, con lo cual el entorno y los aspectos del mundo han ido avanzando cada vez más y más generando avances territoriales, políticos, tecnológicos, financieros, económicos y estándares de vida que han dado lugar a una creciente dependencia de los recursos hídricos. Muchas sociedades han experimentado la escasez de agua debido a los avances de la humanidad, los cuales se asocian con factores como el aumento de población, incremento de las urbanizaciones, industrias, usos energéticos, irrigaciones en agricultura, desertificación, calentamiento global y/o mala calidad del agua. Una mejor comprensión de cómo cada uno de estos factores influyen en el suministro, demanda y calidad de agua requieren mejores habilidades para entender los procesos latentes y su impacto en la disponibilidad y uso de la misma. Esto repercute en la utilización de enfoques o aproximaciones que integren los procesos hidrológicos a escala de cuenca para determinar una respuesta global para los diversos tipos de demandas y cambios climáticos. Centrándose en esta premisa, la modelización de cuencas está siendo utilizada como una herramienta para entender mejor el movimiento del agua superficial y subterránea, y las interacciones entre ellas, con lo cual más importante aún, ofrecen ayudas para la toma de decisiones en recursos hídricos, calidad del agua y diferentes tipos de riesgos que se puedan generar (Daniel et al., 2011).

También con el paso del tiempo la humanidad cada vez más le ha ido sumando importancia al fenómeno del cambio climático, el cual se viene evidenciando cada vez más con fluctuaciones en la temperatura y precipitación siendo favorable o no dependiendo de su ubicación geográfica, inundaciones y sequías más fuertes, aumento del nivel del mar, deshielos, cambios y desaparición de los ecosistemas, entre otros causando graves afectaciones económicas y sociales.

Con lo que el agua en sí es un recurso que se ve gravemente afectado por todas estas circunstancias, es un elemento clave y básico para la subsistencia de todo ser vivo, sin ella la vida en sí no se podría dar, con lo cual es de vital importancia intentar

conocer cómo es su comportamiento en el medio, sus recorridos, direcciones, transformaciones, etc, lo cual permite identificar en que zonas se evidencia más su presencia o escasez facilitando medidas de gestión que ayuden a realizar eficientemente el cumplimiento de los distintos usos primordiales y demandas de agua que actualmente el ser humano tiene tanto como para su subsistencia como lo es abastecimiento a poblaciones y zonas agrarias (agricultura, ganadería) así como para usos secundarios siendo los más representativos las zonas industriales y de generación eléctrica. El hombre a través del tiempo siempre ha tratado de lograr mediante diferentes metodologías analizar, igualar y predecir tales comportamientos de este recurso vital, una de ellas es la modelación hidrológica.

1.1 Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es la modelación hidrológica a nivel mensual del sistema de explotación Gállego-Cinca con un enfoque semidistribuido, mediante la utilización del modelo de precipitación-escorrentía HBV y el software RS-Minerve para que con esta modelación se pueda hacer una representación lo más realista posible de sus procesos, poder realizar la caracterización y parametrización de las subcuencas, y en sí de todo el sistema de explotación, logrando con esto estudiar y evaluar el comportamiento de los recursos hídricos, flujos superficiales, subterráneos e influencia de los embalses presentes en la zona de estudio, para obtener así un modelo parametrizado del sistema de explotación capaz de reproducir cualquier tipo de evento con otros datos de entrada diferentes a los utilizados para su calibración.

El objetivo secundario es realizar varias comparaciones de las aportaciones en régimen natural que generen el modelo HBV, con respecto a las del modelo SIMPA registradas en el modelo de gestión de Aquatool previamente desarrollado por la confederación hidrográfica del Ebro. La intención de realizar esta comparación es determinar la calidad de SIMPA debido a que es un modelo más general y el realizado en este trabajo con HBV tiene un nivel de detalle más elevado.

La modelación hidrológica a realizar es sobre 2 cuencas principales de la confederación hidrográfica del Ebro, más exactamente en el sistema de explotación Gállego-Cinca con una superficie de 12088 Km², específicamente la cuenca del río Gállego tiene una extensión de 4008 Km², mientras que la del río Cinca es de 8080 Km² siendo aproximadamente el doble en extensión que la anterior. La zona a estudiar



se sitúa al noroeste de España, iniciando en los límites con Francia y Andorra donde nacen los ríos previamente mencionados, y bajando hacia el sureste hasta desembocar en el río Ebro, pasando por poblaciones importantes como Zaragoza en el caso del río Gállego y Huesca, Barbastro y Monzón para el río Cinca.

El modelo hidrológico a utilizar es el HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia (Bergström, 1976; Lindström et al., 1997) es de gran tradición en países nórdicos, tiene una larga historia y ha sido aplicado en más de 30 países, ha sido elegido entre otros tantos modelos existentes debido a que no tiene gran cantidad de parámetros siendo así un modelo robusto y versátil haciéndolo cumplir con el principio de parsimonia.

El software a emplear es el RS-Minerve (Routing System Minerve) desarrollado en conjunto por el Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) y la oficina de ingeniería HydroCosmos SA junto con la colaboración de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL), creado y distribuido gratuitamente desde 2011, es un programa para la simulación de la formación y propagación de la escorrentía superficial, capaz de modelar redes hidráulicas e hidrológicas complejas de acuerdo a un esquema semidistribuido conceptual, ha sido utilizado para diferentes estudios en varios países.

El procedimiento será tomar las subcuencas o unidades existentes generadas previamente por la confederación hidrográfica del Ebro de las cuencas del Gállego y del Cinca y en realizar en cada una de ellas una modelación hidrológica individual a nivel mensual teniendo en cuenta los datos de temperatura, precipitación y evapotranspiración representativos para el centroide de cada unidad, así como las demandas de agua de las que se tenga conocimiento de la zona y se encuentren registradas en el modelo de gestión del software Aquatool (Andreu et al., 1996) previamente desarrollado del sistema de explotación, además se utilizarán las estaciones de aforo de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (R.O.E.A) presentes en la zona de estudio para poder hacer una comparación entre la simulación que me entrega el software RS-Minerve y los datos observados registrados a través de los años por dichas estaciones y con esto realizar las calibraciones pertinentes ya sea de manera manual y/o automática a los parámetros del modelo HBV que se está utilizando para obtener simulaciones acordes a la realidad para luego finalmente hacer



la validación de estos parámetros ya calibrados en otro período de tiempo. Los índices de eficiencia a utilizar para estimar la efectividad de la calibración y la validación serán Nash, Nash-In, coeficiente de correlación de Pearson y Bias Score, con las cuales se realizará una media ponderada denominada función objetivo para su análisis.

Para luego finalmente poder realizar la caracterización y parametrización de las subcuencas y en sí de todo el sistema de explotación, logrando con esto estudiar y evaluar el comportamiento de los recursos hídricos, flujos superficiales, subsuperficiales, subterráneos e influencia de los embalses presentes en la zona de estudio, así como la comparación de las aportaciones en régimen natural entre los resultados de HBV y SIMPA.

1.2 Estructura del documento

A continuación se enuncia cada capítulo dando un pequeño resumen del contenido de cada uno de ellos, para tener una idea general del proceso y estructura del presente trabajo de final de máster:

En el capítulo 2 se describe en general todo lo respectivo a la modelación hidrológica, su descripción, un poco de historia, tipos y sus 3 etapas las cuales son calentamiento, calibración y validación.

En el capítulo 3 se presenta la descripción detallada de la zona de estudio es decir del sistema de explotación Gállego-Cinca, su ubicación, subdivisión general, embalses presentes, demandas de agua principales, red hidrográfica, climatología, entre otros.

En el capítulo 4 se presenta la metodología específica a seguir para la realización de este trabajo así como las herramientas de modelación como lo son el software, el tipo de modelo hidrológico y algoritmo de calibración a utilizar.

En el capítulo 5 se presenta la parte más importante de este trabajo en donde se explican primero aspectos como la función objetivo e índices de eficiencia aplicados y sus combinaciones, la recopilación de los datos meteorológicos y de estaciones de aforo, el cálculo de la evapotranspiración potencial, la subdivisión del sistema de explotación en diferentes subcuencas de menor calibre y un resumen general del proceso y período de calibración específico. Luego se presentan en sí ya las calibraciones y validaciones del modelo hidrológico para cada una de las subcuencas del sistema de explotación junto con sus resultados y gráficas. Posteriormente se



presentan las comparaciones entre las aportaciones naturales del modelo SIMPA registradas en el modelo de gestión de Aquatool con las aportaciones obtenidas con el modelo hidrológico realizado. Finalmente se realiza una valoración general de todos los resultados obtenidos del trabajo.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones pertinentes generales de las simulaciones y comparaciones realizadas y del todo el trabajo en sí.

En el capítulo 7 se presentan las referencias utilizadas y consultadas para la realización del presente informe.

En el capítulo 8 se presenta un anejo el cual incluye una representación gráfica de los datos de la serie histórica utilizada para cada una de las estaciones de aforo tenidas en cuenta, así como una breve explicación de ellas.

2 ESTADO DEL ARTE DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Un modelo hidrológico a nivel de cuenca es un conjunto de descripciones matemáticas de componentes del ciclo hidrológico que utilizan principios físicos básicos colectivamente con datos experimentales, los cuales surgen como respuesta a la necesidad de disponer de herramientas de gestión de los recursos hídricos, y buscan establecer una caracterización precisa de los procesos hidrológicos.

La estructura del modelo y la arquitectura del mismo son determinadas dependiendo del objetivo por el cual el modelo es desarrollado. Por ejemplo, un modelo hidrológico es diferente si es tratado para control de avenidas, generación hidroeléctrica, operación de embalses, gestión de recursos hídricos o ecológicos, etc. Dependiendo del tipo de modelo la información que se requiera puede cambiar siendo los más representativos los datos hidrometeorológicos, geomorfológicos, agrícolas, pedológicos, geológicos e hidrológicos. Los hidrometeorológicos se refieren a la lluvia, nieve, temperatura, humedad, velocidad de viento y evaporación. Los datos geomorfológicos incluyen mapas topográficos, redes fluviales, áreas y longitudes de drenaje, pendientes y áreas de cuenca; Los agrícolas contienen coberturas vegetales y usos de suelo; en cuanto a los pedológicos se tienen en cuenta el tipo, textura, estructura y condición del suelo, así como tamaño de sus partículas, diámetro, porosidad y contenido de humedad; Los geológicos representan la estratigrafía y litología; Finalmente los datos hidrológicos son aquellos tales como profundidad del flujo, caudal de descarga, flujo base, interflujo, interacciones corriente-acuífero y niveles freáticos (Singh y Woolhiser, 2002). Cabe destacar que debido a la gran variedad de modelos no todos ellos requieren la totalidad de los anteriores datos, cada uno de éstos pueden requerir parte de los datos mencionados dependiendo de los objetivos de la modelación y su grado de simplificación.

2.1 Generalidades

La modelación hidrológica es una rama fundamental de la hidrología, ya que nos permite tener un mejor conocimiento de las propiedades, características y comportamientos más habituales de las cuencas hidrográficas debido a las particularidades, patrones y combinaciones de los factores hidroclimáticos, así como ayudan a ganar una mejor comprensión de los fenómenos hidrológicos que generan éstas y como sus cambios pueden afectar estos fenómenos, mediante la simulación



de la representación simplificada de un sistema real, y así poder estimar, predecir y analizar futuros eventos que se puedan producir en las cuencas, para utilizar los resultados obtenidos en diferentes tipos de estudios futuros, ya sea de predicción y/o control de avenidas, análisis de infraestructuras existentes, análisis y gestión de recursos hídricos, estudios de los impactos de cambios del uso de suelo, control de la calidad de las aguas, estudios de cambio climático, gestión de aguas subterráneas, ordenación del territorio, estudios hidráulicos, de suelos, de carreteras, entre otros.

Desde la década de los sesenta del siglo pasado se han venido desarrollando cantidad de modelos hidrológicos debido a la necesidad de representar los procesos y comportamientos hidrológicos que se dan en las cuencas hidrográficas y en el medio en general.

Han tenido una evolución gradual con el paso del tiempo teniendo desde modelos agregados considerando la cuenca como un todo hasta los distribuidos haciendo una gran discretización espacial, así como desde los de tipo caja negra en donde sólo se era consciente de las entradas al sistema y de sus salidas, mas no de los procesos que se producían dentro. Siguiendo a esto se desarrollaron los denominados de caja gris donde se conoce con cierto grado de simplificación todos los procesos y comportamientos internos del sistema y evolucionar posteriormente a los llamados caja blanca para los cuales se saben casi a ciencia cierta y con buena claridad estos procesos y comportamientos dentro del modelo utilizado desde el inicio en la precipitación hasta la descarga final del sistema.

A medida que los avances tecnológicos se iban acrecentando y con la aparición y desarrollo de los computadores aproximadamente hace tres décadas, muchos más modelos han venido surgiendo, tanto nuevos como actualizaciones y modificaciones de los previamente existentes, haciendo posible que se puedan representar los sistemas de una forma más real y completa, realizando simulaciones hidrológicas complejas, incluyendo una mayor cantidad de parámetros, variables y ecuaciones.

En general los modelos hidrológicos presentan los siguientes elementos:

- Variables de entrada (Inputs): Series de datos a partir de las cuales las ecuaciones del modelo realizan los cálculos pertinentes. Precipitación, temperatura, evapotranspiración, etc.

- **Parámetros:** Son las características del sistema que en general permanecen constantes en el tiempo. Velocidad de infiltración, coeficientes de descarga, capacidad de campo, etc.
- **Variables de estado:** Definen el estado del sistema en cada momento. Humedad del suelo, almacenamiento en los tanques, etc.
- **Ecuaciones:** Expresiones matemáticas que reflejan la simplificación del sistema.
- **Salidas (outputs):** Flujos de salida y/o variables de interés de la cuenca. Flujos intermedios, flujo final, infiltración, etc.

2.2 Clasificación

Existe una gran variedad de clasificación de los modelos hidrológicos, sin embargo se pueden resumir en cuatro principales categorías según Daniel et al., (2011) las cuales son naturaleza de los algoritmos empleados, técnicas involucradas en el proceso de modelamiento, representación espacial y escala temporal.

2.2.1 Naturaleza de los algoritmos empleados

2.2.1.1 Modelos empíricos

Los modelos empíricos o también llamados de caja negra, son la representación de un sistema real con explicaciones matemáticas utilizando datos experimentales sin realmente tratar de explicarlo mediante leyes físicas generales. Se basan en relaciones de entrada-salida y no se preocupan por describir los procesos y comportamientos internos del sistema. Este tipo de modelo es desarrollado mediante investigación y experimentación, contiene parámetros que pueden tener poco sentido físico. El método racional, el número de curva del Soil Conservation Service (SCS, 1972), GR4J (Perrin et al., 2003) y modelos estocásticos de series de tiempo son ejemplos de esta clase.

2.2.1.2 Modelos de base física

En los modelos de base física o también llamados de caja blanca o teóricos, se conocen todos los procesos y comportamientos internos del sistema. Las leyes que rigen el sistema son totalmente conocidas, utilizan las ecuaciones físicas básicas tales como conservación de la masa, momento y energía para describir éstos procesos hidrológicos. Pueden permitir diferentes predicciones de un sistema bajo cualquier condición, se asume que la recolección de datos requeridos es posible. Sin embargo

estos modelos son difíciles de desarrollar ya que sólo pueden ser utilizados en sistemas físicos limitados o para investigaciones específicas (Jajarmizadeh et al., 2012). Ejemplos de estos modelos son SHE (Abbott et al., 1986a y 1986b) y TOPMODEL (Beven y Kirkby, 1979).

2.2.1.3 Modelos conceptuales

Los modelos conceptuales o también llamados de caja gris, se encuentran en un intermedio entre los empíricos y los de base física. Generalmente consideran leyes físicas pero con una gran simplificación, utilizan técnicas matemáticas y utilizan almacenamientos o tanques para representar los balances de agua. Ejemplos de estos modelos son el HBV, SAC-SMA (Burnash et al., 1973) y SOCONT (Schaeffli et al., 2005).

2.2.2 Técnicas involucradas en el proceso de modelamiento

2.2.2.1 Modelos determinísticos

Son modelos matemáticos en los que los resultados son obtenidos mediante relaciones conocidas entre estados y eventos, no dan aleatoriedad, permiten una sola salida de una simulación con un conjunto de valores de entrada y de parámetros. Aplican ecuaciones diferenciales parciales no lineales para cada parámetro dadas ciertas condiciones con las que describen el proceso hidrológico y presentan el interior de los procesos lo cual permite un mejor entendimiento del sistema hidrológico (Jajarmizadeh et al., 2012).

2.2.2.2 Modelos estocásticos

Este tipo de modelos carece de bases físicas y tienen la mayoría de sus datos de entrada y/o parámetros representados por distribuciones estadísticas y probabilísticas las cuales determinan un rango de resultados los cuales tienen cierto grado de aleatoriedad e incertidumbre. Como los modelos de regresión lineal, autoregresivos y ARIMA.

2.2.3 Representación espacial

2.2.3.1 Modelos agregados

Una de las principales limitaciones en la modelación de cuencas es el desconocimiento de las propiedades del suelo y de los procesos involucrados en los

flujos subsuperficiales y subterráneos. Esta limitación es superada si se asume que la cuenca es homogénea, tanto en sus procesos superficiales, subsuperficiales y subterráneos, afirmación que es válida para cuencas pequeñas (Cabrera, s.f.).

Los modelos agregados consideran la cuenca como un todo, donde los parámetros y variables son constantes en el espacio. La ventaja de estos modelos es que no necesitan de la calibración de muchos parámetros y tienen unas expresiones matemáticas sencillas, sin embargo no muestran la variabilidad interna del sistema sino que sus resultados son la representación de su situación media. El modelo de precipitación-escorrentía de Témez es un claro ejemplo de modelo agregado, así como el HEC-HMS (USACE, 2000) y el Stanford Watershed Model (Crawford y Linsley, 1966).

2.2.3.2 Modelos distribuidos

Con el fin de tener una mayor representatividad de la cuenca, los modelos distribuidos la discretizan en un gran número de elementos pequeños regulares e irregulares, grillas o mallas donde el flujo de agua va pasando de un punto o nodo hacia el siguiente y así el agua drena por toda la cuenca, teniendo variabilidad espacial de parámetros, variables y resultados, permitiendo así interacción entre los diferentes procesos en cada una de las celdas generadas. Este tipo de modelos representa de muy buena manera la heterogeneidad de la cuenca capaz de obtener resultados en cada celda, sin embargo requiere de una gran cantidad de datos que puede que no existan o se encuentren incompletos, mayor cantidad de parámetros para calibrar, mucho tiempo para ajustarlos y recursos computacionales considerables. Ejemplos de este tipo de modelos son TETIS (Vélez, 2001), SHE y TOPMODEL.

2.2.3.3 Modelos semi-distribuidos

Cuando las cuencas ya no son pequeñas, muchas características de ella no se pueden asumir como homogéneas en toda su superficie con lo que se pueden discriminar zonas de similar comportamiento hidrológico y analizar cada una de forma independiente para posteriormente combinar sus efectos.

Para evitar las dificultades de los modelos distribuidos, se desarrollaron los modelos semi-distribuidos los cuales son un término medio entre los agregados y los distribuidos, en la que la cuenca es dividida en diferentes subcuencas o unidades de

mayor tamaño que las grillas de los modelos distribuidos, que a su vez son tratadas como una sola unidad al juntarse. Su estructura tiene una mejor base física que los modelos agregados y requiere menor cantidad de datos de entrada que los distribuidos. Ejemplos de modelos semi-distribuidos son el HBV y el HYPE (Arheimer et al., 2008)

En la Figura 1 se pueden apreciar los 3 tipos de modelos según su representación espacial:

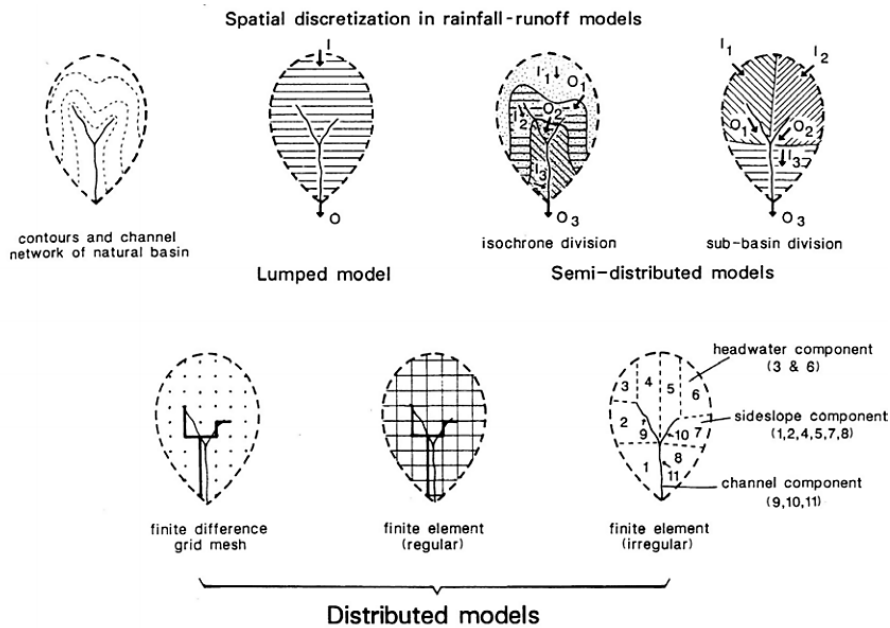


Figura 1. Modelos hidrológicos según su distribución espacial.
Fuente: Xu, (2002).

2.2.4 Escala temporal

2.2.4.1 Basado en eventos

Los modelos basados en eventos simulan el sistema para un sólo evento específico en un pequeño intervalo de tiempo que puede ser desde una hora o menos hasta muchos días (Jajarmizadeh et al., 2012).

2.2.4.2 Proceso continuo

Los modelos de proceso continuo realizan simulaciones para uno o varios eventos en grandes intervalos de tiempo que pueden ser bastantes años. Una de las grandes ventajas de este tipo de modelos es que pueden tener más éxito para cuencas no aforadas y para el estudio de las características a largo plazo de un sistema.

2.3 Calentamiento, calibración y validación

2.3.1 Calentamiento

El período de calentamiento es la etapa en la cual se realiza la simulación en un pequeño intervalo de tiempo previo a la calibración, en donde se busca inicializar el modelo para neutralizar el efecto y/o reducir la influencia de las condiciones iniciales que son desconocidas, para así al final del calentamiento obtener unos valores que serán utilizados como condiciones iniciales para la calibración, pueden ser tales como humedad inicial, altura de nieve, altura de lámina de agua, etc.

2.3.2 Calibración

La calibración es el proceso de ajustar los valores de los parámetros para así optimizar el desempeño del modelo de acuerdo a un conjunto de criterios predefinidos. Cada modelo utiliza uno o más grupos de parámetros que son usados para determinar el comportamiento básico del sistema modelado (Wilby, 1997). En esta etapa se intenta lograr la mejor concordancia entre las predicciones del modelo y las observaciones de respuesta actual de la cuenca, al identificar los parámetros efectivos con los cuales la diferencia entre estas predicciones y observaciones sea menor posible.

Para poder hallar estos parámetros se puede realizar de dos maneras, la primera mediante calibración manual o también llamada prueba y error, en donde se realiza un ajuste manual a criterio propio, suele ser un proceso lento y en algunos casos no muy efectivo; la segunda es mediante la calibración automática en la que se optimiza utilizando técnicas numéricas de optimización, es un método más eficaz y conciso, aunque el tiempo que se tarda en arrojar los resultados depende del modelo, de la cantidad de parámetros y la escala temporal.

Para evaluar las diferencias entre los resultados de la simulación se hace uso de índices de eficiencia y función objetivo los cuales son explicados más adelante.

2.3.3 Validación

Una vez que el modelo esté calibrado éste debe ser verificado para identificar su precisión, se realiza la simulación utilizando un período diferente al del paso anterior para evaluar que tan correctos son los parámetros arrojados en el proceso de calibración y comprobar si el modelo es estable. Si el modelo se encuentra bien calibrado, éste debe arrojar buenos resultados en cuanto a índices de eficiencia y



función objetivo, ya que estos representan la bondad del ajuste del modelo en cuanto a los datos simulados y los observados. Existen tres tipos de validación siendo en el tiempo, en el espacio y en el espacio-tiempo, en donde las dos últimas son exclusivas de los modelos distribuidos.

3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA

La confederación hidrográfica del Ebro se divide en 17 sistemas de explotación, de los cuales el de mayor extensión es el sistema Gállego-Cinca a modelar con 12088 Km². Los principales ríos que discurren son el Gállego, Flumen, Alcanadre, Guatizalema, Vero y Cinca, siendo el primero y el último los cauces principales. El sistema se compone de dos cuencas independientes una de la otra, con lo que las descripciones y análisis se realizarán por separado aunque pertenezcan al mismo sistema de explotación (a excepción de la demandas de agua por abastecimiento, agrarias e industriales ya que en el plan hidrológico no hacen la distinción sino lo tratan como uno solo) y se denominarán subsistema río Gállego y subsistema río Cinca. Se destaca la presencia de 10 embalses por encima de 3 Hm³ los cuales controlan y gestionan los recursos, causando una grave afectación en las cuencas haciendo que el régimen natural se vea alterado. A continuación en la Figura 2 se aprecia la ubicación confederación hidrográfica del Ebro dentro del territorio español con respecto a las demás confederaciones hidrográficas, en la Figura 3 se presenta la ubicación del sistema Gállego-Cinca dentro de la confederación hidrográfica del Ebro, en la Figura 4 se muestra la red hidrográfica, teniendo a la izquierda el subsistema del río Gállego y a la derecha el del Cinca, en la Figura 5 la topografía del sistema y en la Figura 6 los embalses presentes en la actualidad en la zona de estudio, los cuales se explicarán más a fondo más adelante.



Figura 2. Ubicación confederación hidrográfica del Ebro en España
Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (s.f.).



Figura 3. Ubicació del sistema Gállego-Cinca en la confederació hidrogràfica del Ebro

Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro, (2013).

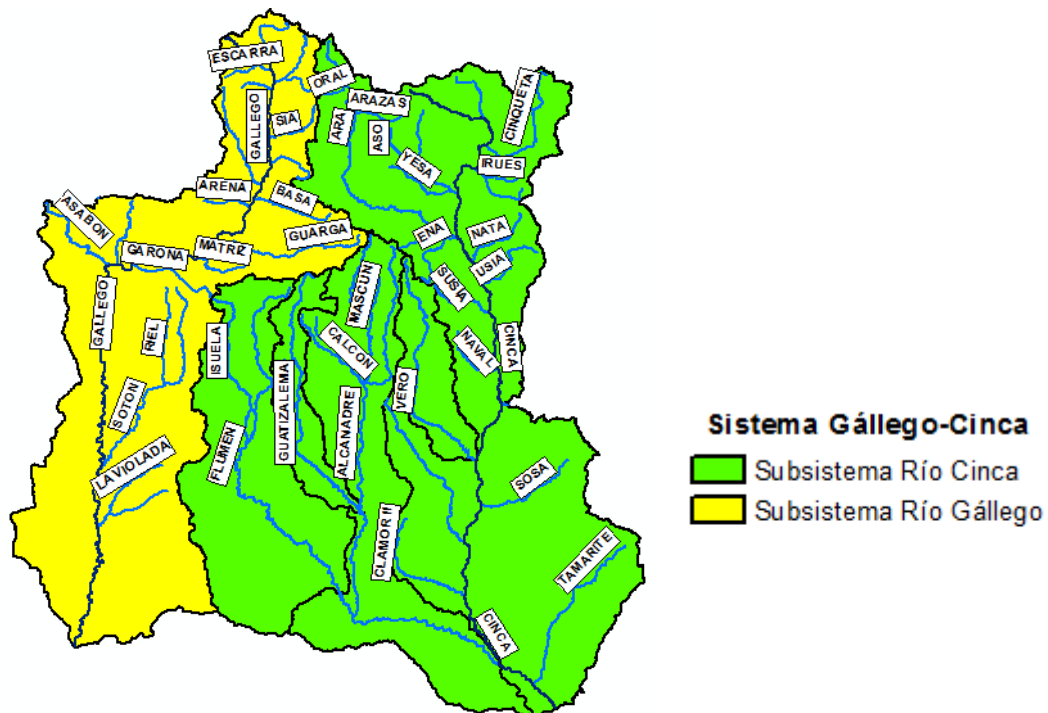


Figura 4. Red hidrogràfica del sistema Gállego-Cinca.

Fuente: Elaboración Propia.

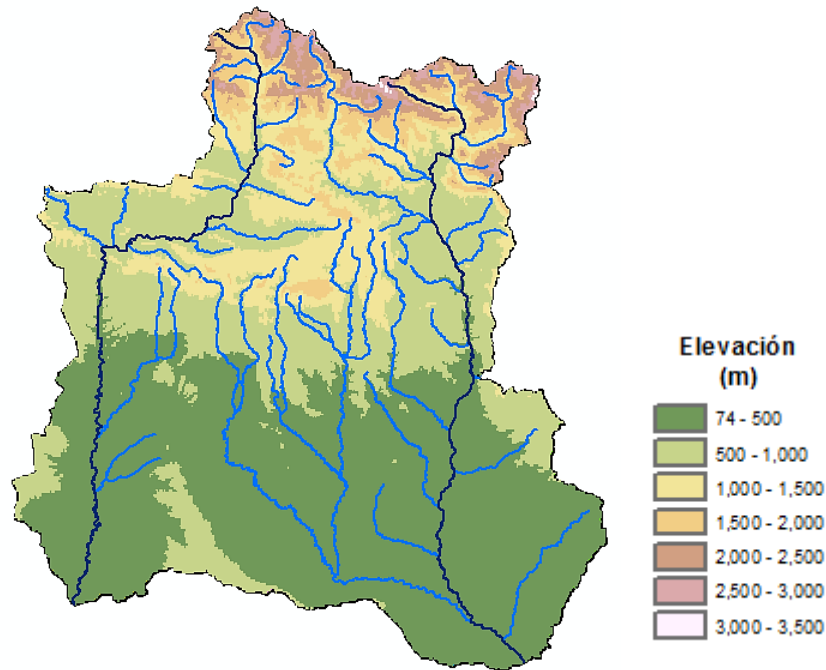


Figura 5. Topografía del sistema Gállego-Cinca.
Fuente: Elaboración Propia.

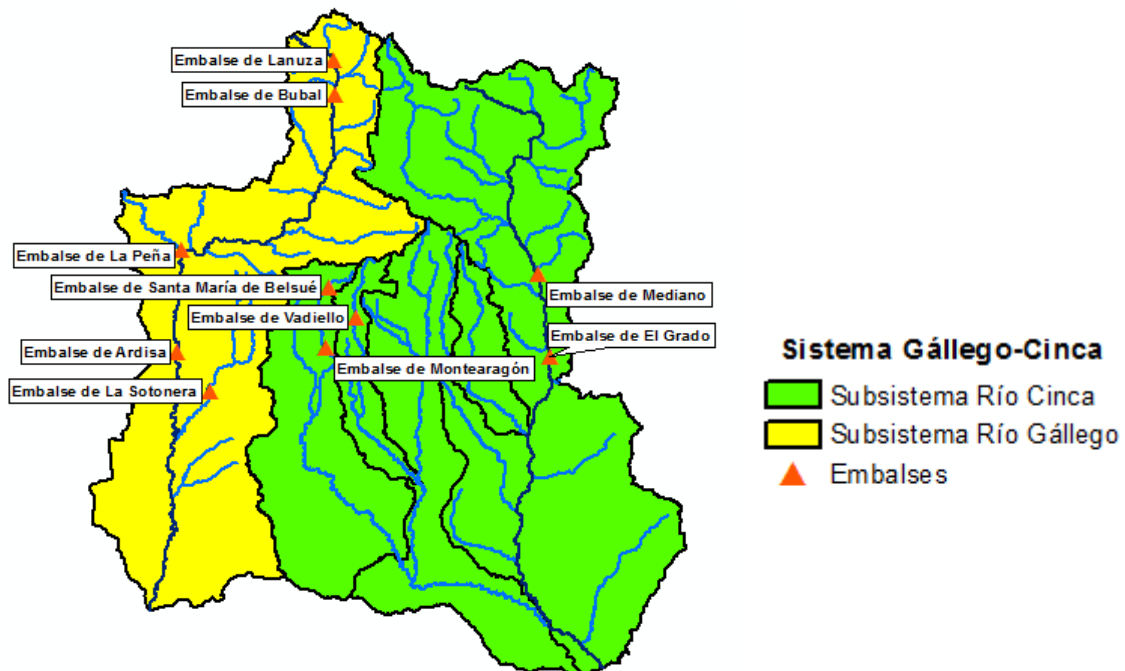


Figura 6. Embalses del sistema Gállego-Cinca.
Fuente: Elaboración Propia.

Según la Confederación Hidrográfica del Ebro, (2015) las demandas de agua del sistema se deben a tres tipos de suministros de abastecimiento, agrarias e industriales. Las demandas de suministro a poblaciones se estiman en 22.21 Hm³ anuales para una población residente aproximada de 162464 habitantes. Las demandas agrarias se componen por la demanda ganadera y la demanda de regadío,

siendo esta última mucho más influyente, ya que el sistema de explotación tiene una gran importancia agrícola teniendo una superficie total de regadíos de 173621 Ha siendo la mayor de todos los sistemas de la confederación hidrográfica del Ebro y concentrándose principalmente desde la zona media del sistema en estudio hacia el sur, para las cuales se tiene una demanda de 1557.37 Hm³/año, cabe destacar que incluye a las 125000 Ha del sistema de riego del Alto Aragón el cual es la mayor comunidad de regantes española, todas estas demandas por las zonas de regadíos son suplidas mediante las aportaciones propias, distintos embalses, redes de canales, acequias y trasvases provenientes de éstos, los cuales serán nombrados más adelante, en cuanto a la demanda ganadera es muy poca en consideración con la anterior siendo de 7.23 Hm³/año para un total de demanda agraria de 1564.60 Hm³/año. Por último con respecto a las demandas industriales se tiene una demanda de 10.77 Hm³ anuales.

3.1 Subsistema del río Gállego

El río Gállego es un afluente del río Ebro por su margen izquierda, transitando en su totalidad por la Comunidad Autónoma de Aragón, desde su nacimiento a una altitud de 2200 metros sobre el nivel del mar (msnm) en el collado de Canal Roya hasta su desembocadura en el río Ebro junto a la ciudad de Zaragoza a 180 msnm. Su longitud total es de poco más de 200 Km y su cuenca hidrográfica tiene forma alargada en dirección norte-sur de 4008 km², recibe principalmente las aguas del río Gállego y algunos otros ríos menores y pequeños como Aurin, Guarga, Garona y Sotón.



Figura 7. Cuenca del subsistema del río Gállego.
Fuente: Elaboración Propia.

La pendiente media del cauce es de 1% sin embargo varía dentro de la cuenca teniendo en la zona de cabecera pendientes cinco veces mayores y en la zonas media y baja las pendientes se encuentran entre 0.4 y 0.5%. A su vez las pendientes cambian por el efecto barrera de los embalses en la zona de cola de los mismos, provocando sedimentación y elevación del lecho del río. Las aportaciones medias del río Gállego al Ebro son de aproximadamente 12.5 m³/s en caudal medio continuo.

El clima tiene una progresión de norte a sur, pasando de lluvioso y frío en la montaña a árido desde la zona central hacia abajo. Presenta una precipitación entre 1330 mm en cabecera y 370 mm en su zona de desembocadura, en donde para la zona de cabecera la cual es zona de montaña hacia los Pirineos las precipitaciones se generan en forma de nieve usualmente entre noviembre y marzo, es decir que su época más lluviosa se produce en invierno y primavera, mientras la más seca en julio y agosto característico de un clima atlántico con influencia mediterránea. En cuanto a la zona que ya no hace parte de la cabecera, mientras más al sur la influencia mediterránea se hace más evidente haciendo que los valores de pluviometría vayan descendiendo, los períodos de mayores lluvias ahora son otoño e invierno para esta última parte.

La temperatura media anual tiene una variación entre 14 °C en desembocadura hasta 4 °C en la cabecera. En los meses de julio y agosto es cuando se presentan las temperaturas máximas, y en enero y febrero las mínimas.

Así como la temperatura y precipitación varían entre la zona de montaña y la desembocadura, la evapotranspiración lo hace entre 500 mm y 800 mm respectivamente. En términos generales se puede evidenciar un déficit hídrico a partir de la zona media del subsistema hacia el sur, debido a que la precipitación media es menor o igual a la evapotranspiración, en cuanto desde la zona media hacia el norte se presenta el caso contrario donde se tienen excedentes hídricos.

En la Figura 8 se presentan los valores medios de precipitación, temperatura y evapotranspiración para el subsistema del río Gállego.

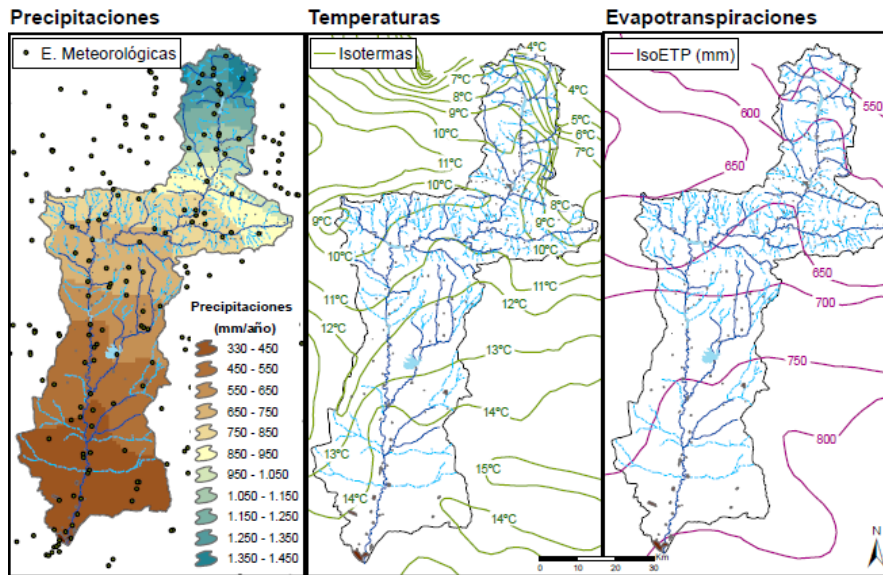


Figura 8. Precipitación, temperatura y evapotranspiración del subsistema del río Gállego.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro, (2007a).

Este río se encuentra muy alterado debido a la gran regulación que tiene por la cantidad de embalses que se encuentran en su cauce, los 5 principales embalses que se encuentran en la cuenca del río Gállego son el embalse de Lanuza, Búbal, La Peña, Ardisa y la Sotonera, los cuales se mostraron ubicados en el sistema Gállego-Cinca en la Figura 6.

- **Embalse de Lanuza**

Se localiza sobre el río Gállego cerca de la frontera con Francia, al norte de la provincia de Huesca en el municipio de Sallent de Gállego. Tiene una capacidad de 25 Hm³ el cual nunca se ha alcanzado ya que se inundarían zonas próximas al municipio. Por lo cual su cota máxima se asume como 1275,5 m, para un volumen de 16.85 Hm³ y una superficie de 99.53 Ha. Sus principales usos son para regadíos, producción hidroeléctrica y usos recreativos.

- **Embalse de Búbal**

El embalse de Búbal se localiza sobre los ríos Gállego, Caldares y Aguilero, al norte de la provincia de Huesca, en los municipios de Panticosa, Tramacastilla de Tena y Hoz de Jaca. Tiene una capacidad de 64.25 Hm³. Sus principales usos son para abastecimiento, regadíos, producción hidroeléctrica, usos industriales y recreativos.

- **Embalse de La Peña**

El embalse de La Peña se localiza sobre los ríos Gállego, Asabón y Triste, al este de la provincia de Huesca en el municipio de Las Peñas de Riglos. Tiene una capacidad de 25 Hm³. Su principal uso es para regadíos.

- **Embalse de Ardisa**

El embalse de Ardisa se localiza sobre el río Gállego, al noreste de la provincia de Zaragoza, en la divisoria con la provincia de Huesca, en los municipios de Ardisa y Biscarrués. Tiene una capacidad de 5 Hm³. Existe un trasvase hacia el Embalse de la Sotonera por medio del canal del Gállego. Sus principales usos son para abastecimiento, regadíos, producción hidroeléctrica y control de avenidas.

- **Embalse de la Sotonera**

El embalse de La Sotonera se localiza sobre los ríos Sotón y Astón, al oeste de la provincia de Huesca, en los municipios de Lupiñén-Ortilla y Alcalá de Gurrea. Tiene una capacidad de 189.22 Hm³. Recibe un trasvase del embalse de Ardisa mediante el canal del Gállego y a su vez realiza otro, transportando el agua por medio del canal de Monegros diseñado para conducir un caudal de 80 m³/s, con destino al regadío de Los Monegros. Sus principales usos son para abastecimiento, regadíos, producción hidroeléctrica y usos recreativos.

Embalse	Año de Construcción	Tipo	Altura (m)	Longitud de Coronación (m)	Superficie (Ha)	Volumen (Hm ³)	Cota Lámina de Agua (m)
Lanuza	1978	Bóveda	79.60	176.33	114.00	25.00	1283.50
Búbal	1971	Arco Gravedad	90.00	195.00	312.50	64.25	1084.42
La Peña	1913	Arco Gravedad	61.00	111.70	321.00	25.00	539.00
Ardisa	1927	Gravedad	34.64	440.00	155.00	5.00	420.54
La Sotonera	1963	Materiales Suelos Homogénea	31.00	1134.39	1840.00	189.22	417.50

Tabla 1. Embalses subsistema río Gállego.

Cabe destacar que todas las principales características y descripciones previas del subsistema del río Gállego fueron obtenidas tras la consulta de Confederación Hidrográfica del Ebro, (2007a, 2015).

3.2 Subsistema del río Cinca

El río Cinca es un afluente del río Ebro por su margen derecha, discurrendo a su vez como el río Gállego en su totalidad por la Comunidad Autónoma de Aragón, en la provincia de Huesca excepto cerca de la zona final en la desembocadura que alcanza

a estar en la provincia de Lérida, tiene su nacimiento en el lago de Marboré a una altitud de 2572 metros sobre el nivel del mar (msnm) y desemboca en el río Segre afluente del río Ebro a una cota de 75 msnm. Su longitud total es de 191 Km y su cuenca hidrográfica tiene 8080 km² siendo de forma alargada-ancha de dirección norte-sur, recibe principalmente las aguas del río Cinca, algunos otros ríos menores y pequeños como Cinqueta, Ara, Sosa y Tamarite, así como otros ríos de mayor calibre e importancia como el Flumen, Alcanadre, Guatizalema y Vero. Cabe destacar que el río Ésera desemboca en el río Cinca aportando sus aguas sin embargo su cuenca se analiza en el sistema de explotación Ésera-Noguera Ribagorzana mas no en el Gállego-Cinca.

El caudal medio del río Cinca es 80.1 m³/s con una aportación media de 2.571 Hm³/año.

El subsistema del río Cinca se divide en 5 cuencas las cuales representan al río Cinca en sí y a los ríos de mayor importancia que desembocan en el Cinca como se mencionó previamente, los cuales se presentan en la Figura 9 y Tabla 7.

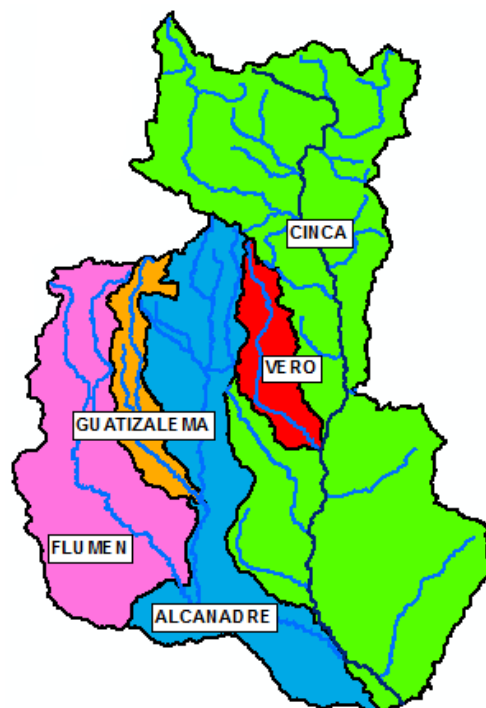


Figura 9. Cuencas del subsistema del río Cinca.
Fuente: Elaboración Propia.

CUENCA	Área (Km ²)
Flumen	1499
Guatizalema	362
Alcanadre	1529
Vero	390
Cinca	4300
TOTAL	8080

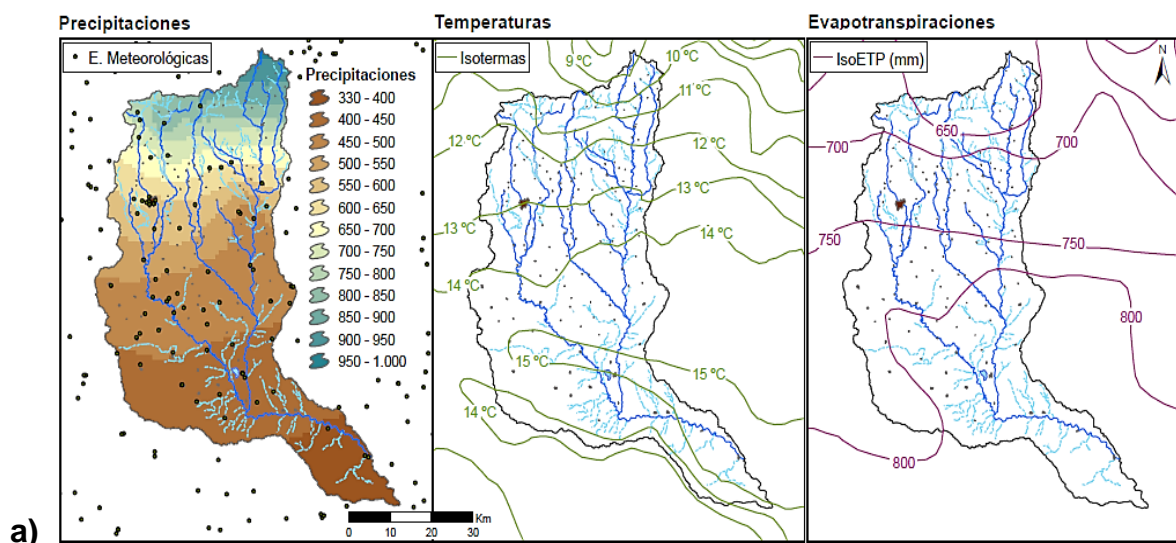
Tabla 2. Área de las cuencas del subsistema del río Cinca.

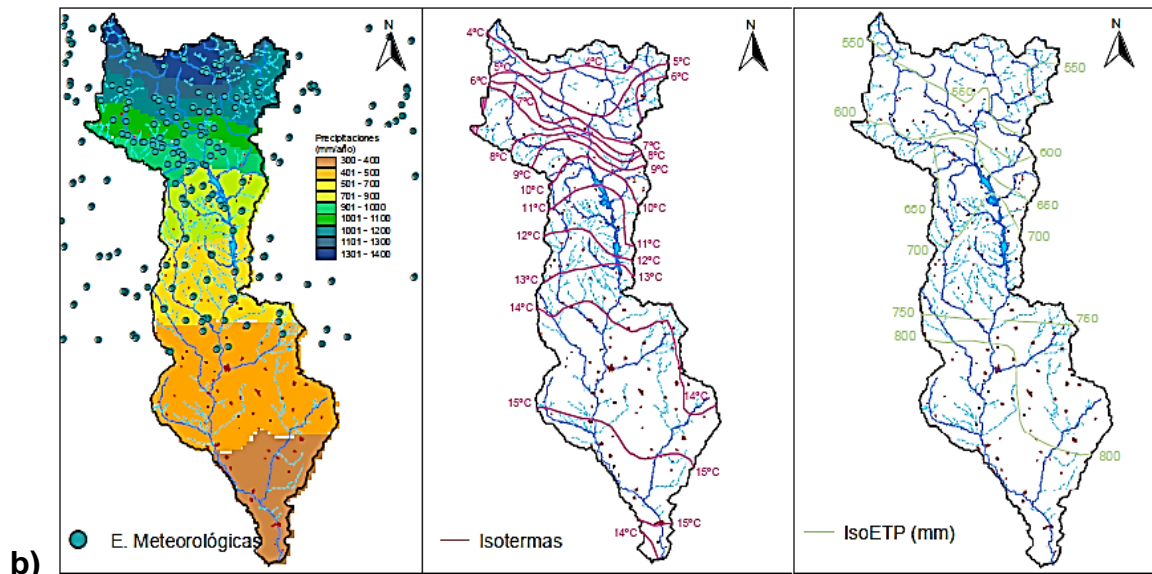
Su precipitación media anual es de 850 mm, teniendo un rango entre 1323 mm en la zona norte y 303 mm para la sur. En la zona norte de cabecera por los Pirineos se presenta precipitación en forma de nieve para las épocas más frías.

La temperatura media anual se encuentra entre 4 °C y 15 °C, para la zona de cabecera y desembocadura respectivamente, siendo los meses más cálidos julio y agosto, y los más fríos diciembre y enero.

En cuanto a la evapotranspiración, ésta tiene valores dentro del rango de 800 mm/año en su desagüe y 550 mm/año en cabecera. Al igual que sucede con el subsistema del río Gállego, al analizar a simple vista los valores medios de precipitación y evapotranspiración anual, se puede evidenciar un déficit hídrico desde la zona media del subsistema hacia el sur, y un excedente hídricos hacia el norte del mismo.

En la Figura 10 se presentan los valores medios de precipitación, temperatura y evapotranspiración para el subsistema del río Cinca. En la sección a) se representa para las cuencas de Flumen, Guatizalema y Alcanadre, mientras que en la b) para las del Vero y Cinca.





b)
Figura 10. Precipitación, temperatura y evapotranspiración del subsistema del río Cinca.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro, (2007b, 2008).

Desde la zona media del subsistema hacia el sur, es una región con gran producción agrícola, para lo cual del embalse de El Grado parte el canal del Cinca hasta Tardienta, donde se fusiona con el Canal de Monegros que viene del embalse de la Sotonera, con una demanda anual de 400 Hm³ para los regadíos de Monegros y del Cinca, así como otra parte de la demanda es suplida por el canal de Aragón y Cataluña el cual parte del embalse de Barasona ubicado sobre el río Ésera del sistema de explotación vecino Ésera y Noguera Ribagorzana por margen derecha.

Existen 5 principales embalses que se encuentran en la cuenca del río Cinca los cuales son el embalse de Santa María de Belsué, Montearagón, Vadiello, Mediano y el Grado, los cuales se mostraron ubicados en el sistema Gállego-Cinca en la Figura 6.

- **Embalse de Santa María de Belsué**

El embalse de Santa María de Belsué se localiza sobre el río Flumen afluente del río Alcanadre que desemboca en el río Cinca, al oeste de la provincia de Huesca, en el municipio de Nueno. Tiene una capacidad de 13 Hm³. Su principal uso es para regadíos. No se tendrá en cuenta para el análisis de la cuenca del río Cinca ya que los datos de este embalse son nulos y/o muy pocos.

- **Embalse de Montearagón**

El embalse de Montearagón se localiza sobre el río Flumen afluente del río Alcanadre que desemboca en el río Cinca, al oeste de la provincia de Huesca, en los municipios de Huesca y Loporzano. Tiene una capacidad de 43.18 Hm³. Sus principales usos son para abastecimiento, regadíos y control de avenidas. Su inicio de operaciones fue en 2010 con lo cual no se tendrá en cuenta ya que el presente trabajo analiza hasta marzo de 2008.

- **Embalse de Vadiello**

El embalse de Vadiello se localiza sobre el río Guatizalema afluente del río Alcanadre que desemboca en el río Cinca, al oeste de la provincia de Huesca, en el municipio de Loporzano. Tiene una capacidad de 15.51 Hm³. Su principal uso es para abastecimiento, regadíos y usos recreativos.

- **Embalse de Mediano**

El embalse de Mediano se localiza sobre los ríos Cinca, Nata y Usía al norte de la provincia de Huesca, en los municipios de La Fueva y Aínsa-Sobrarbe. Tiene una capacidad de 434.63 Hm³, mantiene el nivel del embalse del El Grado y es el más grande de todo el sistema Gállego-Cinca. Sus principales usos son para regadíos, producción hidroeléctrica, usos recreativos y control de avenidas.

- **Embalse de El Grado**

El embalse de El Grado se localiza sobre el río Cinca, al norte de la provincia de Huesca, en los municipios de El Grado, Naval, Secastilla, La Fueva y Abizanda. Tiene una capacidad de 400 Hm³. Sus principales usos son para abastecimiento, regadíos, producción hidroeléctrica, usos recreativos y control de avenidas.

Del embalse de El Grado parte el canal del Cinca hasta Tardienta, donde se fusiona con el Canal de Monegros que viene del embalse de la Sotonera, con una demanda anual de 400 Hm³ para los regadíos de Monegros y del Cinca.



Embalse	Año de Construcción	Tipo	Altura (m)	Longitud de Coronación (m)	Superficie (Ha)	Volumen (Hm ³)	Cota Lámina de Agua (m)
Santa María de Belsué	1931	Gravedad	52.00	126.61	82.75	13.00	894.40
Montearagón	2006	Arco Gravedad	86.00	338.18	203.40	43.18	579.00
Vadiello	1971	Gravedad	76.50	128.80	68.81	15.51	746.00
Mediano	1959	Gravedad	92.00	500.00	1714.00	434.63	527.90
El Grado	1969	Gravedad	130.00	959.00	1298.00	400.00	450.04

Tabla 3. Embalses subsistema río Cinca.

Cabe destacar que todas las principales características y descripciones previas del subsistema del río Cinca fueron obtenidas tras la consulta de Confederación Hidrográfica del Ebro, (2007b, 2008, 2015).

4 METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS

La metodología a efectuar se basa en considerar toda la superficie del sistema de explotación Gállego-Cinca y realizar una modelación hidrológica a escala mensual de toda esta zona, para lo cual se utilizarán las subdivisiones previamente establecidas por la confederación hidrográfica del Ebro de estos dos subsistemas en fracciones más pequeñas denominadas subcuencas o unidades descargadas en formato shape, a las cuales se les realizará una modelación hidrológica por separado teniendo en cuenta los datos representativos mensuales para el centroide de cada una de ellas de temperatura, precipitación y evapotranspiración.

El modelo hidrológico empleado en este trabajo será el creado y establecido por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia denominado HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) (Bergström, 1976; Lindström et al., 1997), el cual posee una larga historia y que inicialmente fue desarrollado para los países nórdicos pero debido a su popularidad y buenos resultados se ha ido expandiendo por el mundo hasta ser aplicado en más de 30 países, ha sido elegido entre otros tantos modelos existentes debido a que no tiene gran cantidad de parámetros siendo así un modelo robusto y versátil haciéndolo cumplir con el principio de parsimonia.

El software que será utilizado es el desarrollado en conjunto por el Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) y la oficina de ingeniería HydroCosmos SA en colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL) denominado RS-Minerve (Routing System Minerve). Es un software libre, creado y distribuido gratuitamente desde 2011, siendo capaz de modelar redes hidráulicas e hidrológicas complejas siguiendo un planteamiento semi-distribuido conceptual y diseñado principalmente para la simulación de la formación y propagación de la escorrentía superficial, en la actualidad a pesar de no ser muy antiguo ya más de 10 países lo han utilizado en diferentes tipos proyectos. La versión tenida en cuenta es la 2.0.1.5.

A su vez para la modelación otro factor importante son las demandas de agua que se presenten en el sistema de explotación que puedan afectar el régimen natural, para lo cual se tendrá en cuenta el modelo de gestión de Aquatool previamente desarrollado por la confederación hidrográfica del Ebro de la zona, de donde se estimarán dichas demandas y se introducirán en el software RS-Minerve para que sean incluidas. El



software Aquatool es un sistema para la modelación de la gestión y planificación de sistemas de recursos hídricos (Paredes, 2004).

Luego para poder identificar y ajustar el modelo hidrológico HBV efectuado se realizarán las calibraciones del mismo en donde se deben ir variando y estimando los valores de los parámetros respectivos automáticamente para que los resultados generados del modelo entregados por RS-Minerve si se acoplen a la realidad mediante la comparación de la simulación con los registros reales de datos observados, éstos últimos son sacados de los datos históricos de las estaciones de aforo de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (R.O.E.A) presentes en el sistema de explotación. Cuando el modelo ya se encuentre calibrado el siguiente paso a efectuar es la validación del mismo, haciendo correrlo en un intervalo de tiempo futuro al de la calibración para así saber si el modelo hidrológico y su calibración son correctos, representando los datos reales de una manera adecuada, significando así que el modelo se puede utilizar en otros proyectos y/o con diferentes datos de entrada para así identificar como se comportarían las cuencas, subcuencas y todo el sistema de explotación en general en esos casos.

Cabe destacar que la calibración automática se realizará mediante el algoritmo SCE-UA (Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) el cual es un método de optimización global que encuentra el mejor conjunto de parámetros según una función objetivo determinada, la cual utiliza índices de eficiencia para estimar la efectividad de la calibración.

Posteriormente se realizará un análisis individual de cada una de las subcuencas y en sí de todo el sistema de explotación, teniendo en cuenta su caracterización y parametrizaciones obtenidas, logrando con esto estudiar y evaluar el comportamiento de los recursos hídricos, flujos superficiales, subsuperficiales, subterráneos e influencia de los embalses presentes en la zona de estudio.

Finalmente se realizarán varias comparaciones entre las aportaciones en régimen natural identificadas del modelo SIMPA registradas en el modelo de gestión de Aquatool con respecto a las generadas por el modelo HBV ya calibrado. La intención de realizar esta comparación es determinar la calidad de SIMPA debido a que es un modelo más general y el realizado en este trabajo con HBV tiene un nivel de detalle más elevado.

En la Figura 11 se presenta a modo de ejemplo, una secci3n del r3o Cinca del modelo de gesti3n de Aquatool para tener una mejor idea de d3nde se tomaban los datos de demandas y retornos, as3 como las aportaciones naturales del modelo SIMPA:

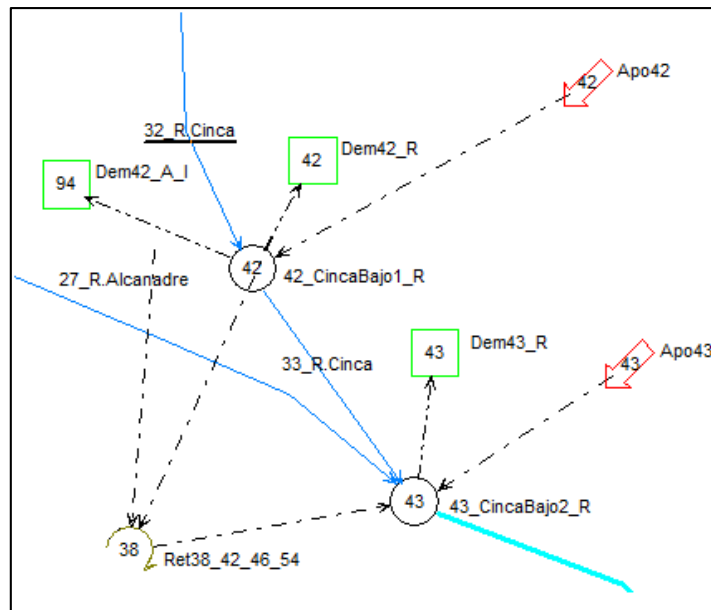


Figura 11. Esquema de ejemplo Aquatool.

4.1 Software RS-Minerve

El software a utilizar es el RS-Minerve (Routing System Minerve) desarrollado en conjunto por el Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) y la oficina de ingenier3a HydroCosmos SA junto con la colaboraci3n de la Universidad Polit3cnica de Valencia (UPV) y la Escuela Polit3cnica Federal de Lausana (EPFL), creado y distribuido gratuitamente desde 2011, ha sido utilizado para diferentes estudios en varios pa3ses como Per3, Espa3a, Francia, Suiza, Uganda, Corea del Sur, Inglaterra, Brasil, T3nez y Nepal, y est3 basado en el mismo concepto que el Routing System II, el cual es un modelo previo tambi3n desarrollado por la EPFL (Dubois et al., 2000, Garc3a Hern3ndez et al., 2007).

RS Minerve es un programa para la simulaci3n de la formaci3n y propagaci3n de la escorrent3a superficial. Este modela redes hidr3ulicas e hidrol3gicas complejas de acuerdo a un esquema semidistribuido conceptual. Tiene en cuenta procesos hidrol3gicos comunes tales como fusi3n de nieve, fusi3n glaci3r, escorrent3a superficial y subterr3nea as3 como elementos de control hidr3ulicos como lo son compuertas, reservorios, aliviaderos, desviaciones, uniones, turbinas, bombas e hidroel3ctricas.



Contiene variedad de diferentes modelos hidrológicos de simulación precipitación-escorrentía tales como GSM (Glacier and Snowmelt), SOCONT (Soil Contribution), SAC-SMA (Sacramento-Soil Moisture Account), GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) y HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning). Así como otras herramientas útiles donde se destacan el elemento de estación meteorológica en donde se ingresan datos como precipitación, temperatura, evapotranspiración, etc, el consuntivo donde se pueden definir ciertas demandas de agua específicas comunes como industriales, urbanas, agrarias, el hidroeléctrico donde se computa la altura de agua neta y las pérdidas de presión generando resultados de producción energético y la ganancia total teniendo en cuenta un precio de energía a establecer, el de eficiencia estructural en el que se calculan las pérdidas de carga en canales, tuberías, etc al considerar un coeficiente de eficiencia y por último el elemento fuente en donde se ingresan los datos de valores considerados reales y medidos para tomar como referencia que en este estudio serán los caudales de las estaciones de aforo.

Este software posee una sección avanzada llamada RS Expert creada especialmente para investigación o estudios complejos, permitiendo una evaluación en profundidad de los resultados hidrológicos e hidráulicos. Ésta sección se compone de 4 módulos:

El primer módulo el cual es el utilizado en este trabajo, es el de calibración automática en el que se puede elegir entre tres tipos de algoritmos los cuales calculan el mejor grupo de parámetros hidrológicos dependiendo de la función objetivo definida. El primero es el SCE-UA a describir en el numeral 4.3 ya que es el usado, el segundo el Uniforme Adaptativo de Monte Carlo (UAMC) que es una variación de la Cadena Adaptativa de Markov de Monte Carlo (Metropolis y Ulam, 1949) y el tercero es el Hipercubo Latino fusionado con Rosenbrock (CLHR) el cual es como su nombre lo indica la unión del algoritmo Hipercubo Latino (McKay y Beckman 1979) con el algoritmo de Rosenbrock (Rosenbrock, 1960).

El segundo módulo es el de simulación de escenarios en el que se presenta la posibilidad de simular múltiples escenarios climáticos o varios grupos de parámetros y condiciones iniciales para estudiar la variabilidad y sensibilidad de los resultados del modelo.

El tercer módulo es el de simulación en intervalos de tiempo el cual facilita el análisis de grandes grupos de datos sin sobrecargar la memoria del computador, en donde en

vez de utilizar toda la serie histórica de datos solo se utiliza una parte de ella la cual se considere más importante.

El cuarto módulo es la simulación estocástica que es capaz de generar un grupo de simulaciones basadas en diferentes parámetros o condiciones iniciales con valores ubicados en intervalos aleatorios que deben ser definidos.

Además presenta un elemento denominado comparador el cual contrasta los resultados de la simulación realizada con los datos reales ingresados en el elemento fuente, mediante 7 tipos de índices de eficiencia los cuales son el coeficiente de Nash, coeficiente de Nash para valores logarítmicos, coeficiente de correlación de Pearson, bias score, raíz relativa del error cuadrático medio (RRMSE), volumen relativo bias y el error pico normalizado (NPE).

En la Figura 12 se presenta la interfaz principal del software RS-Minerve, en donde se ha colocado el esquema simplificado a utilizar en este de estudio para una subcuenca, en el cual se aprecian los 4 elementos básicos y fundamentales que se necesitan, siendo la estación meteorológica, la subcuenca tipo HBV, la demanda, el comparador y la estación de aforo usar como fuente de datos de referencia.

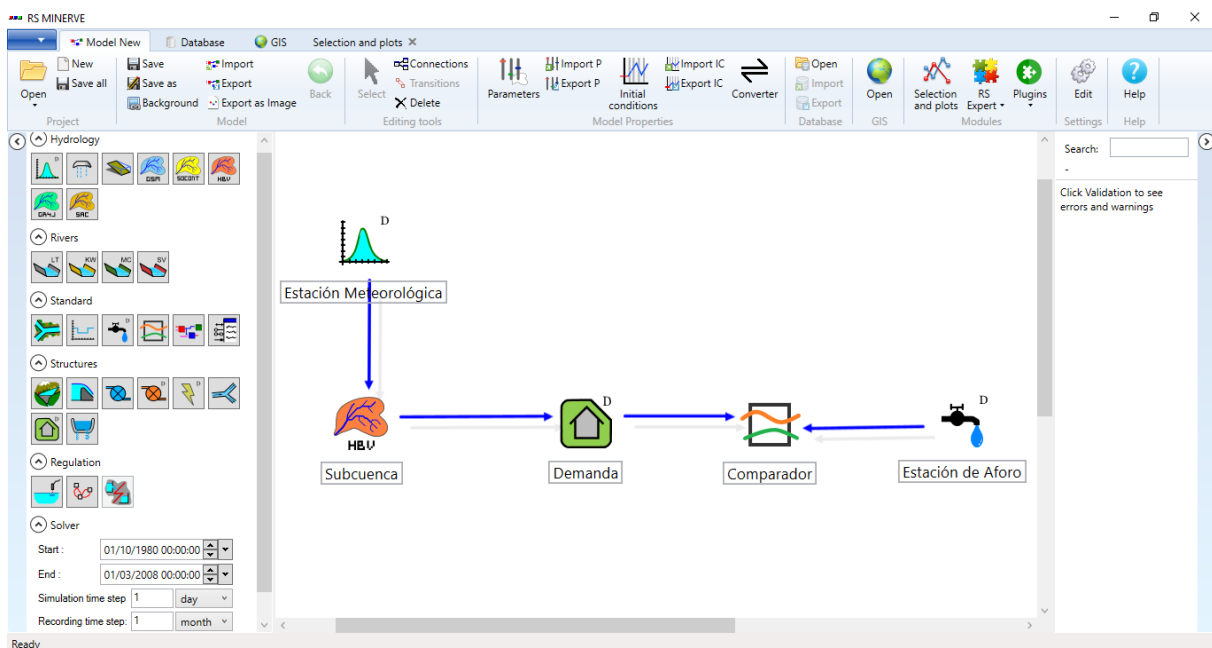


Figura 12. Interfaz RS-Minerve y esquema a utilizar.

4.2 Modelo HBV

El modelo hidrológico HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) es de gran tradición en países nórdicos, tiene una larga historia y ha sido aplicado en más de 30

países, su primera aplicación data de los primeros años de la década de los 70 (Bergström, 1976) desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia (SMHI) para simulación de escorrentía y predicción hidrológica, a su vez con el tiempo el modelo ha sido modificado y mejorado sin alterar demasiado el planteamiento original (Lindström et al., 1997). Posee un número no muy elevado de parámetros por lo que es favorable siendo así un modelo robusto y versátil.

Es de tipo semidistribuido conceptual, dispone de tres rutinas principales (rutina de nieve, rutina de la humedad del suelo y evapotranspiración, rutina de respuesta de la escorrentía) y simula la descarga, para determinado intervalo de tiempo, teniendo como datos de entrada las series de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial.

El modelo es representado mediante la concepción de una zona de procesos lluvia-nieve y tres tanques de almacenamiento, llamados tanque de humedad del suelo, tanque superior y tanque inferior como se muestra en la Figura 13.

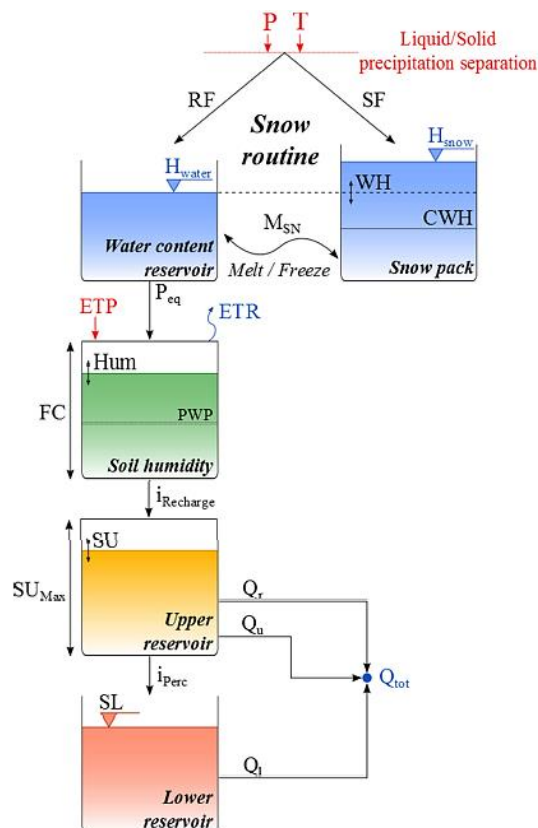


Figura 13. Modelo HBV.
Fuente: García Hernández et al., (2015).

A continuación se explica el modelo HBV teniendo en cuenta principalmente para su planteamiento el manual técnico del software RS-Minerve (García Hernández et al., 2015).

➤ Rutina de Nieve

La precipitación primero se divide entre lluvia o nieve en función de la temperatura, en donde si la temperatura observada es menor a $TT - TTInt/2$, sólo nieve es producida. Si la temperatura es mayor a $TT + TTInt/2$, sólo lluvia se produce. En cambio si la temperatura observada se encuentra entre ambos valores, se producen ambas, donde la precipitación es asumida como una mezcla entre lluvia y nieve:

$$RF = \alpha * P$$

$$SF = (1 - \alpha) * P$$

$$\alpha = 0 \quad \text{Si } T < TT - TTInt/2$$

$$\alpha = \frac{T - (TT - TTInt/2)}{TTInt} \quad \text{Si } TT - TTInt/2 < T < TT + TTInt/2$$

$$\alpha = 1 \quad \text{Si } T > TT + TTInt/2$$

Siendo:

RF: Lluvia, L/T

α : Factor de separación

P: Precipitación, L/T

SF: Nieve, L/T

T: Temperatura, °C

TT: Umbral de temperatura para lluvia/nieve, °C

TTInt: Intervalo de temperatura para mezcla de lluvia/nieve, °C

La nieve es usada como entrada para la capa de nieve, variando su contenido en función de la fusión o congelamiento, calculados con el método del grado-día de la siguiente manera:

$$M_{sn} = CF_{Max} * (T - TTSM) \quad \text{Si } T > TTSM \quad \text{Fusión}$$



$$M_{sn} = CFR * CF_{Max} * (T - TTSM) \quad \text{Si } T \leq TTSM \quad \text{Congelamiento}$$

$$dH_{snow}/dt = SF - M_{sn} \quad \text{Cambio en la altura de nieve}$$

$$M_{sn} \leq SF + H_{snow}/dt$$

$$M_{sn} \geq -H_{water}/dt$$

Siendo:

M_{sn} : Fusión de la nieve o congelamiento, L/T

CF_{Max} : Factor grado-día de fusión, L/T/°C

CFR : Factor de recongelamiento, adimensional, valor común 0.05

$TTSM$: Temperatura crítica de fusión de la nieve, °C, valor común 0

H_{snow} : Altura de nieve, L

H_{water} : Contenido de agua, L

dt : Intervalo de tiempo, T

La capa de nieve retiene agua fundida y precipitación hasta que excede una cierta fracción del contenido relativo de agua en la misma.

La precipitación equivalente (P_{eq}) se produce por el contenido relativo de agua en la nieve de la siguiente manera:

$$WH = H_{water}/H_{snow}$$

$$P_{eq} = RF + H_{water}/dt \quad \text{Si } H_{snow} = 0$$

$$P_{eq} = 0 \quad \text{Si } H_{snow} > 0 \text{ y } WH \leq CWH$$

$$P_{eq} = (WH - CWH) * H_{snow}/dt \quad \text{Si } H_{snow} > 0 \text{ y } WH > CWH$$

$$dH_{water}/dt = RF + M_{sn} - P_{eq} \quad \text{Cambio en el contenido de agua}$$

Siendo:

WH : Contenido relativo de agua en la capa de nieve, adimensional

CWH : Contenido relativo de agua crítico en la capa de nieve, adimensional, valor común 0.1

P_{eq} : Precipitación equivalente, L/T

➤ Rutina de la humedad del suelo y evapotranspiración

La precipitación equivalente de la cuenca se divide en dos elementos: el primero es el almacenamiento como humedad en el suelo disponible para evapotranspiración, el segundo es la infiltración que contribuye a la escorrentía subterránea y se estima teniendo en cuenta el contenido de humedad del suelo en el instante de la precipitación.

Para la infiltración se debe tener en cuenta la capacidad de campo que limita el contenido máximo de humedad en el suelo en la zona superficial, el parámetro adimensional beta (β) modifica el porcentaje de filtración para el mismo grado de humedad relativa en el suelo.

La evapotranspiración real se calcula teniendo en cuenta la humedad del suelo y la evapotranspiración potencial. La evapotranspiración real será menor o igual a la potencial dependiendo del punto de marchitez del suelo.

El punto de marchitez es el límite de humedad del suelo por debajo del cual la evapotranspiración real es menor que la potencial, causando una disminución en el desarrollo de las plantas. Cabe destacar que debe ser menor a la capacidad de campo.

$$i_{Recharge} = \frac{Hum^{Beta}}{FC} * P_{eq}$$

$$ETR = ETP * \frac{Hum}{PWP} \quad Si \ Hum < PWP$$

$$ETR = ETP \quad Si \ Hum \geq PWP$$

$$dHum/dt = (P_{eq} - i_{Recharge}) - ETR \quad \text{Cambio en la humedad del suelo}$$

$$Hum \geq 0$$

$$PWP < FC$$

Siendo:

$i_{Recharge}$: Intensidad de recarga del tanque o infiltración, L/T

Hum : Humedad del suelo, L



FC: Capacidad de campo, L

Beta: Parámetro del modelo, coeficiente de forma, adimensional

P_{eq} : Precipitación equivalente, L/T

ETR: Evapotranspiración real, L/T

ETP: Evapotranspiración potencial, L/T

PWP: Punto de marchitez del suelo, L

➤ Rutina de respuesta de la escorrentía

El flujo superficial o escorrentía es calculado dependiendo del nivel de agua en el tanque superior y su límite, así como de un coeficiente de flujo superficial.

$$Q_r = K_r * (SU - SU_{Max}) * A \quad Si \ SU > \ SU_{Max}$$

$$Q_r = 0 \quad Si \ SU \leq \ SU_{Max}$$

Siendo:

Q_r : Flujo superficial o escorrentía, L³/T

K_r : Coeficiente de flujo superficial, 1/T

SU: Nivel de agua del tanque superior, L

SU_{Max} : Límite de agua del tanque superior, L

A: Área de la Cuenca, L²

El interflujo también es generado por el tanque superior, teniendo en cuenta el nivel de agua en éste y un coeficiente de interflujo. A su vez de este tanque produce una descarga por percolación hacia el tanque inferior o profundo.

$$Q_U = K_u * SU * A$$

$$i_{perc} = K_{perc} * SU$$

$$dSU/dt = i_{Recharge} - (K_{perc} + K_u) * SU - Q_r/A \quad \text{Cambio de almacenamiento en el tanque superior}$$

$$SU \geq 0$$



El balance anterior podría resultar negativo si la suma de $K_r + K_u + K_{perc}$ es superior a la unidad con lo cual se debe tener en cuenta este detalle.

Siendo:

Q_u : Interflujo, L^3/T

K_u : Coeficiente de interflujo, $1/T$

i_{perc} : Intensidad de percolación, L/T

K_{perc} : Coeficiente de percolación, $1/T$

Para la determinación del flujo base o escorrentía subterránea se utiliza el agua percolada que se presenta en el tanque inferior.

$$Q_l = K_l * SL * A$$

$$dSL/dt = i_{perc} - K_l * SL$$

Cambio de almacenamiento en
el tanque inferior

$$SL \geq 0$$

Siendo:

Q_l : Flujo base o escorrentía subterránea, L^3/T

K_l : Coeficiente de flujo base, $1/T$

SL : Nivel de agua del tanque inferior, L

Como el flujo base suele ser más lento que el interflujo, K_l debería ser menor que K_u , así como éste debería ser menor a K_r .

Con lo que el flujo total de salida o aportación total es calculado mediante la suma de los 3 flujos anteriores:

$$Q_{tot} = Q_r + Q_u + Q_l$$

Siendo:

Q_{tot} : Flujo total de salida, L^3/T

Como resumen se presentan a continuación en la Tabla 4 las condiciones iniciales y los parámetros del modelo con las unidades en sistema internacional.

Nombre	Unidad	Descripción
Hsnowini	m	Altura de nieve inicial
WHini	adim	Contenido relativo de agua inicial en la capa de nieve
HIini	m	Humedad inicial
SUIni	m	Nivel de agua inicial del tanque superior
SLini	m	Nivel de agua inicial del tanque inferior
A	m ²	Área de la cuenca
CFMax	mm/°C/d	Factor grado-día de fusión
CFR	adim	Factor de recongelamiento
CWH	adim	Contenido relativo de agua crítico en la capa de nieve
TT	°C	Umbral de temperatura para lluvia/nieve
TTInt	°C	Intervalo de temperatura para mezcla de lluvia/nieve
TTSM	°C	Temperatura crítica de fusión o de la nieve
Beta	adim	Parámetro del modelo
FC	m	Capacidad de campo
PWP	m	Punto de marchitez del suelo
SUMax	m	Límite de agua del tanque superior
Kr	1/d	Coefficiente de flujo superficial
Ku	1/d	Coefficiente de interflujo
Kl	1/d	Coefficiente de flujo base
Kperc	1/d	Coefficiente de percolación

Tabla 4. Condiciones iniciales y parámetros modelo HBV.

4.3 Algoritmo de calibración SCE-UA

Los algoritmos de calibración son métodos que ayudan a mejorar y perfeccionar los parámetros de los modelos, mediante el uso de diferentes metodologías de búsqueda como directa, por gradiente, aleatoria, algoritmos de inicio múltiple o mezcla de grupos, ejemplos de ellos lo son el algoritmo de Hookes & Jeeves, Rosenbrock, Simplex y uno de los más completos y conocidos el SCE-UA aquí tratado.

El algoritmo de calibración SCE-UA (Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) es un método de optimización global desarrollado en la Universidad de Arizona en 1992 (Duan et al., 1992, 1993, 1994) robusto, flexible y eficiente para la calibración de modelos precipitación-escorrentía. Fue diseñado específicamente para lidiar con las peculiaridades encontradas en la calibración de modelos conceptuales de cuencas y puede ser utilizado para manejar problemas de optimización no lineal con elevados parámetros (Duan et al., 1994). El objetivo es encontrar el mejor conjunto de parámetros para la función objetivo en el espacio factible, iniciando con una muestra aleatoria de puntos distribuidos por todo ese espacio y usa una adaptación del esquema de búsqueda del Simplex Downhill (Nelder y Mead, 1965) llamado CCE (Competitive Complex Evolution) para evolucionar continuamente la población hacia mejores soluciones en el espacio de búsqueda, renunciando progresivamente a la ocupación de regiones con una menor probabilidad (Mariani y dos Santos Coelho., 2011).

Parte de diferentes puntos de búsqueda (individuos) que se organizan por equipos (complex). De esta manera, la búsqueda de la solución global óptima se plantea como un proceso evolutivo (evolution) basado en tres pasos, la reflexión, contracción y mutación, existiendo además mezcla de equipos (shuffled) (Lerma, 2013).

Una descripción general del método se presenta a continuación y en la Figura 14:

1. Generar una muestra

Se genera una población de muestra con NPT (número de puntos en la población de la muestra) puntos en el espacio de parámetros factibles y se calcula la función objetivo en cada punto.

2. Clasificación de los puntos

Se ordenan los puntos NPT crecientemente con el fin de aumentar la función objetivo, con lo que el primer punto tiene la menor función objetivo y el último la mayor.

3. División en grupos

Se dividen los puntos NPT en NGS (número de grupos en una muestra de población) grupos, donde cada uno contiene NPG (número de puntos en cada grupo) puntos. Los grupos se dividen de tal manera de que el primer grupo contiene los puntos que se encuentran las posiciones $NGS^* (k-1)+1$, el segundo grupo contiene todos los que se encuentran en $NGS^* (k-1)+2$, y así sucesivamente, donde $k = 1, 2, \dots, NPG$.

4. Evolución de cada grupo

Cada grupo evoluciona de forma independiente tomando NSPL (número de etapas de evolución permitido para cada grupo) etapas de evolución, de acuerdo al algoritmo CCE (Competitive Complex Evolution) basándose en la reflexión, contracción y mutación (Duan et al., 1994):

- a) Construir un subgrupo de forma aleatoria, seleccionando NPS puntos de una distribución de probabilidad trapezoidal. El mejor punto (con el mayor valor de la función objetivo) tiene la mayor oportunidad de ser elegido para formar un subgrupo y el peor punto tiene una probabilidad menor.
- b) Identificar el peor punto del subgrupo y calcular el centroide del subgrupo sin incluir el punto peor.

c) Reflexión: Intentar reflejar el peor punto a través del centroide. Si el nuevo punto generado está dentro del espacio factible, ir al paso d), de lo contrario ir al paso f).

d) Si el nuevo punto generado es mejor que el peor punto, reemplazar el peor punto con nuevo punto e ir al paso g), de lo contrario ir al paso e).

e) Contracción: Intentar un paso de contracción calculando un punto a medio camino entre el centroide y el peor punto. Si el punto de contracción es mejor que el peor punto, reemplazar el peor punto por el de contracción e ir al paso g), de lo contrario ir al paso f).

f) Mutación: Generar aleatoriamente un punto dentro del espacio factible. Reemplazar el peor punto por el punto aleatoriamente generado.

g) Repita los pasos b)-f) α veces, donde $\alpha \geq 1$ es el número de descendientes o nuevos puntos generados por el mismo subgrupo.

h) Repita los pasos a)-g) NSPL veces, donde $NSPL \geq 1$.

5. Mezcla de grupos

Se combinan los puntos de los grupos evolucionados en una sola muestra de población, ordenar la población en orden creciente según la función objetivo y volver a hacer la mezcla en grupos NGS de acuerdo al procedimiento del paso 3.

6. Comprobación de la convergencia

Si se satisfacen los criterios previamente establecidos de convergencia se puede parar, de lo contrario seguir.

Existen tres criterios de convergencia:

- El máximo número de iteraciones definidas, MAXM.
- El número de bucles de mezcla KSTOP en el cual la función objetivo debe cambiar en un cierto porcentaje PCENTO antes de que la optimización termine.
- El valor de la función objetivo se estanque y no mejore en un cierto porcentaje.
- El parámetro PEPS el cual proporciona un indicador si la convergencia del parámetro es alcanzada, comparando el valor de PEPS con la media geométrica normalizada del rango de los parámetros.

7. Comprobación de la reducción del número de grupos

Si MINGS (número mínimo requerido de grupos) es menor que NGS, se elimina el grupo con el rango más bajo en sus puntos, se establece $NGS = NGS - 1$ y $NPT = NGS * NPG$, y se regresa al paso 4. Si $MINGS = NGS$, se regresa al paso 4.

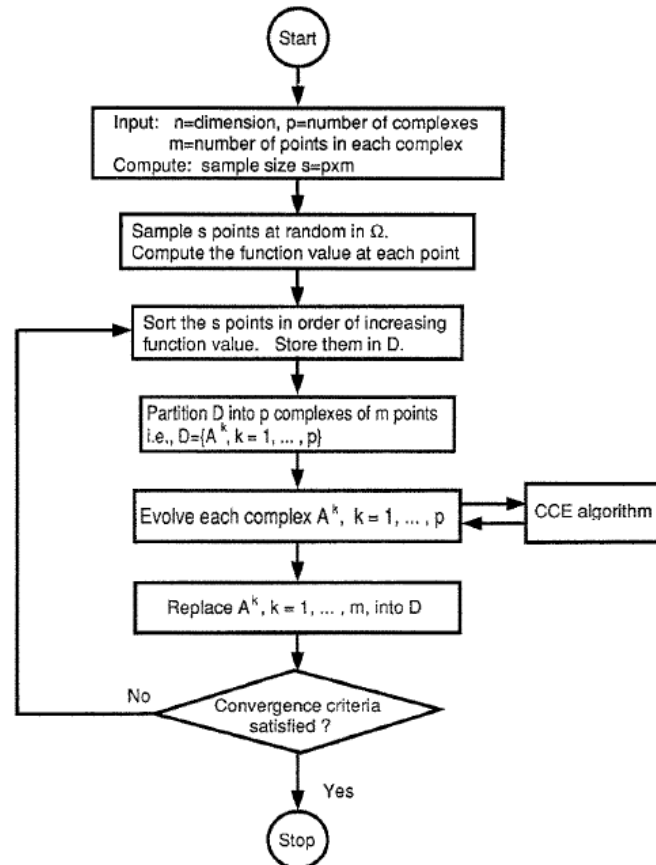


Figura 14. Descripción del método SCE-UA.

Con $V=n$, $NGS=p$, $NPG=m$ y $NPT=s$

Fuente: Duan et al., (1993) y García Hernández, (2015).

En la Figura 15 se muestra gráficamente un ejemplo del proceso del método SCE-UA. Se tiene una población de muestra, conteniendo $NPT=10$ puntos, divididos en $NGS=2$ grupos, cada grupo contiene $NPG=5$ puntos que están marcados por (•) y (*) respectivamente presentados en la Figura 15a. Cada grupo lleva un proceso independiente de evolución mostrado en la Figura 15b de acuerdo al algoritmo CCE donde el grupo marcado con (*) converge hacia el óptimo local ubicado en (1,2) y el grupo marcado con (•) converge hacia el óptimo global ubicado en (4,2). Posteriormente se mezclan los puntos en dos nuevos grupos (•) y (*) y quedan como en la Figura 15c, para luego volver a evolucionar cada grupo independientemente y finalizar como se muestra en la Figura 15d en donde ambos han convergido hacia el óptimo global ubicado en (4,2).

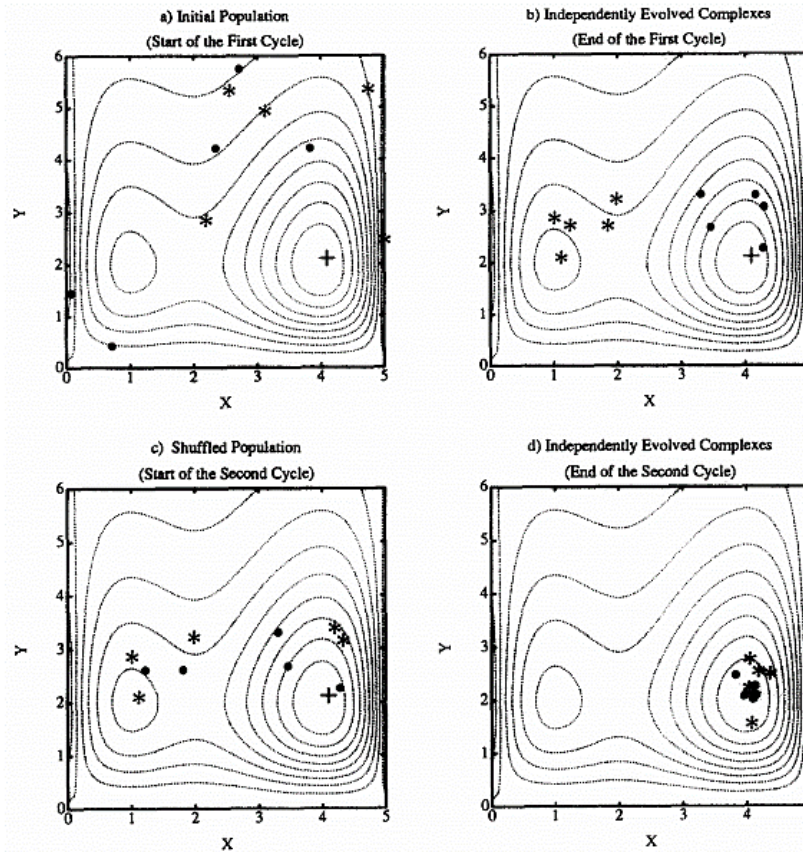


Figura 15. Ejemplo gráfico método SCE-UA.
Fuente: Duan et al., (1994).

En la Figura 16 se muestra gráficamente el algoritmo CCE de evolución individual para un grupo. En donde se presenta parte de la evolución del grupo identificado con (•) de la Figura 15 anterior teniendo subgrupos con NPS=3 puntos y $\alpha=1$ descendiente o nuevo punto generado identificado con (*). Hay tres etapas de evolución siendo reflexión, contracción y mutación.

Las Figura 16a, b y d se ilustran la etapa de reflexión, en las que se refleja el peor punto del subgrupo a través del centroide de los otros puntos. Si el punto reflejado es mejor que el peor punto, el peor punto se descarta y se reemplaza por el nuevo punto.

En la Figura 16c el nuevo punto es generado por la etapa de contracción (el nuevo punto se encuentra a medio camino entre el peor punto y el centroide de los otros puntos), después de rechazar una etapa de reflexión por no mejorar la función objetivo.

En la Figura 16e se genera la mutación, eligiendo aleatoriamente un punto un punto dentro del espacio factible para reemplazar el peor punto del subgrupo. Esto se hace

después de una etapa de reflexión, en la que el punto generado está fuera del espacio factible.

La Figura 16f muestra el grupo final después de NSPL=5 etapas de evolución.

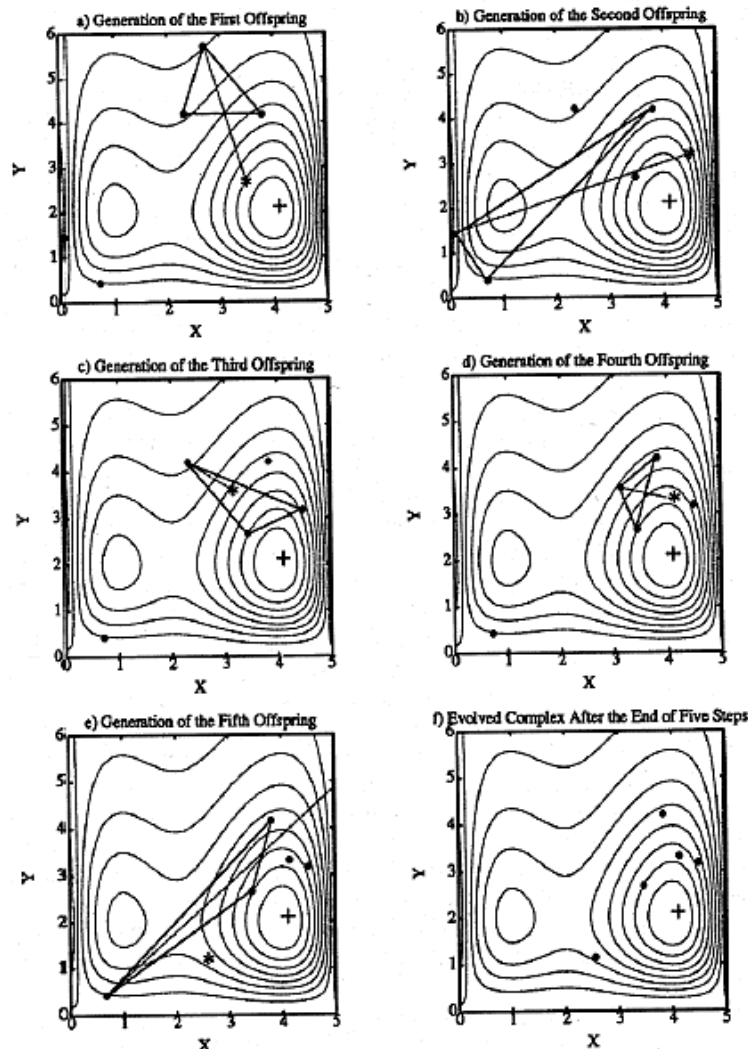


Figura 16. Ejemplo gráfico de evolución para un grupo. Algoritmo CCE.
Fuente: Duan et al., (1994).

Según Duan et al., (1994) los componentes del modelo recomiendan los siguientes valores:

- $NPG = 2n+1$, siendo n el número de parámetros a optimizar.
- $NPS \approx n+1$
- $\alpha = 1$
- $NSPL = NPG$
- $MINGS = NGS$
- $NPT = NGS * NPG$



Diferentes par3metros deben ser introducidos (Tabla 5), mientras que otros son calculados directamente por el proceso mismo.

Nombre	Unidad	Descripci3n
MAXM	adim	M3ximo n3mero de iteraciones
NGS	adim	N3mero de grupos
KSTOP	adim	N3mero de bucles de mezcla
PCENTO	adim	Valor de criterio en los bucles de mezcla
PEPS	adim	Par3metro de convergencia
SEED	adim	Valor seed

Tabla 5. Par3metros algoritmo de calibraci3n SCE-UA.

5 APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO

5.1 Particularización de la metodología al caso de estudio

5.1.1 Función objetivo e índices de eficiencia

La función objetivo es utilizada para evaluar los resultados de las simulaciones hidrológicas por medio de índices de eficiencia.

Muchos hidrólogos llegan a la misma conclusión en la que la función objetivo debe depender del objetivo de la modelación, ya que muchos índices de eficiencia están a favor de diferentes comportamientos y componentes hidrológicos (Cheng, 2015).

Es decir que sería mejor combinar los índices de eficiencia utilizando una optimización multiobjetivo para calibrar el modelo hidrológico, ya que no se sabe a ciencia cierta que índice sea el más apropiado para nuestro estudio y una sola medida de bondad de ajuste puede ser inapropiado (Legates y McCabe, 1999).

Con lo cual para este trabajo se utilizará la combinación de 4 índices de eficiencia (los cuales se explicarán posteriormente), para así garantizar un mejor ajuste y no asignarle una mayor o menor importancia a algunos comportamientos como los flujos altos, bajos, linealidad de series, etc, asignándoles el mismo peso a cada índice es decir un 25% para lograr una media ponderada de la siguiente manera:

$$FO = (Nash * 0.25) + (Nashln * 0.25) + (Pearson * 0.25) + (BS * 0.25)$$

Siendo:

FO: Función objetivo

Nash: Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe

Nash-ln: Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe para valores logarítmicos

Pearson: Coeficiente de correlación de Pearson

BS: Bias Score

Para clasificar y decidir si una calibración y/o validación es buena o no, tiende a ser muy subjetivo y se definen por ciertos rangos de evaluación, diferentes autores plantean numerosas clasificaciones siendo muy diversas pero en sí parecidas unas de otras, se tuvo en cuenta varias de ellas provenientes de Van Dijk et al (2008) y

Moriasi et al (2007) para dar lugar a la Tabla 6 tanto para la función objetivo como para cada índice de eficiencia individual:

CALIBRACIÓN	VALIDACIÓN	RESULTADO
0.00-0.29	0.00-0.19	Malo
0.30-0.49	0.20-0.39	Regular
0.50-0.69	0.40-0.59	Aceptable
0.70-0.90	0.60-0.80	Bueno
0.91-0.95	0.81-0.90	Muy Bueno
0.96-1.00	0.90-1.00	Excelente

Tabla 6. Rangos de evaluación para calibración y validación.

La evaluación del comportamiento y desempeño de un modelo hidrológico es comúnmente realizado a través de comparaciones entre los flujos simulados y observados, mediante índices de eficiencia los cuales son comúnmente utilizados para establecer una evaluación objetiva de su cercanía.

Los índices de eficiencia son medidas matemáticas de lo bien que una simulación del modelo se ajusta a las observaciones disponibles (Beven, 2001), para así evaluar la precisión de la simulación por la medio de las diferencias entre lo predicho y los valores observados.

Existen varias razones para las cuales se necesita evaluar el rendimiento del modelo como lo son proporcionar un estimado cuantitativo de la habilidad el modelo para reproducir los comportamientos de la cuenca históricos y futuros, así como comparar el modelo actual con otros resultados de estudios anteriores.

Así como lo anterior, Krause et al (2005) enuncia que el enfoque más fundamental para evaluar el rendimiento del modelo en términos de comportamiento es por medio de la inspección visual de los hidrogramas observados y los simulados, sin embargo para una evaluación más objetiva y eficaz, generalmente se requiere el uso de estimados matemáticos del error entre las series.

Existe gran variedad de índices de eficiencia para distintos usos en general, se han seleccionado 4 los cuales suelen ser lo más utilizados y populares para la modelación hidrológica:

5.1.1.1 Nash

El criterio Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970) es usado para evaluar la capacidad predictiva de los modelos hidrológicos, de la siguiente manera:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=ti}^{tf} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}{\sum_{t=ti}^{tf} (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref,t})^2}$$

Siendo:

Nash: Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe, adimensional

$Q_{sim,t}$: Descarga simulada en el tiempo t, L³/T

$Q_{ref,t}$: Descarga observada en el tiempo t, L³/T

$\bar{Q}_{ref,t}$: Descarga observada promedio para el período considerado t, L³/T

Este coeficiente varía entre $-\infty$ y 1, donde entre más cerca la eficiencia del modelo esté a 1 más preciso es y tiene mejor desempeño (Aghakouchak y Habib, 2010). A su vez sirve para analizar los flujos altos o picos (Wang et al., 2011).

5.1.1.2 Coeficiente de Nash para valores logarítmicos

El coeficiente Nash-Sutcliffe para valores logarítmicos es utilizado para evaluar el desempeño de los modelos hidrológicos para flujos bajos (Krause et al., 2005):

$$Nash\text{-}ln = 1 - \frac{\sum_{t=ti}^{tf} (\ln(Q_{sim,t}) - \ln(Q_{ref,t}))^2}{\sum_{t=ti}^{tf} (\ln(Q_{ref,t}) - \ln(\bar{Q}_{ref,t}))^2}$$

Siendo:

Nash-ln: Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe para valores logarítmicos, adimensional

Este coeficiente varía entre $-\infty$ y 1, con 1 representando el mejor desempeño del modelo.

5.1.1.3 Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson proporciona una medida de asociación lineal entre la simulación y las observaciones correspondientes, midiendo la covarianza entre estas sin penalizar por sesgo:

$$Pearson = \frac{\sum_{t=ti}^{tf} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim}) * (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})}{\sqrt{\sum_{t=ti}^{tf} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim})^2 * \sum_{t=ti}^{tf} (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})^2}}$$

Siendo:

Pearson: Coeficiente de correlación de Pearson, adimensional

$\bar{Q}_{sim,t}$: Descarga simulada promedio para el período considerado t, L³/T

Presenta un rango entre -1 y 1, donde un valor de 1 implica un acuerdo perfecto lineal entre las descargas simuladas y observadas, mientras que un valor de 0 indica un acuerdo débil o no lineal entre éstas (Aghakouchak y Habib, 2010).

5.1.1.4 Bias-Score

El Bias score es una estimación simétrica del ajuste entre la media de la simulación y la media de la observación (Wang et al., 2011):

$$BS = 1 - \left[\max \left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{ref}}, \frac{\bar{Q}_{ref}}{\bar{Q}_{sim}} \right) - 1 \right]^2$$

Siendo:

BS: Bias Score, adimensional

Este índice de eficiencia tiene un rango entre 0 y 1, en donde el mejor desempeño del modelo se presenta al obtener un resultado de 1.

5.1.2 Resumen de las calibraciones llevadas a cabo

Primero que todo hay que mencionar que el período seleccionado para la mayoría de las modelaciones a realizar es el de 1980 hasta 2008 (de aquí en adelante período base) debido a que es un período considerable con buena cantidad de años suficientes para realizar los procesos de calentamiento, calibración y validación, sin embargo debido a la disponibilidad de datos en algunas zonas este período tuvo que ser cambiado en esos lugares a 1965 hasta 1993 el cual tiene la misma cantidad de años que el período base para mantener así un balance entre los mismos.

También cabe destacar que a partir de los años ochenta se presentó el llamado efecto ochentas en el cual se registraron menos precipitaciones, causando una disminución relativa de los caudales a nivel de España, así que es más confiable hacer un análisis en lo posible de cómo están las condiciones actualmente es decir no tomar en cuenta los datos registrados en las estaciones de aforo previos a 1980, siempre que se pueda.

Para el modelo HBV manejado en este estudio se utilizó en general un período de tres años de calentamiento cuando había un suficiente período con datos y en caso contrario uno o dos años, en cuanto a la calibración se manejó en común un período de diecisiete años cuando había un período con suficientes datos y cuando no de entre ocho a cinco años dependiendo el caso, por último se utilizó en general un período de ocho años de validación cuando se presentaba que el período seleccionado tuviera buenos datos y en caso diferente de entre cinco a un año y medio según la subcuenca.

5.2 Estaciones de aforo y datos meteorológicos

Los principales datos de entrada o inputs que se requieren en un modelo de precipitación-escorrentía son aquellos que repercuten en el comportamiento del agua en la cuenca haciendo que se genere una respuesta hídrica por parte de ella ya sea instantánea o acumulativa a través del tiempo, siendo así la precipitación, temperatura y evapotranspiración los factores más importantes y decisivos al momento de poder representar los movimientos e interacciones que el agua pueda ir produciendo en el medio.

Además para poder realizar la etapa de calibración y validación en donde se corrobora si el modelo hidrológico utilizado es correcto o no, se deben tener registros observados con los que se efectúen comprobaciones de que tan bien la simulación entregada por el modelo representa a la realidad, para lo cual se debe realizar una búsqueda de las estaciones de aforo que se encuentren en la zona de estudio.

Es de importante mención que una alteración de la temperatura y de la precipitación por ejemplo a causa del cambio climático repercutiría directamente sobre los recursos hídricos de un territorio, además según los estudios realizados por la organización encargada del estudio del cambio climático IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) la cual a través de sus informes e incluso en el quinto informe AR5 (IPCC, 2014) el cual es el más reciente, muestra para todos los escenarios climatológicos de emisiones de gases efecto invernadero donde los principales de mejor a peor son los RCP2.6, RCP6.0 y RCP8.5 indican que la temperatura media en superficie continuará aumentando durante el siglo XXI, en cuanto a los cambios en las precipitaciones se da una no uniformidad, aumentando o disminuyendo según la ubicación de la zona



respectiva, pero en sí centrándonos en España las precipitaciones medias se verán disminuidas con lo cual se puede dar una reducción de los recursos hídricos a futuro.

5.2.1 Estaciones de aforo

De la página web de la Confederación Hidrográfica del Ebro se descargaron los archivos en formato shape tanto de las subcuencas o unidades y de las estaciones de aforo pertenecientes a la Red Oficial de Estaciones de Aforo (R.O.E.A) que están situadas en la confederación, se identificaron aquellas presentes en el sistema Gállego-Cinca. Posteriormente se descargaron las series históricas mensuales del Sistema de Información del Anuario de Aforos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) para aquellas estaciones que estuvieran situadas en la desembocadura de cada una de las subcuencas o unidades, a su vez se revisaron los datos existentes de estas para comprobar su estado, es decir si había una buena serie histórica y de buena calidad, ya que se presentaban casos en los que las estaciones eran muy recientes, tenían gran cantidad de años sin registros, los datos no tenían coherencia, etc.

Cabe destacar que debido a que varias unidades no tenían estación de aforo en su desembocadura se tuvieron que fusionar algunas de ellas para poder posteriormente hacer la modelación hidrológica, lo cual permite un mejor ajuste y también una disminución en la carga de trabajo para continuar con más fluidez y más de prisa, con lo cual se identificaron finalmente 29 subcuencas a analizar las cuales son las siguientes mostradas en la Figura 17 y Tabla 7:

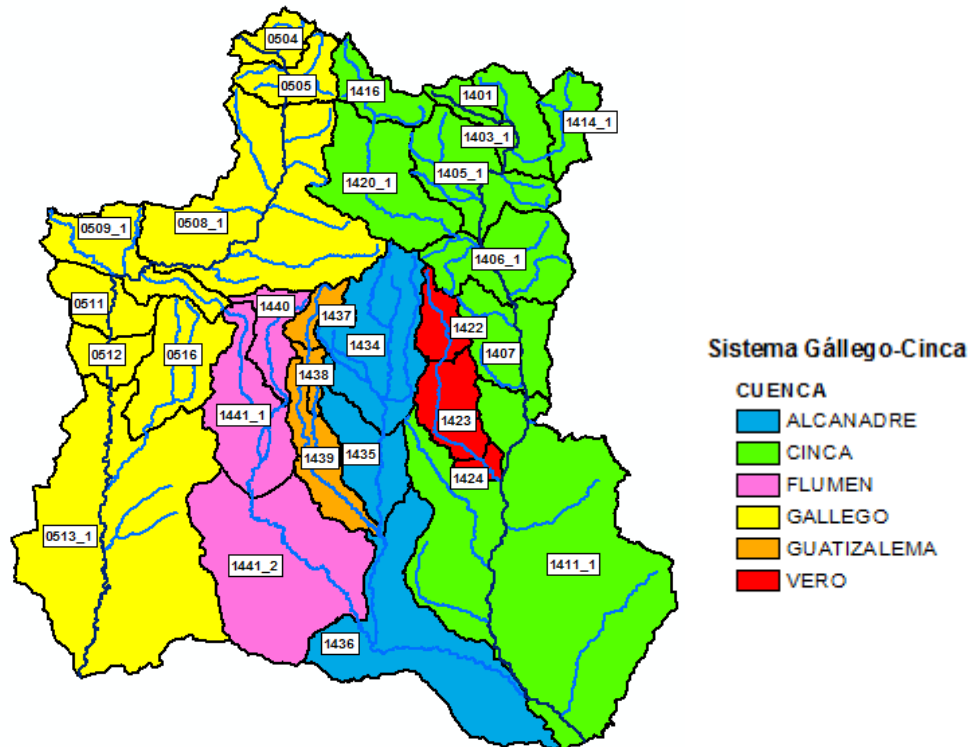


Figura 17. Subcuencas del sistema Gállego-Cinca.
Fuente: Elaboración Propia.

SUBCUENCA	Área (Km ²)	SUBCUENCA	Área (Km ²)
0504	117	1416	180
0505	174	1420_1	446
0508_1	1100	1422	110
0509_1	315	1423	235
0511	195	1424	45
0512	147	1434	501
0513_1	1631	1435	264
0516	329	1436	764
1401	73	1437	90
1403_1	223	1438	45
1405_1	382	1439	227
1406_1	376	1440	160
1407	300	1441_1	374
1411_1	2163	1441_2	965
1414_1	157	TOTAL	12088

Tabla 7. Áreas de las subcuencas del sistema Gállego-Cinca.

Las estaciones seleccionadas fueron en su mayoría aquellas que tuvieran buenos datos en el período base de modelación previamente estipulado (1980-2008), en el mejor de los casos todo el registro completo, sin embargo en algunas estaciones no lo está por ejemplo tienen algunos años sin datos, o la estación entró en funcionamiento después de 1980, éstas se tomaron en cuenta ya que no habían estaciones cercanas para utilizar. También en algunas zonas, más específicamente en la parte superior de la cuenca del río Cinca, varias de las estaciones de aforo ya

no se encuentran en operación, con lo que se tuvo que obligatoriamente tener en cuenta los registros previos a su cierre de operaciones que casualmente en todas estas se daba en el año 1993.

Con lo cual finalmente tras la identificación de las estaciones de aforo y sus datos quedaron seleccionadas las siguientes mostradas en la Figura 18 y en la Tabla 8 donde se muestran las principales características de cada una de las estaciones de aforo a utilizar diferenciadas por los subsistemas internos del sistema de explotación Gállego-Cinca como lo son su ubicación, código, nombre y período con datos, una descripción más detallada así como la representación gráfica de sus series históricas se presentan en el Anejo 8.1 Estaciones de aforo.

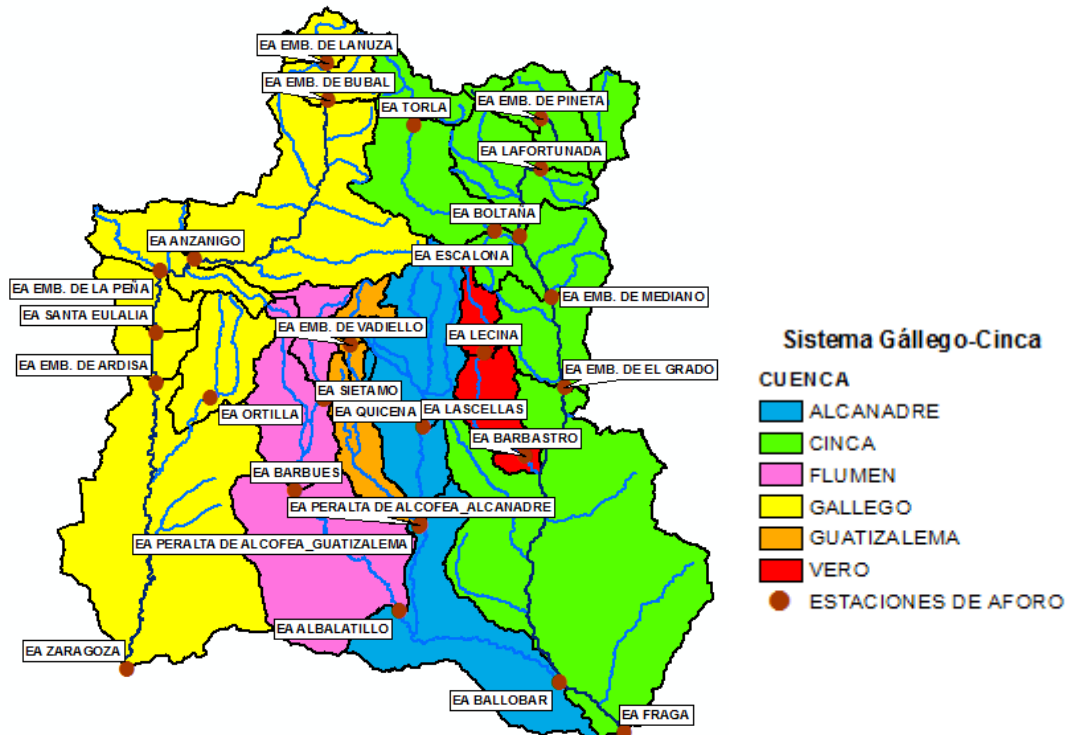


Figura 18. Estaciones de aforo sistema Gállego-Cinca.

Fuente: Elaboración Propia.

Estaciones de Aforo		
Subsistema del río Gállego		
Código	Nombre	Período con Datos
9840	Embalse de Lanuza	1982-2011
9835	Embalse de Búbal	1970-2011
9123	Anzanigo	1949-2011
9836	Embalse de La Peña	1945-2011
9059	Santa Eulalia	1934-2011
9837	Embalse de Ardisa	1945-2009
9838	Embalse de La Sotonera	1944-2011
9255	Ortilla	1992-2011
9089	Zaragoza	1973-2006
Subsistema del río Cinca		
Código	Nombre	Período con Datos
9190	Quicena	1978-2011
9191	Barbués	1978-2011
9094	Albalatillo	1992-2011
9841	Embalse de Vadiello	1978-2011
9192	Siétamo	1975-2011
9032	Peralta de Alcofea_Guatizalema	1928-2011
9091	Lascellas	1944-2011
9033	Peralta de Alcofea_Alcanadre	1928-2011
9193	Ballobar	1988-2011
9046	Lecina	1931-2008
9095	Barbastro	1945-2011
9849	Embalse de Plandescún	1950-1993
9845	Embalse de Pineta	1949-1993
9172	Lafortunada	1965-1993
9051	Escalona	1959-2011
9196	Torla	1967-1992
9040	Boltaña	1944-2011
9846	Embalse de Mediano	1970-2011
9847	Embalse de El Grado	1966-2011
9017	Fraga	1928-2011

Tabla 8. Estaciones de aforo sistema Gállego-Cinca.

5.2.2 Precipitación y temperatura

Para poder obtener los datos de precipitación y temperatura de la zona de estudio se utilizó el proyecto llamado Spain02 v2.1 (Herrera, 2011) el cual fue realizado entre el Instituto de Física de Cantabria (CSIC) de la universidad de Cantabria, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y el departamento de matemáticas aplicadas y ciencias computacionales también de la universidad de Cantabria.

La base de datos comprende una rejilla de alta resolución de $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ (20 x 20 Km aproximadamente) de precipitación diaria para el territorio de la península española y las islas baleares, utiliza 2756 estaciones pertenecientes al AEMET, para el período comprendido entre enero de 1950 y marzo de 2008, realizando interpolaciones por el método de Kriging (Matheron, 1962) entre las estaciones. De manera similar, para los datos de temperatura Spain02 v2.1 utiliza aproximadamente 250 estaciones para el

mismo período, haciendo interpolaciones por los métodos de ponderación por la distancia angular (ADW) (Shepard, 1968) y Thin Plate Splines (TPS) (Duchon, 1977). Para una mejor explicación del contenido y funcionamiento de Spain02 v2.1 se puede consultar la página web <http://www.meteo.unican.es/spain02>.

En la Universidad Politécnica de Valencia se diseñó una hoja de cálculo de Microsoft Excel en la que se incluyeron todos los resultados de esta base de datos Spain02 v2.1 y se pueden obtener los datos históricos diarios de precipitación, temperatura mínima y máxima entre enero de 1950 y marzo de 2008 a partir de las coordenadas del punto deseado en latitud y longitud.

Hay que aclarar que los datos meteorológicos obtenidos de precipitación y temperatura corresponden a la ubicación del centroide de cada una de las subcuencas o unidades para tener un cierto grado de simplificación del presente estudio.

5.2.3 Evapotranspiración

La evapotranspiración se compone de la unión de dos procesos los cuales son la evaporación y la transpiración.

La evaporación es el fenómeno físico en el que el agua pasa de estado líquido a vapor (se añade la sublimación que es el mismo fenómeno pero de estado sólido a vapor, es decir nieve y el hielo).

Se produce evaporación desde:

- La superficie del suelo y la vegetación inmediatamente después de la precipitación
- Desde las superficies de agua (ríos, embalses, lagos)
- Desde el suelo, agua infiltrada que se evapora desde la parte más superficial del suelo. Puede tratarse de agua recién infiltrada o, en áreas de descarga, de agua que se acerca de nuevo a la superficie desde un largo recorrido en el subsuelo.

La transpiración es el fenómeno biológico por el que las plantas pierden agua a la atmósfera. Toman agua del suelo a través de sus raíces, utilizan una pequeña parte para su crecimiento y el resto lo transpiran.

Así como todo lo anteriormente especificado por Sánchez (2011) nos aclara ahora que como la evaporación y la transpiración son difíciles de medir por separado y además

en la mayor parte de los casos lo que interesa es la cantidad total de agua que se pierde a la atmósfera sea del modo que sea, se consideran en conjunto bajo el concepto mixto de evapotranspiración (ET).

La evapotranspiración potencial (ETP), es la pérdida de humedad que ocurriría en un sistema, si en ningún momento existiera una deficiencia de agua en el suelo para uso de la vegetación, para ello es necesario agregar agua continuamente al sistema. (Ramírez, 2012). Es decir es la evapotranspiración que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas (Thornthwaite, 1948).

Se determina primero calculando la evapotranspiración de referencia (ET_0) definida por el artículo 56 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (Allen et al., 1998) como aquella correspondiente a un cultivo hipotético de pasto (alfalfa), con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0,23 y luego afectándola por un factor llamado coeficiente de cultivo (K_c) ya que como se mencionó la ET_0 es para la alfalfa y cambiará dependiendo de la vegetación existente en la zona de estudio. Para determinarla existen variedad de fórmulas que distintos autores han postulado y comprobado, algunas con mayor cantidad de parámetros que otras y en algunos casos sucede que los datos necesarios de dichos parámetros no suelen poseerse o es complicada su obtención, con lo cual la fórmula más sencilla y que a su vez es la más utilizada es la de Hargreaves y Samani (1985) la cual es la que se aplicará en el presente estudio y sólo necesita datos de temperaturas y radiación solar:

$$ET_0 = 0.0135 * KT * (T_{med} + 17.8) * R_a * (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

Siendo:

ET_0 = Evapotranspiración de referencia, mm/día

T_{med} = Temperatura media diaria, °C

T_{max} = Temperatura diaria máxima, °C

T_{min} = Temperatura diaria mínima, °C

KT = Coeficiente Empírico, adimensional

R_a = Radiación solar extraterrestre, mm/día

Las temperaturas a utilizar son las previamente determinadas mediante Spain02 v2.1.

Para obtener el valor de la radiación solar extraterrestre se hace uso de la siguiente fórmula (Allen et al., 1998):

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} * G_{sc} * d_r * (w_s * \sin \gamma * \sin \delta + \cos \gamma * \cos \delta * \sin w_s)$$

Donde:

$$d_r = 1 + (0.033 * \cos \frac{2\pi * J}{365})$$

$$\delta = 0.409 * \sin(\frac{2\pi * J}{365} - 1.39)$$

$$\gamma = \frac{\text{latitud en grados decimales} * \pi}{180}$$

$$w_s = \cos^{-1}(-\tan \gamma * \tan \delta)$$

Siendo:

R_a : Radiación solar extraterrestre, MJ /m²d

G_{sc} : Constante solar = 0.082 MJ /m²min

d_r : Distancia relativa entre el sol y la tierra, adimensional

w_s = Ángulo de radiación a la puesta del sol, rad

δ = Declinación solar, rad

γ = Latitud del punto deseado, rad

J = Número de día juliano, adimensional

Finalmente como se desea obtener la evapotranspiración en mm/d, se debe multiplicar la radiación solar extraterrestre obtenida por 0.408 para pasarla de MJ /m²d a mm/d.

Con respecto al coeficiente empírico adimensional KT , Hargreaves (1994) da sus puntos de vista y plantea un valor de 0.19 para regiones costeras y de 0.162 para regiones del interior. En este caso se tomará el valor de 0.162 debido a que las cuencas a analizar se encuentran en el interior de España.

Ahora para el cálculo de la ETP como se mencionó depende del cultivo o cobertura de suelo que se tenga en la zona requerida, con lo cual para su corrección se le aplica un coeficiente de cultivo que es determinado por diversos factores como el tipo de cobertura o cultivo, clima, evaporación del suelo y etapa de crecimiento del cultivo:

$$ETP = ET_0 * K_c$$

Siendo:

ETP: Evapotranspiración Potencial, mm/d

ET₀ = Evapotranspiración de referencia, mm/d

K_c = Coeficiente de Cultivo, adimensional

Los coeficientes de cultivo a utilizar se presentan en la Tabla 9 (Estrela et al., 1999):

Tipo de uso del suelo	Coeficiente de cultivo
Espacios con poca vegetación	80%
Tierras de labor	87%
Sistemas agrícolas heterogéneos	91%
Cultivos permanentes	93%
Vegetación arbustiva	95%
Bosque mixto	97%
Bosques de frondosas y coníferas	98%
Zonas húmedas, superficies de agua y artificiales	100%
Praderas	100%

Tabla 9. Coeficientes de cultivo de referencia.

Fuente: Estrela et al., (1999).

Para determinar la cobertura de suelo de la zona de estudio se hizo uso de aquellas estimadas por el proyecto CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover (CLC), el cual posee una base de datos sobre la cobertura y uso del territorio en la unión europea a escala 1:100.000 mediante la interpretación a través de imágenes recogidas por la serie de satélites Landsat y SPOT. Se utilizó la versión más reciente CORINE 2006. Los usos de suelo se presentan a continuación en la Figura 19 y Tabla 10, en donde se diferencian dos partes del sistema teniendo un cambio a partir de su zona media, teniendo de ahí hacia arriba una clara inclinación por los bosques y espacios de vegetación arbustiva, mientras que en la zona inferior una clara influencia de las tierras de labor y zonas agrícolas heterogéneas.

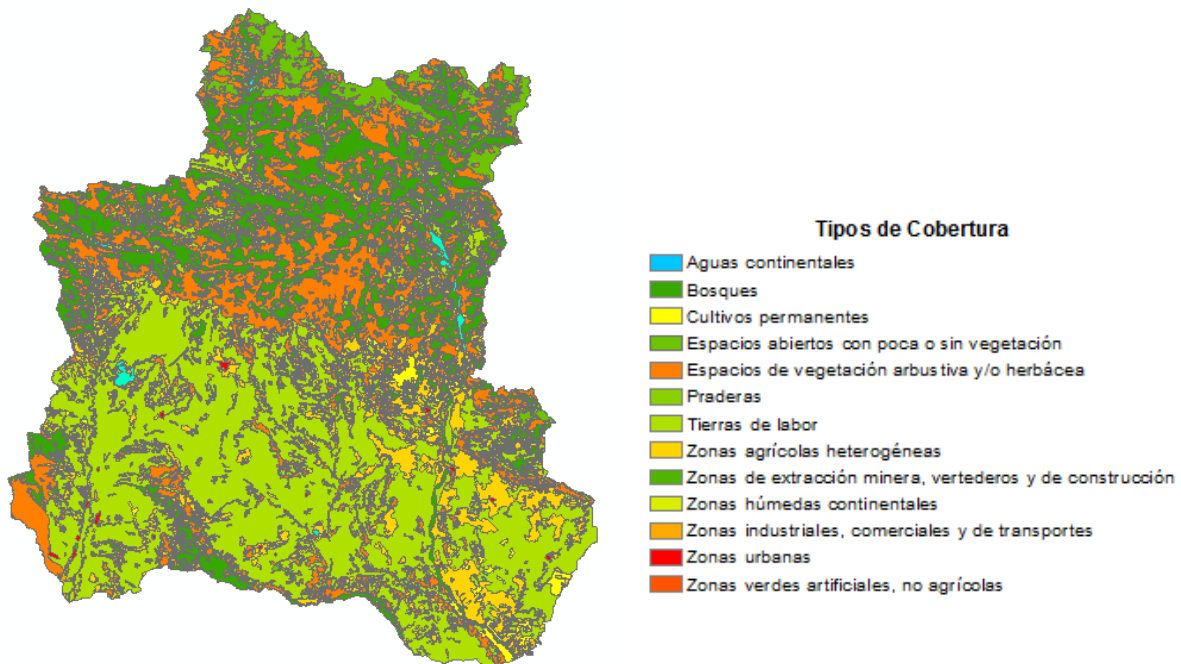


Figura 19. Usos de suelo sistema Gállego-Cinca.

Fuente: Elaboración Propia.

Tipo de Cobertura	Área (Km ²)	Porcentaje (%)
Aguas continentales	83.07	0.69
Bosques	2402.52	19.88
Cultivos permanentes	148.35	1.23
Espacios abiertos con poca o sin vegetación	570.02	4.72
Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea	2814.19	23.28
Praderas	80.40	0.67
Tierras de labor	4749.18	39.29
Zonas agrícolas heterogéneas	1167.04	9.65
Zonas de extracción minera, vertederos y de construcción	9.82	0.08
Zonas húmedas continentales	5.50	0.05
Zonas industriales, comerciales y de transportes	18.87	0.16
Zonas urbanas	37.21	0.31
Zonas verdes artificiales, no agrícolas	1.82	0.02
Total	12088.00	100

Tabla 10. Usos de suelo sistema Gállego-Cinca.

Así como para la precipitación y temperatura, se utilizó como punto de referencia el centroide de cada subcuenca o unidad y a partir de éste se calculó un valor de evapotranspiración diario para cada una de ellas. Para ello se debe realizar la ponderación del coeficiente de cultivo según la cobertura que posea cada subcuenca:

$$Kc_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} (Kc_j * A_j)}{A_t}$$

Siendo:

K_{c_i} : Coeficiente de cultivo para cada subcuenca o unidad, adimensional

K_{c_j} : Coeficiente de cultivo según la cobertura respectiva, adimensional

A_j : Área de la subcuenca correspondiente a la cobertura respectiva, L²

A_t : Área total de la subcuenca, L²

Dando como resultado los siguientes valores de la Tabla 11 para los coeficientes de cultivo de cada una de las subcuencas previamente mostradas en la Figura 17:

UNIDAD	Kc	UNIDAD	Kc
0504	0.90	1416	0.91
0505	0.91	1420_1	0.95
0508_1	0.94	1422	0.93
0509_1	0.95	1423	0.93
0511	0.94	1424	0.92
0512	0.94	1434	0.94
0513_1	0.92	1435	0.92
0516	0.94	1436	0.91
1401	0.91	1437	0.94
1403_1	0.92	1438	0.93
1405_1	0.93	1439	0.94
1406_1	0.92	1440	0.94
1407	0.93	1441_1	0.93
1411_1	0.93	1441_2	0.93
1414_1	0.91		

Tabla 11. Coeficiente de cultivo para cada subcuenca.

5.3 Calibración y validación del sistema de explotación

5.3.1 Subsistema del río Gállego

El subsistema del río Gállego se compone de 8 unidades o subcuencas como se presenta en la Figura 20 para un total de 4008 Km².

5.3.1.1 Cuenca del río Gállego

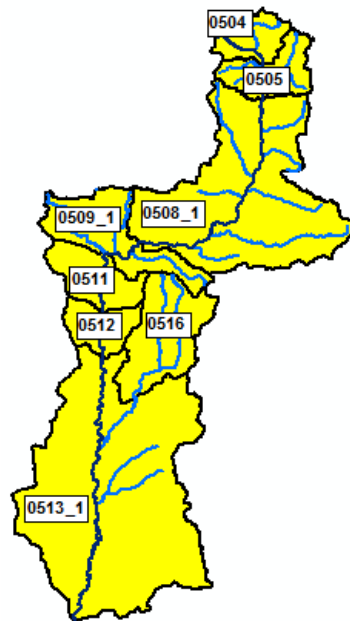


Figura 20. Unidades de la cuenca del río Gállego.
Fuente: Elaboración Propia.

5.3.1.1.1 Unidad 0504

La unidad 0504 es la subcuenca de cabecera del subsistema del río Gállego, tiene una extensión de 117 Km², es una zona en la que se evidencia la presencia de nieve en época de invierno con lo cual los parámetros de nieve del modelo HBV fueron utilizados, en esta unidad se localiza el nacimiento del río Gállego el cual ingresa al embalse de Lanuza así como el río Aguas Limpias. La estación de aforo utilizada es la 9840 la cual registra los caudales de entrada a dicho embalse. No presenta ningún tipo de demandas con lo cual se considera en régimen natural.



Figura 21. Unidad 0504.
Fuente: Elaboración Propia.

No se lograron obtener unos resultados apropiados en la calibración y validación, ya que se obtuvo una función objetivo regular con 0.47 y 0.42 respectivamente. En ambas fases se tuvo la misma problemática en la que tanto para el índice de eficiencia de Nash como el de Nash-In (es decir los picos altos y bajos) reflejaron poco ajuste teniendo un bajo valor, siendo el primero el más evidenciado como se muestra en la Figura 22 y Figura 23 donde se nota que a la simulación le cuesta llegar a los flujos altos. La relación entre las medias de las medias de los resultados simulados y reales representadas por el índice de Bias Score es bueno a pesar del problema previamente especificado.

Cabe destacar que no haber podido calibrar correctamente esta subcuenca no tiene especial efecto en las posteriores subcuencas debido a la presencia del embalse de Lanuza que modifica el régimen hídrico con lo cual para la siguiente subcuenca se utilizarán las salidas del mismo como las aportaciones entrantes.

Calentamiento 1982-1985			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1985-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.14	Nash	0.10
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.21	Nash-In	0.08
HumIni	0.040	m	Pearson Correlation Coeff	0.67	Pearson Correlation Coeff	0.67
SUIni	0.000	m	Bias Score	0.85	Bias Score	0.83
SLIni	0.079	m	FUNC. OBJ	0.47	FUNC. OBJ	0.42

Tabla 12. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0504.

Parámetros Cuenca		
A	117.000	Km ²
CFMax	19.624	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	1.151	°C
TTInt	1.647	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.003	Adim
FC	0.150	m
PWP	0.120	m
SUMax	0.090	m
Kr	0.199	1/d
Ku	0.198	1/d
KI	0.011	1/d
Kperc	0.514	1/d

Tabla 13. Parámetros finales unidad 0504.

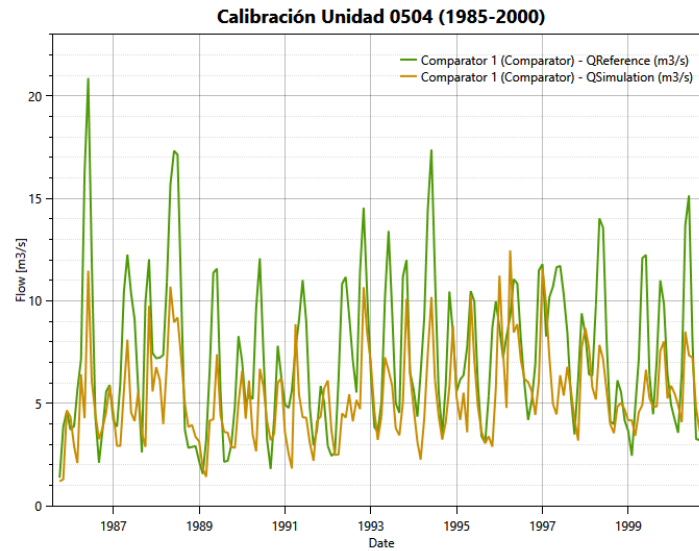


Figura 22. Calibración unidad 0504.
Fuente: RS-Minerve.

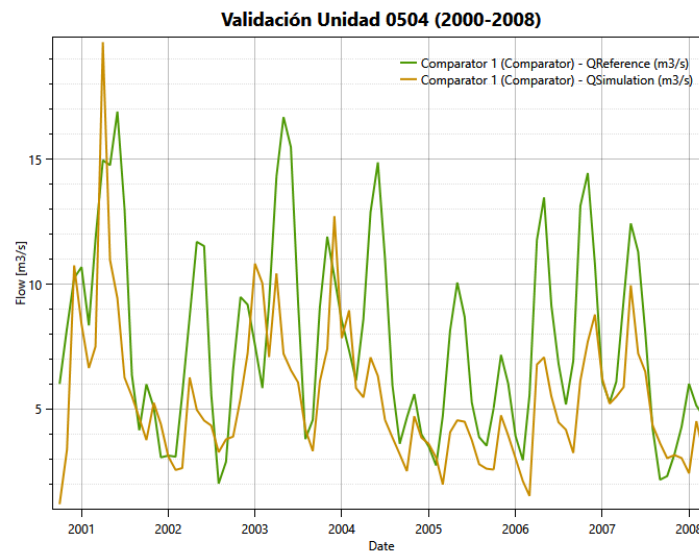


Figura 23. Validación unidad 0504.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.1.1.2 Unidad 0505

La unidad 0505 perteneciente al Subsistema del Río Gállego se encuentra aguas abajo de la cuenca de cabecera 0504, al cauce de este río desembocan ríos pequeños tales como el Escarra, Caldares y Aguilero, la subcuenca recibe las aguas de una cuenca de 174 Km² y de las salidas del embalse de Lanuza las cuales son medidas por la estación 9840, para posteriormente ingresar al embalse de Búbal, el análisis se realizará con los datos obtenidos de la estación 9835 perteneciente a este último.

La cuenca se encuentra muy modificada en primera instancia por el embalse de Lanuza aguas arriba y luego por el embalse de Búbal que ocupa una gran superficie del cauce de la presente unidad 0505, causando que la mayor parte de las entradas a este último embalse sean casi todas las salidas del de Lanuza debido a su cercanía, ya que las aportaciones propias de la unidad en estudio son pocas en comparación con estas salidas teniendo en promedio unos $4 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$.



Figura 24. Unidad 0505.

Fuente: Elaboración Propia. RS-Minerve.

Debido a que se contaba con una buena serie histórica se realizó el período de calentamiento de 3 años, una calibración de 15 y una validación de 8.

Se lograron muy buenos resultados en la calibración ya que se obtuvo una función objetivo de 0.92 y una excelente en validación con 0.93, esto se debe en gran parte a como se mencionó anteriormente, las entradas al embalse de Búbal son en su mayoría las sueltas del de Lanuza, con lo cual la simulación se debería ajustar muy bien a la realidad y eso justamente es lo que sucedió, teniendo una gran exactitud en valores altos, bajos y demás, casi solapándose las gráficas. Con respecto a las aportaciones propias de la subcuenca, las predominantes son las del flujo base prioritariamente siendo muy similar al interflujo el cual se destaca en períodos de crecidas.

A su vez se tuvo especial cuidado con los tres criterios a tener en cuenta con los resultados de los parámetros el primero que la capacidad de campo (FC) sea mayor que el punto de marchitez (PWP), el segundo que $K_r > K_u > K_l$ y tercero que $K_{perc} + K_l + K_u$ no supere la unidad. Estos criterios se evidencian en todas las subcuencas con lo que para no ser tan repetitivos no se vuelve a mencionar de aquí en adelante, sin embargo se reitera que su revisión si es realizada.

Calentamiento 1982-1985			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1985-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.85	Nash	0.89
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.89	Nash-In	0.87
HumIni	0.097	m	Pearson Correlation Coeff	0.93	Pearson Correlation Coeff	0.95
SUIni	0.000	m	Bias Score	1.00	Bias Score	1.00
SLIni	0.021	m	FUNC. OBJ	0.92	FUNC. OBJ	0.93

Tabla 14. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0505.

Parámetros Cuenca		
A	174.00	Km ²
CFMax	5.00	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TISM	0.000	°C
Beta	1.000	Adim
FC	0.616	m
PWP	0.277	m
SUMax	0.054	m
Kr	0.211	1/d
Ku	0.207	1/d
KI	0.004	1/d
Kperc	0.307	1/d

Tabla 15. Parámetros finales unidad 0505.

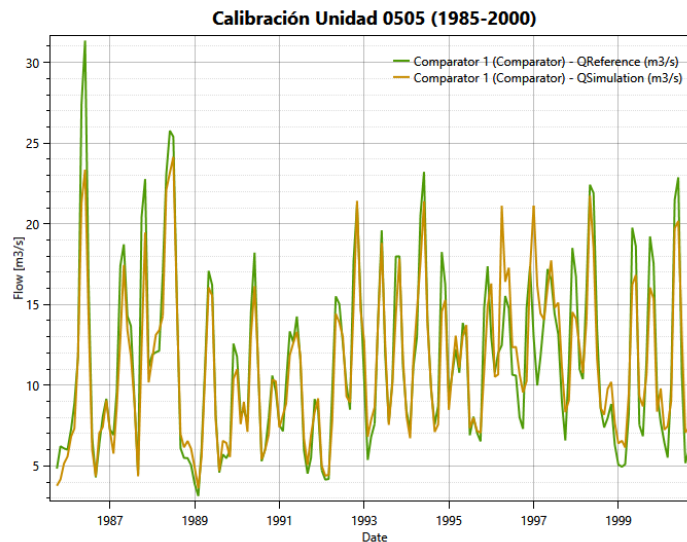


Figura 25. Calibración unidad 0505.

Fuente: RS-Minerve.

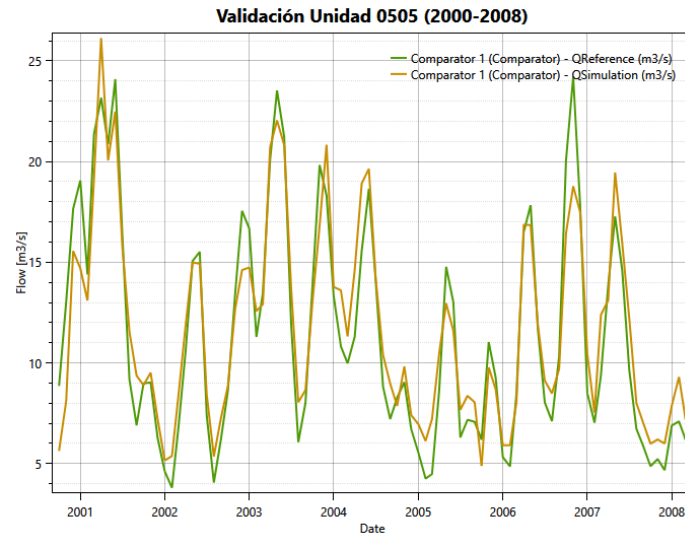


Figura 26. Validaci3n unidad 0505.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.1.1.3 Unidad 0508_1

La unidad 0508_1 se encuentra en el subsistema del r3o G3llego teniendo una extensi3n de 1100 Km², es la segunda unidad m3s grande de este subsistema, en el cauce principal de 3ste r3o desembocan algunos de menor magnitud como el Aurin, Basa y Guarga, el caudal aforado lo registra la estaci3n 9123-Anzanigo la cual tiene un muy buen per3odo de registro y se tom3o como an3lisis el comprendido entre 1980 y 2008 el cual es el llamado previamente como base para este estudio.



Figura 27. Unidad 0508_1.
Fuente: Elaboraci3n Propia.

Sus aguas provienen primero de las aportaciones de la cuenca, que en este caso si son más relevantes que la cuenca aguas arriba debido a su mayor extensión lo cual conlleva a una menor dependencia de lo que salga del embalse de Búbal localizado justamente aguas arriba de la unidad 0508_1, a su vez presenta demandas agrarias de 10.79 Hm³/año y unos retornos de 3.73 Hm³/año, las cuales también afectan el régimen natural de la zona. Lo cual se puede evidenciar en la calibración ya que la función objetivo es de 0.83 bajando relativamente de 0.92 que tenía la unidad 0505, en general los picos altos y bajos se adaptan al caudal aforado, con excepción de unos períodos como el de 1990-1991 en el que los picos bajos simulados eran un poco más elevados que los verdaderos alrededor de 8 m³/s*mes y mayo de 1986, enero de 1997 y junio de 2000 en donde al igual que los picos bajos, ahora los altos simulados son mayores en aproximadamente 10 m³/s*mes, lo cual causa que tanto Nash como Nash-In sean de 0.73. Las medias de los resultados simulados y reales son perfectas lo que se evidencia con el Bias Score de 1 y la correlación entre valores es buena con 0.86 la cual se vio claramente afectada por las variaciones mencionadas de los picos altos y bajos.

En la validación de 2000 a 2008 se obtuvo un mejor resultado que la calibración teniendo 0.92 de función objetivo en la que tanto los picos altos, bajos y la correlación mejoraron relativamente al período de calibración de 1983 a 2000, disminuyendo tanto para los picos altos y bajos la sobreestimación de la simulación.

Sin embargo a pesar de las demandas, los retornos y el tamaño de la subcuenca de más de 1000 Km², se obtuvo que la calibración es buena y la validación excelente. El interflujo y el flujo subterráneo son muy similares siendo los predominantes en las aportaciones propias.

Calentamiento 1980-1983			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1983-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.73	Nash	0.86
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.73	Nash-In	0.89
HumIni	0.145	m	Pearson Correlation Coeff	0.86	Pearson Correlation Coeff	0.94
SUIni	0.004	m	Bias Score	1.00	Bias Score	0.99
SLIni	0.013	m	FUNC. OBJ	0.83	FUNC. OBJ	0.92

Tabla 16. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0508_1.

Parámetros Cuenca		
A	1100.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.290	Adim
FC	0.248	m
PWP	0.175	m
SUMax	0.022	m
Kr	0.219	1/d
Ku	0.199	1/d
KI	0.015	1/d
Kperc	0.287	1/d

Tabla 17. Parámetros finales unidad 0508_1.

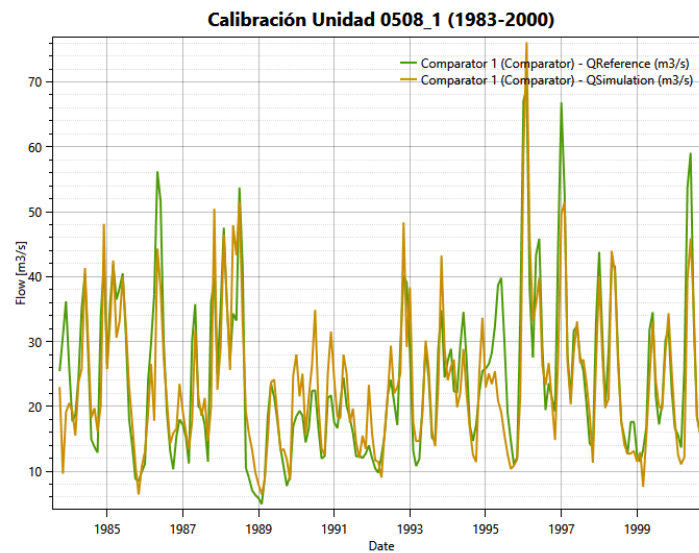


Figura 28. Calibración unidad 0508_1.

Fuente: RS-Minerve.

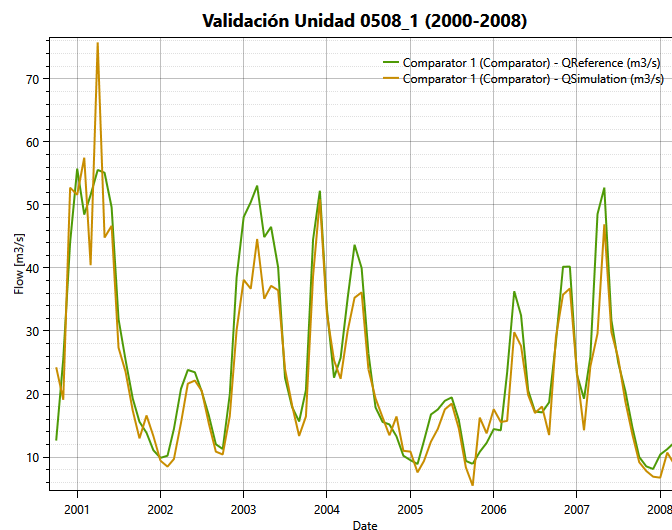


Figura 29. Validación unidad 0508_1.

Fuente: RS-Minerve.

5.3.1.1.4 Unidad 0509_1

La unidad 0509_1 es una subcuenca sin demandas ni retornos considerables, su extensión es de 315 Km², los ríos Asabón, Triste y Garona desembocan en el cauce del río Gállego, las aportaciones de la propia cuenca y las aguas que provienen de la cuenca 0508_1 aguas arriba son estimadas por la estación 9836-Embalse de La Peña como volumen de entrada al mismo.

Al no ser una cuenca muy grande sus aportaciones propias son menos relevantes que el caudal que ya proviene de la cuenca previa, sólo acumulando un poco más para ingresar al Embalse de La Peña.

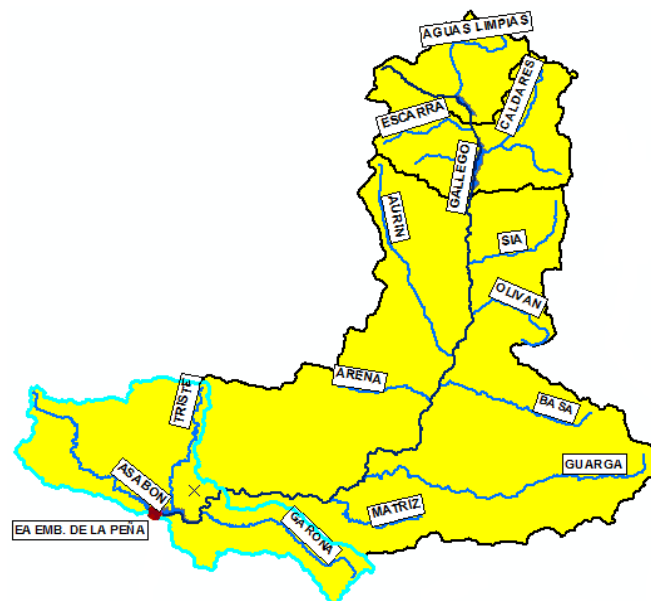


Figura 30. Unidad 0509_1.
Fuente: Elaboración Propia.

Debido a la sospecha de error en los datos de volumen de entrada de la estación del embalse de La Peña como se explica en el numeral 8.1.1.4 del Anejo 8.1 Estaciones de aforo la simulación se realizó a partir de 1997.

La calibración realizada entre 1999 y 2005 resultó muy buena ya que su función objetivo sobrepasa 0.9 teniendo 0.93, incluso ambos coeficientes de Nash se acercan a su vez a 0.9 logrando un buen ajuste a los datos observados tanto en flujos bajos como altos teniendo sólo una diferencia considerable en abril de 2001 cuando el simulado supera al verdadero en aproximadamente 12 m³/s*mes.

En cuanto a la validación comprendida entre 2005 y 2008 también se logró un buen ajuste pero no tanto como en la fase de calibración, ya que la función objetivo

disminuyó de 0.93 a 0.81, pero igualmente es una muy buena validación ya que es un resultado superior a 0.8, a nivel global se ajusta correctamente a excepción de octubre de 2005 a marzo de 2006 donde el caudal simulado es diferente al real que se mantiene aproximadamente por los 13 m³/s*mes mientras que el simulado por los 22 m³/s*mes e incluso teniendo un pico de 28 m³/s*mes en donde en la realidad no existe, lo cual afecta claramente a los índices de eficiencia los cuales disminuyen significativamente.

Las aportaciones propias de la subcuenca rondan los 2.5 m³/s*mes, en donde el flujo base es un poco mayor al interflujo.

Calentamiento 1997-1999			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1999-2005		2005-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.88	Nash	0.70
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.89	Nash-In	0.68
HumIni	0.156	m	Pearson Correlation Coeff	0.94	Pearson Correlation Coeff	0.87
SUIni	0.002	m	Bias Score	1.00	Bias Score	0.98
SLIni	0.025	m	FUNC. OBJ	0.93	FUNC. OBJ	0.81

Tabla 18. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0509_1.

Parámetros Cuenca		
A	315.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	4.997	Adim
FC	0.219	m
PWP	0.174	m
SUMax	0.034	m
Kr	0.192	1/d
Ku	0.016	1/d
KI	0.011	1/d
Kperc	0.111	1/d

Tabla 19. Parámetros finales unidad 0509_1.

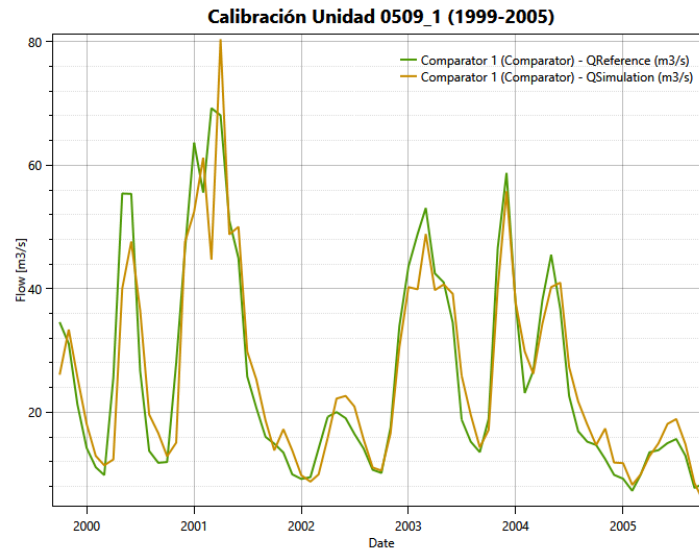


Figura 31. Calibración unidad 0509_1.
Fuente: RS-Minerve.

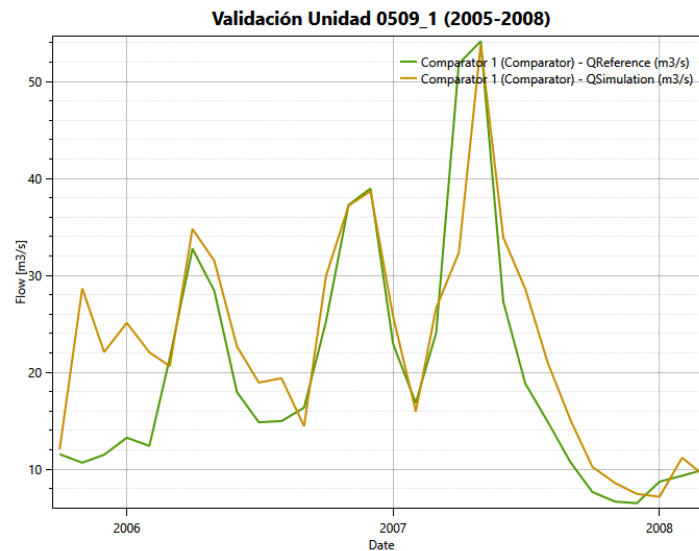


Figura 32. Validación unidad 0509_1.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.1.1.5 Unidad 0511

La unidad 0511 utiliza los datos de la estación de aforo 9059-Santa Eulalia ubicada sobre el cauce del río Gállego recopilando su caudal circulante, recibe las aguas provenientes de las sueltas del embalse de La Peña registradas por la estación 9836, el área de esta subcuenca es de 195 Km² y sus principales aportaciones provienen del embalse ya mencionado el cual regula totalmente la cuenca en cuestión, ya que dicha cuenca por sí sola no aporta demasiada agua al sistema por su pequeña extensión, en comparación a lo que el embalse suelta. Es una subcuenca alterada

debido a la presencia de dicho embalse causando una vez más la alteración del régimen natural del río Gállego, que ya venía siendo modificado desde aguas arriba.

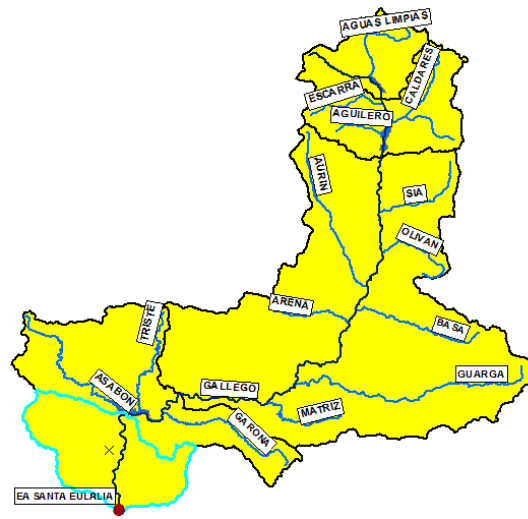


Figura 33. Unidad 0511.
Fuente: Elaboración Propia.

A pesar que la serie histórica tomada en el numeral 8.1.1.5 para la estación de aforo 9059-Santa Eulalia era desde 1980 a 2008, el período de análisis para la unidad 0511 en estudio se tomó desde 1997 debido al problema de datos previamente explicados del embalse de la Peña, para el cual sus datos confiables se asumieron a partir de dicho año.

Tanto la calibración como la validación son excelentes, teniendo en ambos casos un ajuste casi perfecto, ya que la función objetivo se estableció en 0.98 y 0.99 respectivamente, teniendo obviamente excelentes valores para las 4 índices de eficiencia, con lo que agregado a que las aportaciones de la misma subcuenca son casi nulas se evidencia una clara dependencia del sistema a lo que vaya soltando el embalse de La Peña desde este punto.

Calentamiento 1997-1999			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1999-2005		2005-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.96	Nash	0.99
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.97	Nash-In	0.99
HumIni	0.150	m	Pearson Correlation Coeff	0.98	Pearson Correlation Coeff	1.00
SUIni	0.002	m	Bias Score	1.00	Bias Score	1.00
SLIni	0.021	m	FUNC. OBJ	0.98	FUNC. OBJ	0.99

Tabla 20. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0511.

Par3metros Cuenca		
A	195.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.457	Adim
FC	0.434	m
PWP	0.164	m
SUMax	0.084	m
Kr	0.191	1/d
Ku	0.019	1/d
KI	0.001	1/d
Kperc	0.587	1/d

Tabla 21. Par3metros finales unidad 0511.

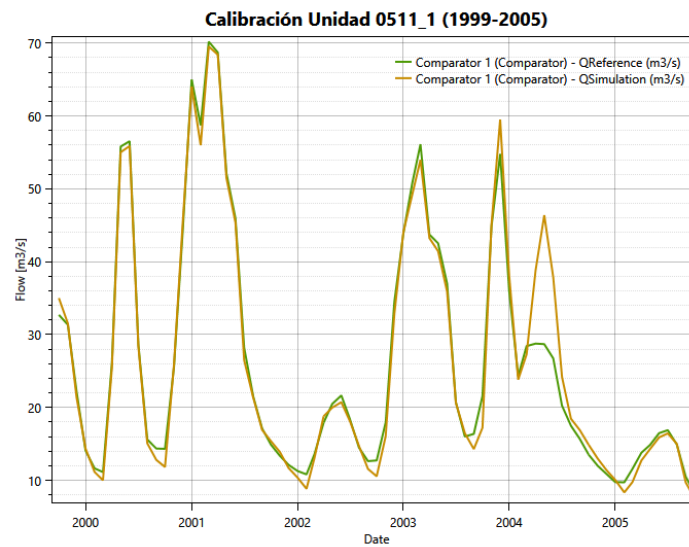


Figura 34. Calibraci3n unidad 0511.

Fuente: RS-Minerve.

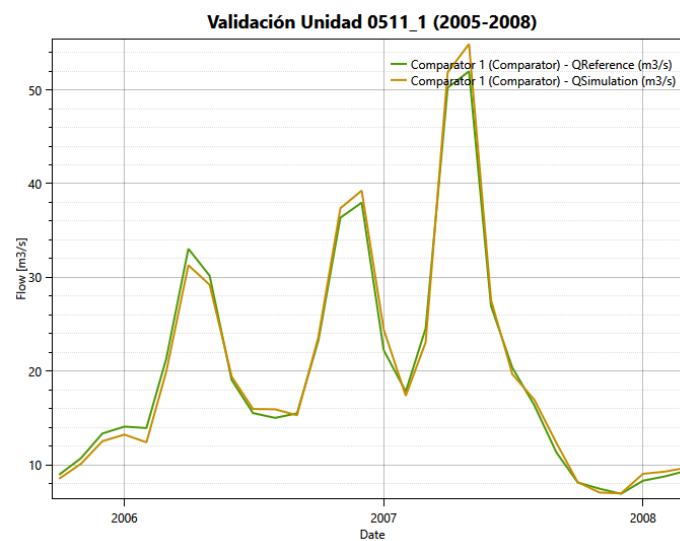


Figura 35. Validaci3n unidad 0511.

Fuente: RS-Minerve.

5.3.1.1.6 Unidad 0512

La unidad 0512 es una subcuenca que es perteneciente al subsistema del río Gállego, posee una extensión de 147 Km², la estación de aforo utilizada es la 9837-Embalse de Ardisa para lo cual se tendrá en cuenta las entradas al mismo, al igual que sucede con la mayoría de las cuencas de este subsistema, se encuentra muy regulada por los embalses que se encuentran aguas arriba.



Figura 36. Unidad 0512.

Fuente: Elaboración Propia.

En este caso prácticamente las sueltas del embalse de la Peña llegan a esta cuenca y debido a la poca extensión tanto de la unidad 0512 aguas arriba de 195 Km² como de la unidad 0512 actual de 147 Km², sus aportaciones propias son muy pocas en comparación con dichas sueltas, con lo cual era de esperarse que tanto para la calibración como la validación se obtuvieran resultados muy buenos, de hecho fueron excelentes ya que la calibración obtuvo una función objetivo global de 1 al igual que la validación, mostrando que prácticamente las salidas del embalse de la Peña son las mismas entradas al embalse de Ardisa.

Cabe destacar que el período de análisis para la unidad 0512 en estudio se tomó desde 1997 debido a que la unidad 0511 aguas arriba también se realizó del mismo modo debido al problema de datos explicados del embalse de la Peña, para el cual sus datos confiables se asumieron a partir de dicho año. A su vez la validación no se realizó hasta 2008 debido a que la estación 9837-Embalse de Ardisa posee buenos datos hasta febrero de 2005.

Calentamiento 1997-1998			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1998-2003		2003-2005	
HsnowIni	0.000	m	Nash	1.00	Nash	1.00
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	1.00	Nash-In	1.00
HumIni	0.110	m	Pearson Correlation Coeff	1.00	Pearson Correlation Coeff	1.00
SUIni	0.001	m	Bias Score	1.00	Bias Score	1.00
SLIni	0.005	m	FUNC. OBJ	1.00	FUNC. OBJ	1.00

Tabla 22. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0512.

Parámetros Cuenca		
A	147.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	4.984	Adim
FC	0.637	m
PWP	0.097	m
SUMax	0.044	m
Kr	0.166	1/d
Ku	0.010	1/d
Kl	0.000	1/d
Kperc	0.335	1/d

Tabla 23. Parámetros finales unidad 0512.

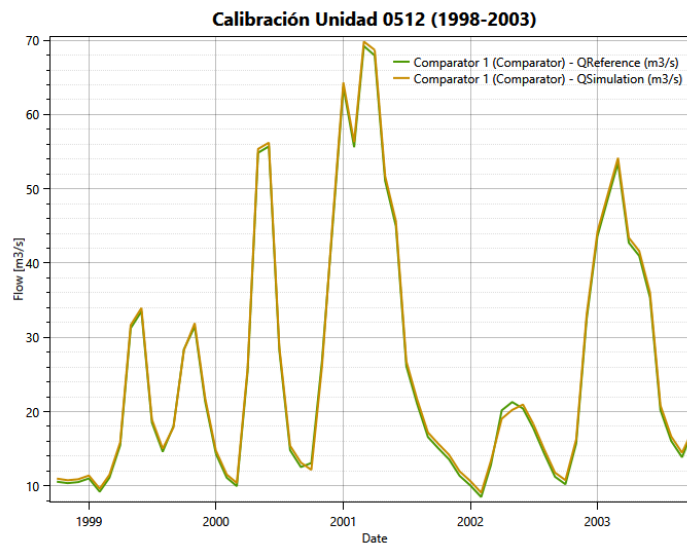


Figura 37. Calibración unidad 0512.

Fuente: RS-Minerve.

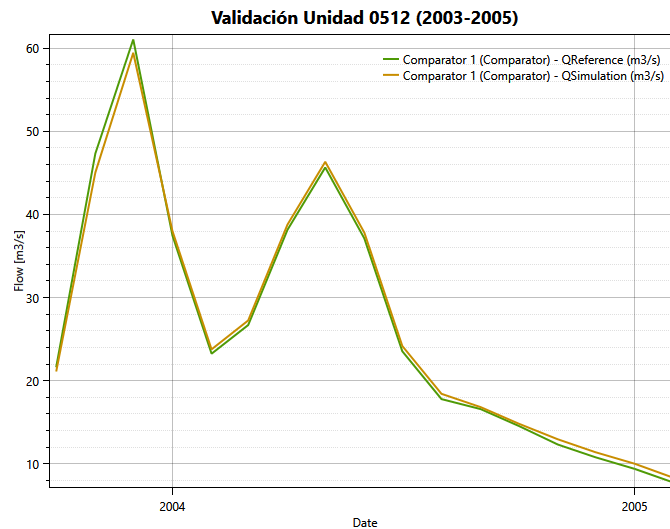


Figura 38. Validación unidad 0512.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.1.1.7 Unidad 0516

Concerniente al subsistema del río Gállego, la unidad 0516 de una extensión de 329 Km² es la única subcuenca de este subsistema que no se encuentra localizado en el río Gállego sino en uno de sus afluentes como lo es el río Sotón al cual también le llegan las aguas del río Riel, además presenta pocas demandas de regadío de 1.83 Hm³/año.



Figura 39. Unidad 0516.
Fuente: Elaboración Propia.

Inicialmente se intentó utilizar la estación 9838-Embalse La Sotonera comparando sus entradas con las aportaciones de la cuenca, sin embargo se encontró el problema de que a dicho embalse le llega un trasvase proveniente del embalse de Ardisa mediante el canal del Gállego, con lo que al momento de comparar el caudal simulado con las entradas del embalse se presentaba el problema que el observado era muy elevado



debido a tal trasvase, se intentó utilizar una estación intermedia 9410-Ardisa -Sotonera (Trasvase) la cual tiene registros pero incompletos de 1961 a 1973 y de 1985 a 1989, a su vez se intentaron utilizar los datos mensuales de trasvase registrados en el modelo de Aquatool sin embargo no se logró la calibración tampoco debido a que sólo se tienen 12 datos es decir uno mensual y se le repetía así a toda la serie histórica, con lo cual por falta de datos fue imposible calibrar con las entradas del embalse de La Sotonera. La solución que se encontró fue utilizar como estación de referencia la 9255-Ortilla (con inicio de operaciones en 1992 con lo que los registros incompletos del trasvase de 1985 a 1989 no son útiles) localizada aproximadamente a 6 kilómetros aguas arriba de dicho embalse, para así evitar el no conocimiento exacto de los valores de agua trasvasada y poder realizar un estudio más correcto y menos complicado, reduciendo así su extensión de 329 Km² a 200 Km². Por el río Sotón no circula mucho caudal, teniendo incluso períodos en los que se seca.

La calibración se realizó con 8 años y la validación para 5, y a pesar de que no se tuvo en cuenta el trasvase y se tomó una estación de aforo un poco aguas arriba no se obtuvieron los resultados buenos esperados, ya que en la calibración se obtuvo un aceptable 0.63 de función objetivo, en sí el índice más afectado es el del Nash-In el cual evalúa los flujos bajos teniendo un pobre 0.10 debido a que en el caudal observado había un poco menos que el simulado alrededor de 0.3 m³/s en todos ellos, causando este mal resultado, lo mismo sucede en el período de validación en el cual este índice sube hasta 0.23 sin embargo no es un muy buen resultado.

En cuanto a la relación entre las medias de los resultados simulados y reales representadas por el índice de Bias Score es perfecta con un valor de 1 para la calibración haciendo que los bajos índices de Nash no afecten demasiado a la función objetivo, similar a lo que sucede en la validación sin embargo en esta el Bias Score disminuye significativamente a 0.71 siendo aún un valor bueno, éste se vio afectado ya que hubieron valores simulados más elevados que la realidad entre 2005 y 2007 causando un valor bajo para Nash-In y un desbalance entre las medias para el Bias Score, ya que a su vez los picos obtenidos estaban un poco desfasados generando un índice de Nash bajo de 0.43, sin embargo la función objetivo se encuentra entre el rango aceptable con un 0.56.

Cabe destacar que no es una cuenca que tenga muchas aportaciones al embalse de la Sotonera ya que como se puede apreciar en el período de calibración sus picos sólo

llegan alrededor de $3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$ y su caudal medio es aproximadamente de $1 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$ e incluso menos. Lo mismo sucede para el período de validación donde sus picos llegan en promedio a $1.5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$ y sus caudales medios al igual que en la calibración de $1 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$ e incluso menos, lo importante en esta cuenca en realidad es el trasvase que se tiene del embalse de Ardisa al de la Sotonera, con lo cual no es una subcuenca de mucha importancia para el sistema así que sus funciones objetivo bajas de calibración y validación no son muy influyentes debido a la posterior regulación que se realizará en el embalse de la Sotonera.

Calentamiento 1992-1995			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1995-2003		2003-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.63	Nash	0.43
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.10	Nash-In	0.29
HumIni	0.058	m	Pearson Correlation Coeff	0.81	Pearson Correlation Coeff	0.71
SUIni	0.011	m	Bias Score	1.00	Bias Score	0.83
SLIni	0.010	m	FUNC. OBJ	0.63	FUNC. OBJ	0.56

Tabla 24. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0516.

Parámetros Cuenca		
A	200.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.811	Adim
FC	0.142	m
PWP	0.090	m
SUMax	0.097	m
Kr	0.498	1/d
Ku	0.043	1/d
KI	0.001	1/d
Kperc	0.052	1/d

Tabla 25. Parámetros finales unidad 0516.

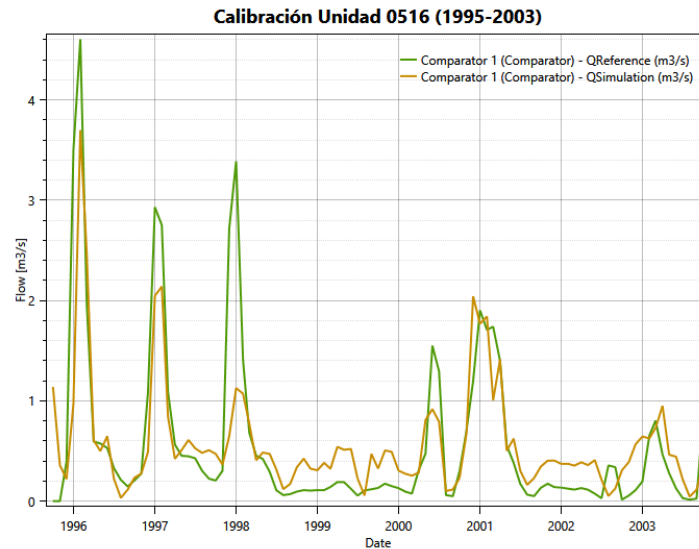


Figura 40. Calibración unidad 0516.
Fuente: RS-Minerve.

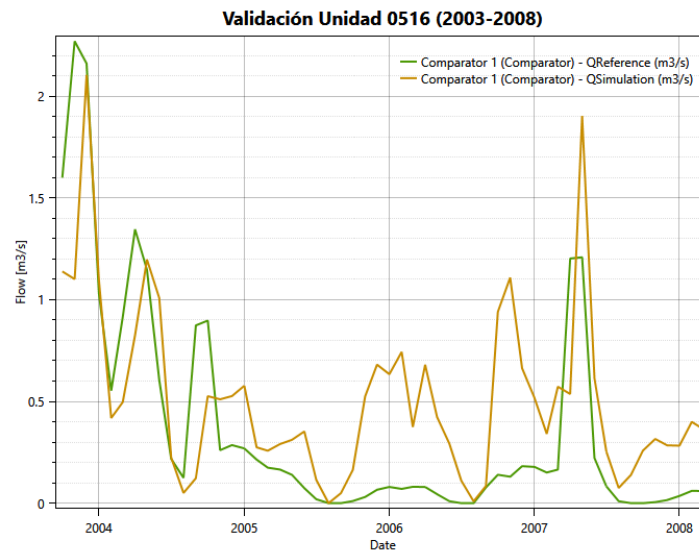


Figura 41. Validación unidad 0516.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.1.1.8 Unidad 0513_1

La subcuenca de la unidad 0513_1 tiene una extensión de 1631 Km², recibe las aguas de ríos como Sotón, La Violada, Val de Recordín, y del propio río Gállego, las subcuencas aguas arriba aportantes son las correspondientes a las unidades 0512 y 0516, para las cuales se toman en cuenta las salidas de los embalses de Ardisa y La Sotonera respectivamente. Es la última subcuenca y de mayor extensión del subsistema del río Gállego, desembocando y aportando sus aguas al río Ebro en cercanías al municipio de Zaragoza.



Figura 42. Unidad 0513_1.
Fuente: Elaboración Propia.

La influencia de demandas por regadíos es alta en esta unidad como se puede apreciar en la Figura 43, teniendo primero un área regable de 26012 Ha, para las cuales su demanda agraria es suplida por el canal de Monegros y algunas acequias derivadas del mismo y la restante de 208.48 Hm³/año por la propia subcuenca. La estación de aforo a utilizar es la 9089-Zaragoza la cual se encuentra ubicada previamente a la desembocadura del río Gállego.

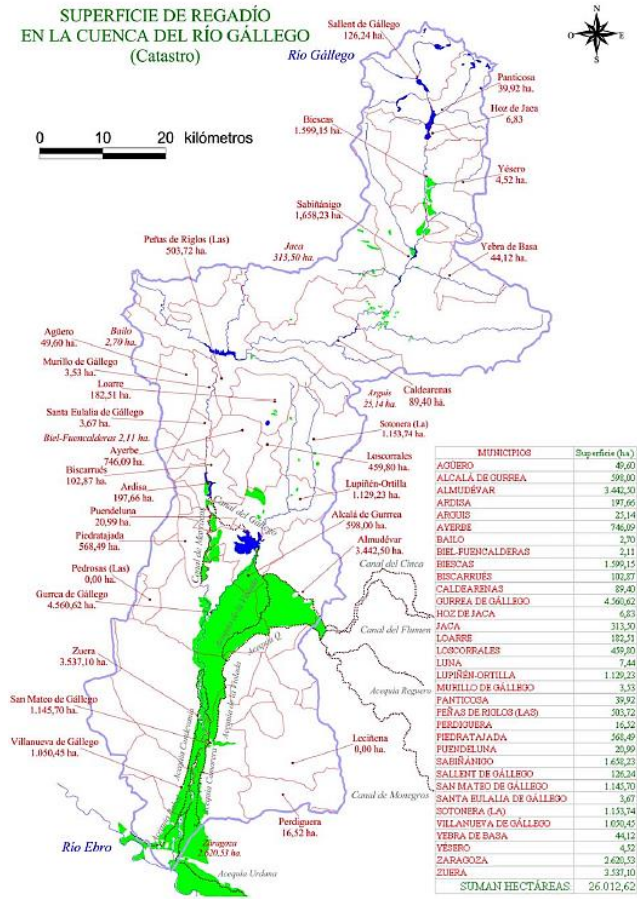


Figura 43. Regadíos zona baja de la cuenca del río Gállego.
Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro, (2007a).

Se debe tener en cuenta para la modelación de esta unidad que se tienen presentes dos trasvases importantes los cuales son el que va desde el embalse de Ardisa hasta el embalse de la Sotonera por medio del canal del Gállego y el segundo el que sale desde el embalse de la Sotonera y discurre por el canal de Monegros diseñado para conducir un caudal de 80 m³/s, con destino al regadío de Los Monegros. Al analizar las entradas y salidas de ambos embalses presentadas en la Figura 142, Figura 143, Figura 144 y Figura 145 del Anejo 8.1 Estaciones de aforo, se puede evidenciar que es muy similar lo que entra a lo que sale de cada uno de ellos, es decir se tiene en cuenta globalmente tanto lo que va para el trasvase como lo que se suelta al río, siendo éste último el que nos interesa para la modelación ya que lo que discurre por el río es lo que se aporta a la cuenca, ya que si se toma también en cuenta lo que va por los canales como si entrara al río, la calibración estaría errónea y no se asemejaría a la realidad.

Como se mencionó para la unidad 0512 la estación de aforo 9410-Ardisa-Sotonera (Trasvase) tiene registros incompletos de 1961 a 1973 y de 1985 a 1989, a su vez la estación de aforo 9421-Canal de Monegros tiene datos completos en el período 1967-1989 e incompletos y de mala calidad e incluso muy pocos para 2002-2011, con lo que ambas estaciones de aforo de los trasvases no son confiables y no se pueden utilizar. Además cabe destacar que el período de registro de datos de la estación de aforo a utilizar 9089-Zaragoza es de 1997 a 2007 el cual se va a ver restringido y disminuido por la falta de datos de las salidas del embalse de Ardisa ya que posee buenos datos hasta febrero de 2005, luego no tiene datos sino hasta octubre de 2006, con lo que el nuevo período de análisis es de 1997 a 2005, haciendo también que los datos de las estaciones de los trasvases no apliquen para este período.

Con lo cual los valores de ambos trasvases a utilizar fueron los registrados en el modelo de gestión de Aquatool, los cuales tienen un registro de un valor promedio mensual y se incluyeron en la modelación sumándose al registro aforado por la estación 9089-Zaragoza para garantizar su cumplimiento.

Mes	Trasvase Canal Gállego (Hm ³ /mes)	Mes	Trasvase Canal Monegros (Hm ³ /mes)
Octubre	52.35	Octubre	1.80
Noviembre	55.37	Noviembre	6.90
Diciembre	44.76	Diciembre	16.64
Enero	32.50	Enero	23.50
Febrero	18.27	Febrero	13.11
Marzo	28.87	Marzo	26.26
Abril	36.96	Abril	30.66
Mayo	72.92	Mayo	67.49
Junio	61.06	Junio	69.09
Julio	51.84	Julio	149.28
Agosto	34.71	Agosto	53.65
Septiembre	21.84	Septiembre	4.21
Total	511.45	Total	462.58

Tabla 26. Trasvases canales del Gállego y Monegros.

Con respecto a la calibración y validación de la modelización hidrológica se obtuvieron buenos resultados teniendo una función objetivo de 0.78 y 0.87 respectivamente, es decir la validación resultó mucho mejor en parte porque sólo fue durante un año y medio y su ajuste fue correcto.

Las principales aportaciones a la subcuenca como viene sucediendo en todo este subsistema del río Gállego provienen de las sueltas de los embalses aguas arriba ya

mencionados de Ardisa y La Sotonera a pesar de las detracciones que se generan por los dos trasvases. La aportación secundaria es proveniente de la misma cuenca que al tener una extensión ya de 1631 Km² produce unas aportaciones más considerables que las subcuencas anteriores que son de menor área, siendo la escorrentía subterránea la más influyente para la unidad 0513_1, debido a su alta tasa de percolación, la cual permite que casi toda la intensidad de recarga sea la misma que percola haciendo que el tanque superior no tenga mucho nivel sino en cambio el inferior.

En general la relación entre los valores medios de los resultados simulados y observados son casi perfectas teniendo un Bias Score de 0.99 y 0.98 para calibración y validación respectivamente. Con respecto al índice de Nash en la calibración tuvo un bajo 0.59 debido a que habían diferencias en varios picos de 20 m³/s*mes siendo los más influyentes a que bajara dicho índice, sin embargo en la validación se mejoró a 0.79 ya que solo en uno de los dos picos se vio esta diferencia. En cuanto a los flujos bajos es decir lo que representa el Nash-in de tipo logarítmico me indica que hay un buen ajuste para ambas es decir calibración y validación con 0.72 y 0.79 respectivamente, en donde para ambos casos no se supera una diferencia de 10 m³/s*mes entre la realidad y lo simulado.

Calentamiento 1997-1998			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1998-2003		2003-2005	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.59	Nash	0.79
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.72	Nash-In	0.79
HumIni	0.074	m	Pearson Correlation Coeff	0.81	Pearson Correlation Coeff	0.92
SUIni	0.000	m	Bias Score	0.99	Bias Score	0.98
SLIni	0.025	m	FUNC. OBJ	0.78	FUNC. OBJ	0.87

Tabla 27. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 0513_1.

Parámetros Cuenca		
A	1631.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.000	Adim
FC	0.180	m
PWP	0.130	m
SUMax	0.073	m
Kr	0.329	1/d
Ku	0.010	1/d
KI	0.011	1/d
Kperc	0.449	1/d

Tabla 28. Parámetros finales unidad 0513_1.

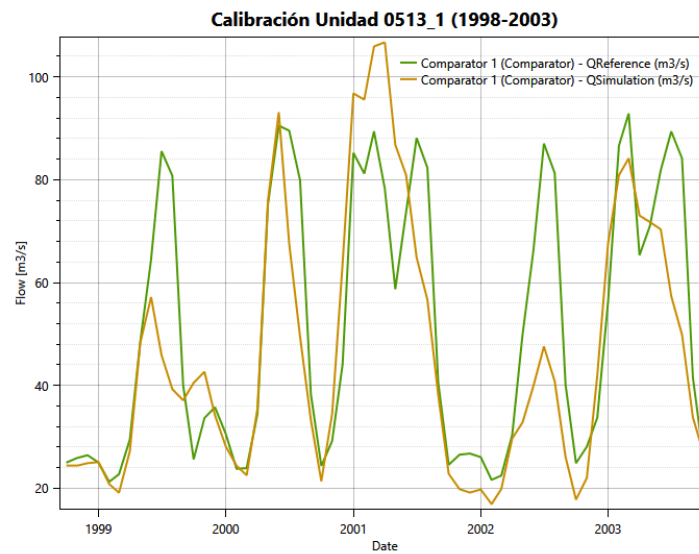


Figura 44. Calibración unidad 0513_1.
Fuente: RS-Minerve.

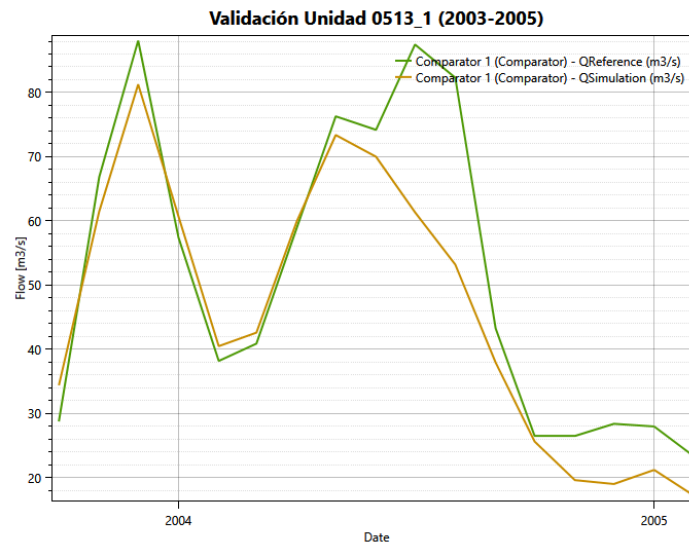


Figura 45. Validación unidad 0513_1.
Fuente: RS-Minerve.

Finalmente se presenta a continuación en la Figura 46 el esquema utilizado en RS-Minerve para la modelación de la presente unidad 0513_1, mostrándose la estación meteorológica, la subcuenca HBV, las subcuencas de directamente aguas arriba, la demanda, el retorno, las salidas de los embalses, los trasvases, el elemento comparador y la estación de aforo de referencia:

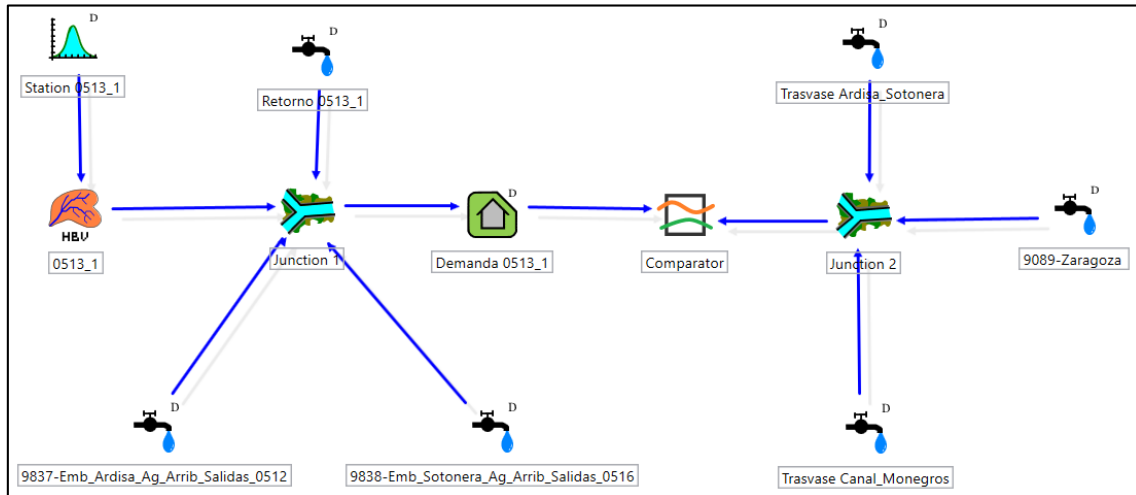


Figura 46. Esquema subcuenca 0513_1 en RS-Minerve.

5.3.2 Subsistema del río Cinca

El subsistema del río Cinca como se mencionó previamente se compone de 5 cuencas y además estas se encuentran subdivididas en 21 subcuencas o unidades las cuales se presentan a continuación.

5.3.2.1 Cuenca del río Flumen

La cuenca del río Flumen se compone de 3 unidades o subcuencas como se presenta en la Figura 47 para una superficie total de 1499 Km².

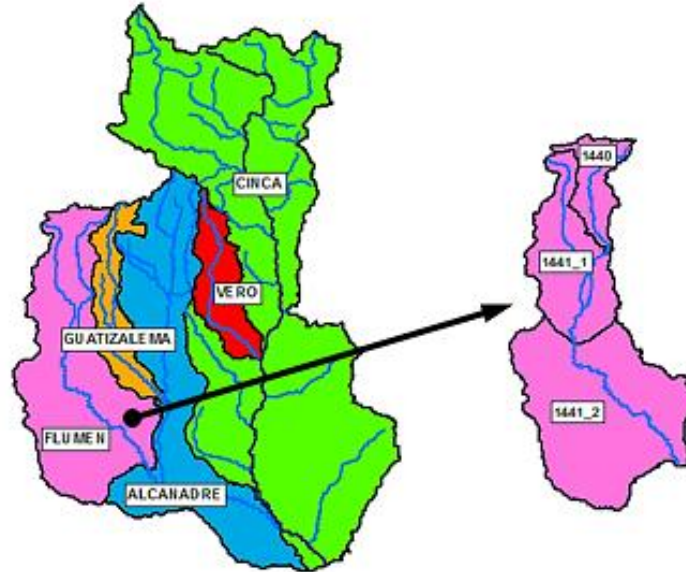


Figura 47. Unidades de la cuenca del río Flumen.
Fuente: Elaboración Propia.

5.3.2.1.1 Unidad 1440

La unidad 1440 es una subcuenca pequeña de 160 Km² ubicada en la cabecera del río Flumen, dentro de esta unidad se encuentran dos embalses, el primero el de Santa María de Belsué de capacidad 13 Hm³ y el segundo es el embalse de Montearagón con una capacidad de 43.18 Hm³. Sin embargo como se mencionó previamente no se tendrá en cuenta ninguno de ellos para el análisis ya que los datos del primer embalse son nulos y/o muy pocos y del segundo el inicio de operaciones fue en 2010 con lo cual queda por fuera del período en estudio que abarca hasta marzo de 2008. A su vez no se presentan demandas de ningún tipo.



Figura 48. Unidad 1440.
Fuente: Elaboración Propia.

La estación de aforo que recopila los caudales circulantes por el río Flumen correspondientes a esta unidad es la 9190-Quicena y se utilizará todo el período base de estudio de 1980 a 2008. Cabe destacar que este río no es muy caudaloso.

Con respecto a la calibración mostrada en la Figura 49 para el ajuste de los picos altos evaluado por el índice de Nash se obtuvieron buenos resultados con 0.82 como se puede apreciar en donde en casi todos se ajustó la simulación excepto en los dos últimos picos donde se desfasa en $1 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$ aproximadamente, sin embargo es un desfase no muy influyente debido al poco caudal circulante. En cuanto a los flujos bajos el Nash Logarítmico se estableció en 0.76 donde en la mayoría de los puntos bajos se igualó a la realidad, como en la gran mayoría de las unidades las medias de los valores observados y simulados se asemejan demasiado bien teniendo un Bias Score unitario para este caso.

La validación se presenta en la Figura 50 donde ambos índices de Nash dieron como resultado 0.75, es decir un poco menores a los calculados en la calibración debido a ciertas disparidades, por ejemplo las diferencias entre los caudales punta se siguió manteniendo en $1 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$ aproximadamente sin embargo se ocasionó en más oportunidades que cuando se realizó la calibración causando una disminución de los 0.82 de la calibración. Respecto al Nash logarítmico se mantuvo casi igual solo disminuyendo 0.01, ya que su ajuste se siguió dando de manera similar. A su vez el Bias Score continuó demasiado alto por la similitud en los valores medios simulados y observados.

Teniendo en cuenta los resultados de la calibración y validación se puede decir que es bueno y muy bueno, debido a que la función objetivo es grande de 0.87 y 0.84 respectivamente.

En la subcuenca predominan las aportaciones subsuperficiales y subterráneas siendo muy similares, sobre las superficiales de escorrentía directa.

Calentamiento 1980-1983			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1983-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.82	Nash	0.75
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.76	Nash-In	0.75
HumIni	0.129	m	Pearson Correlation Coeff	0.91	Pearson Correlation Coeff	0.89
SUIni	0.002	m	Bias Score	1.00	Bias Score	0.99
SLIni	0.007	m	FUNC. OBJ	0.87	FUNC. OBJ	0.84

Tabla 29. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1440.

Parámetros Cuenca		
A	160.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	2.242	Adim
FC	0.173	m
PWP	0.092	m
SUMax	0.012	m
Kr	0.304	1/d
Ku	0.130	1/d
KI	0.018	1/d
Kperc	0.165	1/d

Tabla 30. Parámetros finales unidad 1440.

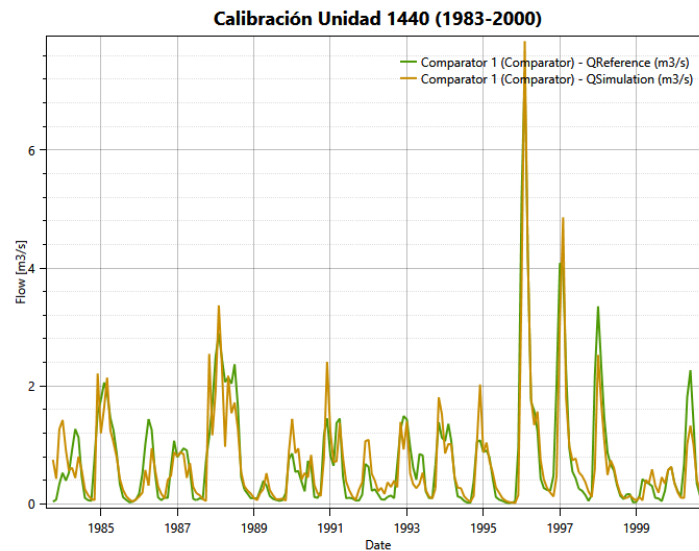


Figura 49. Calibración unidad 1440.

Fuente: RS-Minerve.

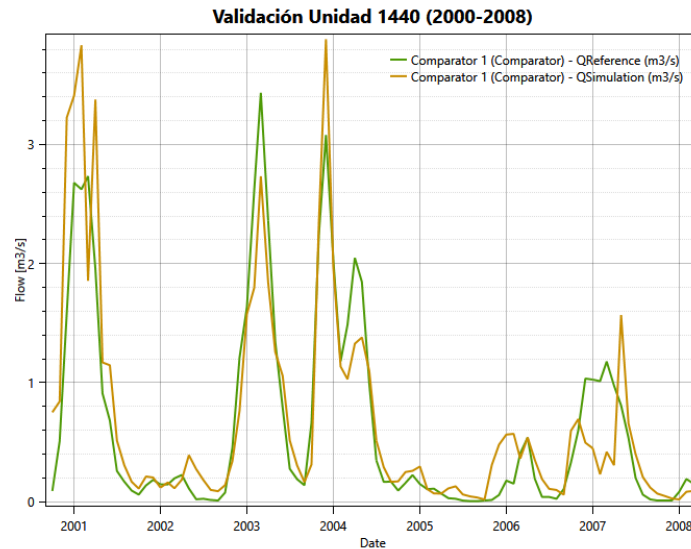


Figura 50. Validación unidad 1440.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.1.2 Unidad 1441_1

La unidad 1441_1 con un área de drenaje de 374 Km² recibe las aguas provenientes del río Isuela y el río Flumen incluyendo lo que proviene de la subcuenca 1440 aguas arriba. La estación de aforo que registra los caudales de este último río es la 9191-Barbues recibiendo las aguas tras la confluencia de estos dos ríos, se utilizará todo el período base de estudio de 1980 a 2008. Como se mencionó previamente este río no es muy caudaloso y tampoco lo es el Isuela. A diferencia de la subcuenca de cabecera, esta unidad si presenta demandas considerables agrícolas de 21.82 Hm³/s y unos retornos de 13.18 Hm³/año con lo que su régimen está alterado y no se rige naturalmente.

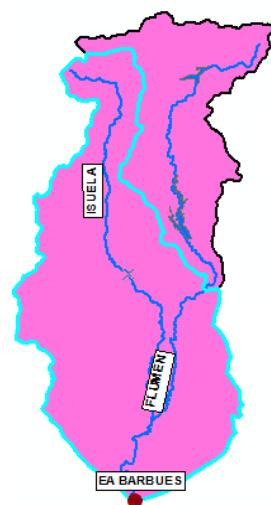


Figura 51. Unidad 1441_1.
Fuente: Elaboración Propia.

Se obtuvieron buenos resultados para las dos fases de análisis, calibración y validación teniendo en global la función objetivo 0.77 y 0.81 respectivamente, lo cual es un muy buen resultado sabiendo que la cuenca ya viene alterada.

En la fase de calibración mostrada en la Figura 52 el índice de Nash obtenido fue de 0.72 uno bueno, ya que como se puede apreciar se ajusta bien a los picos de caudal teniendo pequeñas diferencias, en donde la más representativa es en junio del 2000 con 1.6 m³/s*mes de infravaloración de la simulación. Si se evidenciaron diferencias más repetitivas en los valores bajos como lo demuestra el Nash-In de 0.50, donde en varias ocasiones en general el comportamiento fue que la simulación era un poco más elevada que la realidad, sin embargo estas diferencias no son tan elevadas siendo menos de 1 m³/s*mes.

En cuanto a la validación sucede prácticamente el mismo comportamiento que la calibración, teniendo pequeñas diferencias repetitivas en los flujos bajos y un buen ajuste en los picos altos, esto se presenta en la Figura 53.

Los valores medios de las dos series de calibración y validación con respecto a la realidad y lo simulado se ajustan bien generando un balance entre los excesos y los déficits teniendo un Bias Score perfecto unitario.

De la aportación de la propia subcuenca, la que predomina es la aportación subterránea sobre la subsuperficial, en cuanto a la superficial es casi nula debido a la alta capacidad de campo 0.65 m de la misma.

Calentamiento 1980-1983			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1983-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.72	Nash	0.79
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.50	Nash-In	0.54
HumIni	0.122	m	Pearson Correlation Coeff	0.86	Pearson Correlation Coeff	0.91
SUIni	0.001	m	Bias Score	0.98	Bias Score	0.99
SLIni	0.006	m	FUNC. OBJ	0.77	FUNC. OBJ	0.81

Tabla 31. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1441_1.

Parámetros Cuenca		
A	374.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	2.283	Adim
FC	0.650	m
PWP	0.471	m
SUMax	0.063	m
Kr	0.432	1/d
Ku	0.076	1/d
Kl	0.005	1/d
Kperc	0.171	1/d

Tabla 32. Parámetros finales unidad 1441_1.

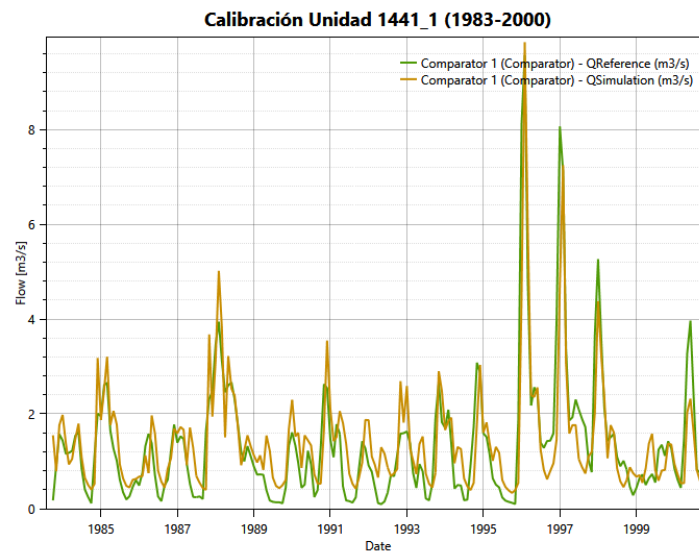


Figura 52. Calibración unidad 1441_1.
Fuente: RS-Minerve.

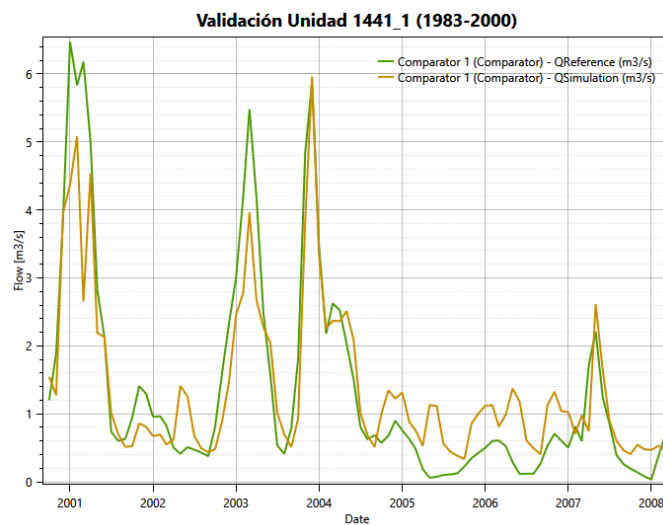


Figura 53. Validación unidad 1441_1.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.1.3 Unidad 1441_2

Recibiendo las aportaciones de la unidad 1441_1 de aguas arriba, la unidad 1441_2 tiene una extensión de 965 Km² siendo la más grande de la cuenca del río Flumen, la estación de la cual se tomaron los datos de caudales aforados es la 9094-Albalatillo la cual se ubica aproximadamente a 7 kilómetros antes de la desembocadura de dicho río en el Alcanadre, la simulación inicia en el 1992 debido a que esta estación inició operaciones en tal año.

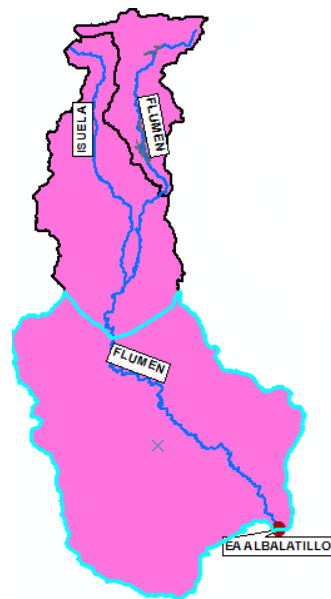


Figura 54. Unidad 1441_2.
Fuente: Elaboración Propia.

La mayoría del territorio que compone esta subcuenca está compuesta por zonas de regadíos del sector agrícola, para los que su mayor parte de demandas de agua son suplidas por los canales de Monegros, del Cinca y del Flumen, los cuales parten del embalse de La Sotonera, del Grado y del mismo canal de Monegros respectivamente. La demanda restante es suplida por el río Flumen con aproximadamente 23 Hm³/año, también al sistema de esta unidad ingresan algunos retornos de agua de 41 Hm³/año provenientes de los regadíos que son suplidos por los canales, esta última demanda y retornos fueron incluidos en la presente modelación de la unidad 1441_2. Toda esta situación se puede apreciar la siguiente Figura 55, en la parte inferior izquierda:



Figura 55. Regadíos zona baja de las cuencas de los ríos Flumen, Guatzalema y Alcanadre.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro, (2007b).

En la calibración mostrada en la Figura 56 se evidencia que la simulación intenta asemejarse a lo observado sin embargo en muchos puntos se queda corta afectando los dos índices de Nash en gran proporción con un 0.36 para el Nash normal y 0.37 para el logarítmico.

Con respecto a la validación presentada en la Figura 57 sucede similar a la calibración en la que el caudal simulado se intenta asemejar a la realidad pero no lo logra tan exitosamente, sin embargo si lo hace mejor que esa calibración aumentando ambos coeficientes de Nash a 0.59.

Así como en las cuencas aguas arriba 1440 y 1441_1 también en esta la aportación predominante de la misma subcuenca es la subterránea que es mayor a la superficial y subsuperficial, debido en parte también al alto coeficiente de percolación de 0.701 1/d.

La calibración y validación no tuvo grandes resultados como en las dos unidades aguas arriba disminuyendo a tener una función objetivo de 0.62 y 0.74

respectivamente, es decir una calibración aceptable y una validación buena, todo esto se debe principalmente a la alteración que se genera en la cuenca por todo el territorio agrícola que genera demandas y a su vez por los retornos previamente expuestos, haciendo que ingrese más agua al sistema afectando gravemente el régimen natural de la subcuenca y su comportamiento haciendo que sea un poco dificultosa su modelación. También se debe tener en cuenta que los datos de demandas y retornos no se tienen exactos sino valores mensuales que se van repitiendo en toda la serie histórica al ser tomados del modelo de gestión de Aquatool.

Calentamiento 1992-1995			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1995-2003		2003-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.36	Nash	0.59
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.37	Nash-In	0.58
HumIni	0.039	m	Pearson Correlation Coeff	0.80	Pearson Correlation Coeff	0.80
SUIni	0.000	m	Bias Score	0.93	Bias Score	1.00
SLIni	0.075	m	FUNC. OBJ	0.62	FUNC. OBJ	0.74

Tabla 33. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1441_2.

Parámetros Cuenca		
A	965.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.000	Adim
FC	0.290	m
PWP	0.230	m
SUMax	0.030	m
Kr	0.202	1/d
Ku	0.022	1/d
KI	0.004	1/d
Kperc	0.701	1/d

Tabla 34. Parámetros finales unidad 1441_2.

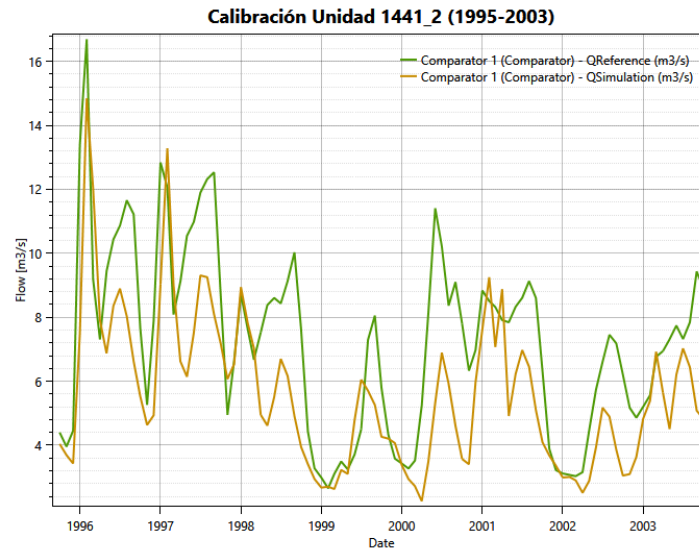


Figura 56. Calibración unidad 1441_2.
Fuente: RS-Minerve.

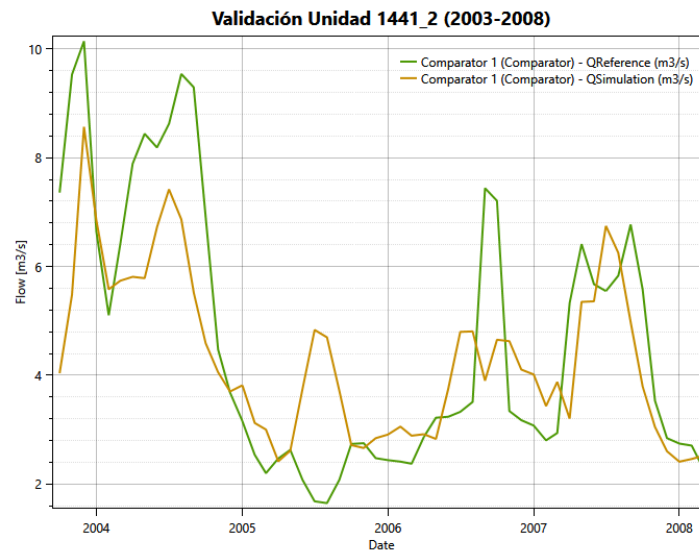


Figura 57. Validación unidad 1441_2.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.2 Cuenca del río Guatizalema

La cuenca del río Guatizalema incluye a 3 subcuencas o unidades como se presenta en la Figura 58 teniendo un área total de 362 Km².

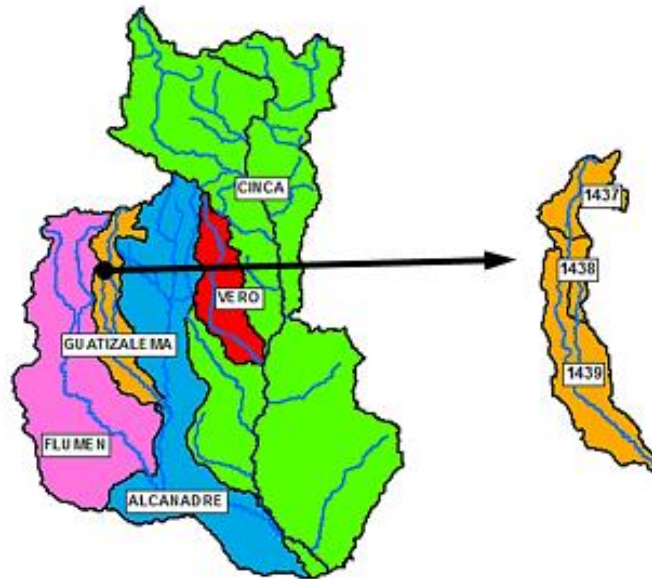


Figura 58. Unidades de la cuenca del río Guatizalema.
Fuente: *Elaboración Propia.*

5.3.2.2.1 Unidad 1437

La subcuenca de cabecera del río Guatizalema es la 1437 la cual acumula las aportaciones de 90 Km² de territorio hasta la entrada del embalse de Vadiello donde estas entradas son medidas por la estación 9841, la cual como se menciona en el numeral 8.1.2.4 sus años de datos buenos y confiables son a partir de 1985 con lo cual el estudio de esta cuenca se inicia en ese año.



Figura 59. Unidad 1437.
Fuente: *Elaboración Propia.*

A pesar que se supone que esta unidad es de tipo natural al no encontrarse demandas cercanas, la calibración y validación no fueron tan perfectas, sin embargo se obtuvieron buenos resultados por encima de 0.70 de función objetivo global. Puede deberse a que no todas las demandas de la zona estén registradas en el modelo de gestión de Aquatool afectando la presente modelación.

En la calibración el índice de Nash obtenido es de 0.53 el cual se vio afectado por la diferencia aproximada de entre 2-2.5 m³/s*mes para los picos más elevados generados a principios de los años 1996, 1997, 1998 y 2000, similar sucede con el Nash logarítmico de 0.58 en el que las diferencias no son tan marcadas pero se repiten en más ocasiones, sin embargo estas diferencias mantiene el balance del Bias Score de las diferencias entre lo simulado y lo observado en valores medios. Situación exactamente igual en la validación en la que hay diferencias de hasta 1.5 m³/s*mes para los picos altos de 2001 y 2003 en especial, aunque el Nash aumentó del de la calibración de 0.53 a 0.60, así como el de tipo logarítmico de 0.58 a 0.64 teniendo un comportamiento similar tal como el Bias Score obtenido de 0.97.

La aportación de la propia cuenca más influyente es la subsuperficial o interflujo teniendo un comportamiento importante para la misma más que todo en el momento de los flujos altos, seguida por el flujo base.

Calentamiento 1985-1988			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1988-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.53	Nash	0.60
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.58	Nash-In	0.64
HumIni	0.089	m	Pearson Correlation Coeff	0.73	Pearson Correlation Coeff	0.84
SUIni	0.000	m	Bias Score	0.99	Bias Score	0.97
SLIni	0.022	m	FUNC. OBJ	0.71	FUNC. OBJ	0.76

Tabla 35. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1437.

Parámetros Cuenca		
A	90.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.000	Adim
FC	0.190	m
PWP	0.140	m
SUMax	0.059	m
Kr	0.184	1/d
Ku	0.313	1/d
KI	0.003	1/d
Kperc	0.233	1/d

Tabla 36. Parámetros finales unidad 1437.

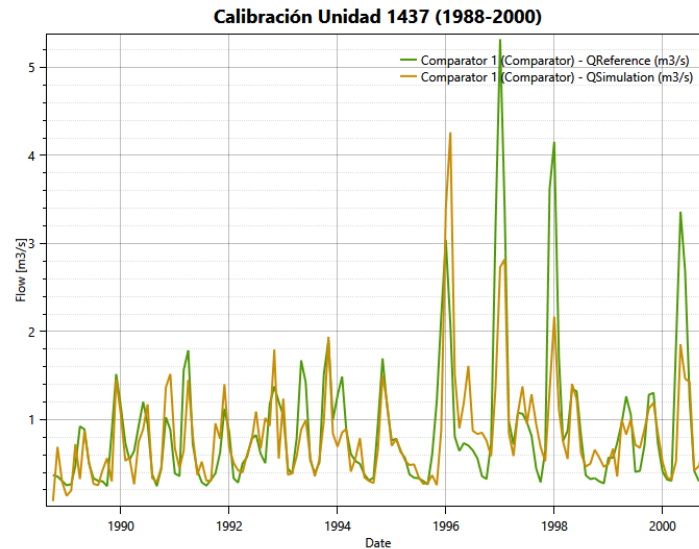


Figura 60. Calibración unidad 1437.
Fuente: RS-Minerve.

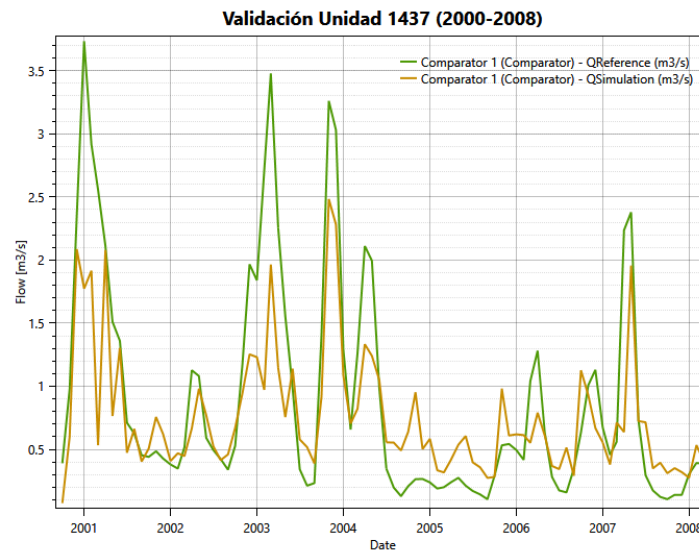


Figura 61. Validación unidad 1437.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.2.2 Unidad 1438

Esta unidad 1438 perteneciente al subsistema del río Cinca, modificada de su régimen natural posee 45 km³ de área drenante, haciéndola la más pequeña de toda la cuenca del Guatizalema, recibe las aguas provenientes de las salidas del embalse de Vadiello y al final la estación 9192-Sietamo registra el caudal circulante al final de esta unidad sobre el cauce del río Guatizalema.



Figura 62. Unidad 1438.
Fuente: Elaboración Propia.

La principal aportación proviene del mencionado embalse Vadiello ya que la subcuenca en sí es muy pequeña haciendo que sus propias aportaciones sean poco influyentes y casi nulas en el comportamiento de la subcuenca, ya que se encuentra altamente regulada por las sueltas. Además presenta unas pocas demandas agrícolas de 12.3 Hm³/Año aproximadamente registradas en el modelo de gestión de Aquatool las cuales se pueden apreciar en la Figura 55 previamente expuesta.

Se obtuvieron buenos resultados para la calibración y muy buenos para la validación tal como se presentan en la Tabla 37, por la influencia del embalse con 0.75 y 0.81 respectivamente de función objetivo, sin embargo el ajuste no fue perfecto como en otras unidades que recibían las sueltas de algún embalse debido a la presencia de esas demandas agrícolas.

Tanto para la calibración y validación mostradas en la Figura 63 y Figura 64 respectivamente, se identifica un comportamiento similar de la simulación tratando de ajustarse a los picos altos teniendo algunas diferencias en los mismos no tan considerables excepto por una en la validación en enero de 2001 que se tiene 1.8 m³/s*mes sin embargo al tratarse de valores mensuales no es tan influyente. En cambio para los valores de flujo bajos y/o picos bajos el Nash-In y la simulación se comportaron un poco más irregular teniendo pequeñas diferencias en repetidas ocasiones pero nunca superando los 0.5 m³/s*mes, obteniendo 0.53 para calibración

y 0.67 en validación. Y como casi en todas las unidades el índice de Bias Score se comporta muy bien dándole una gran ayuda a la función objetivo global.

De las pocas aportaciones de la propia subcuenca, las dos principales son el interflujo y la escorrentía directa, dejando muy de lado a la subterránea que es casi nula ya que su coeficiente de percolación es muy bajo y el de flujo base es prácticamente cero.

Calentamiento 1985-1988			Calibración 1988-2000		Validación 2000-2008	
Condiciones Iniciales			1988-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.70	Nash	0.72
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.53	Nash-In	0.67
HumIni	0.078	m	Pearson Correlation Coeff	0.91	Pearson Correlation Coeff	0.85
SUIni	0.000	m	Bias Score	0.87	Bias Score	1.00
SLIni	0.014	m	FUNC. OBJ	0.75	FUNC. OBJ	0.81

Tabla 37. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1438.

Parámetros Cuenca		
A	45.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	4.976	Adim
FC	0.238	m
PWP	0.030	m
SUMax	0.001	m
Kr	0.303	1/d
Ku	0.350	1/d
KI	0.000	1/d
Kperc	0.001	1/d

Tabla 38. Parámetros unidad 1438.

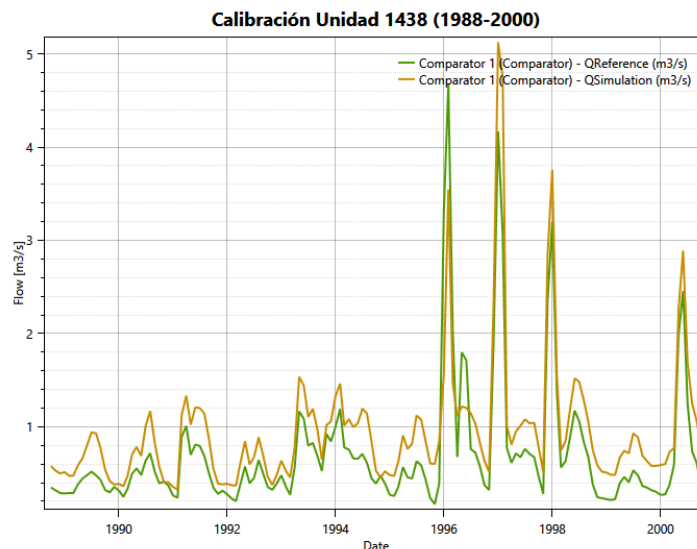


Figura 63. Calibración unidad 1438.

Fuente: RS-Minerve.

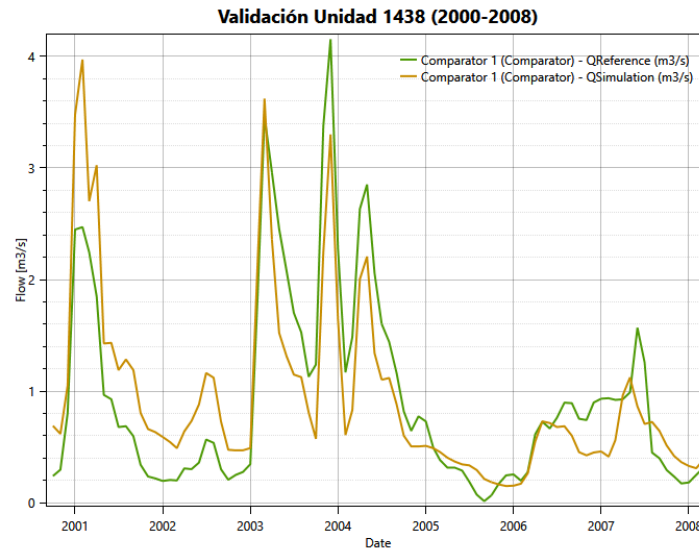


Figura 64. Validación unidad 1438.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.2.3 Unidad 1439

La unidad 1439 tiene una extensión de 227 Km² es la subcuenca final de la cuenca del río Guatizalema, la estación 9032-Peralta de Alcofea_Guatizalema que se tiene en cuenta para este análisis se ubica aproximadamente a 1 Km antes de la desembocadura en el río Alcanadre. Recibe las aguas por la margen izquierda del río Botella y de la unidad 1438 aguas arriba. Presenta algunas demandas agrícolas de regadíos las cuales son suplidas por el canal del Cinca proveniente del Embalse del Grado de la cuenca del río Cinca como se aprecia en la Figura 55.

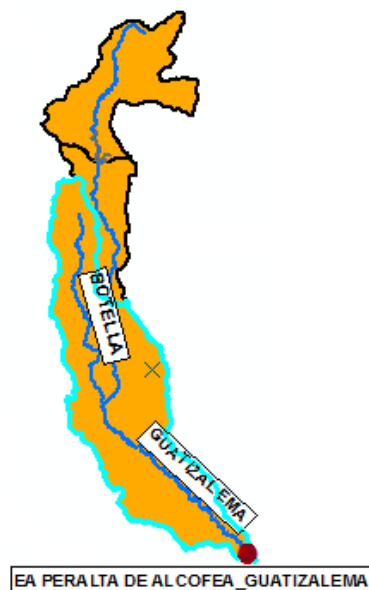


Figura 65. Unidad 1439.
Fuente: Elaboración Propia.

La simulación se realizó a partir de 1985 debido a que los datos de sueltas del embalse de Vadiello eran correctos desde ese año en adelante. La mayor parte del caudal simulado es prácticamente idéntico a las sueltas del embalse de Vadiello ubicado aguas arriba en la unidad 1438, es decir las propias aportaciones de la unidad 1439 no son muchas manteniéndose casi nulas. La subcuenca se encuentra regulada por tal embalse afectando el régimen natural de la misma.

Tiene un comportamiento muy similar a la anterior unidad en la que tanto para calibración como para validación la simulación tiende ajustarse más a los picos altos (Nash) que a los picos y/o flujos bajos (Nash-In), en especial el los flujos bajos para la calibración el comportamiento fue un poco irregular. Finalmente se tuvo una aceptable calibración con 0.68 de función objetivo y una buena de 0.75 para lo que es la validación.

Calentamiento 1985-1988			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1988-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.70	Nash	0.73
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.26	Nash-In	0.54
HumIni	0.065	m	Pearson Correlation Coeff	0.87	Pearson Correlation Coeff	0.92
SUIni	0.000	m	Bias Score	0.91	Bias Score	0.83
SLIni	0.007	m	FUNC. OBJ	0.68	FUNC. OBJ	0.75

Tabla 39. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1439.

Parámetros Cuenca		
A	227.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	4.990	Adim
FC	0.259	m
PWP	0.049	m
SUMax	0.077	m
Kr	0.354	1/d
Ku	0.396	1/d
KI	0.012	1/d
Kperc	0.000	1/d

Tabla 40. Parámetros finales unidad 1439.

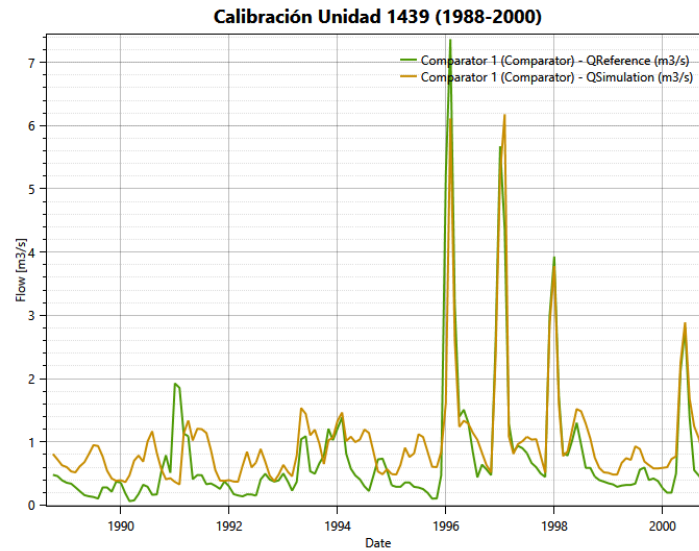


Figura 66. Calibración unidad 1439.
Fuente: RS-Minerve.

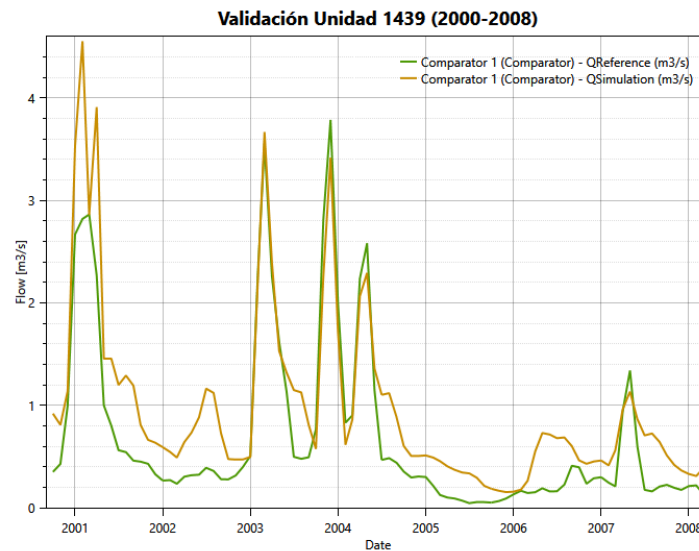


Figura 67. Validación unidad 1439.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.3 Cuenca del río Alcanadre

La cuenca del río Alcanadre se compone de 3 unidades o subcuencas como se presenta en la Figura 68 para una superficie total de 1529 Km².

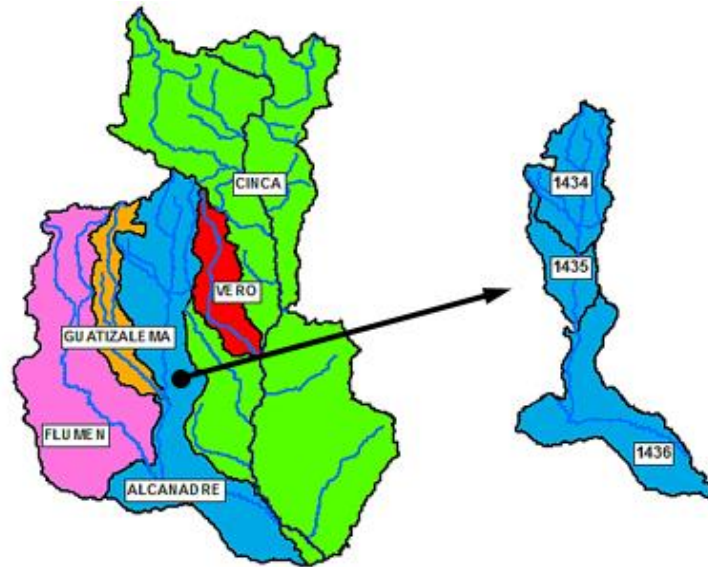


Figura 68. Unidades de la cuenca del río Alcanadre.
Fuente: Elaboración Propia.

5.3.2.3.1 Unidad 1434

La presente unidad 1434 perteneciente al subsistema del río Cinca es la subcuenca de cabecera de la cuenca del río Alcanadre, tiene una extensión de 501 Km², a lo largo de su recorrido van desembocando en el cauce principal los ríos Isuala, Mascun, Formiga y Calcon, posee una pequeña demanda de regadío de 4.5 Hm³/Año tomada del modelo de gestión de Aquatool previamente desarrollado, con lo cual se puede considerar que es una subcuenca casi en régimen natural ya que esta detracción no es tan significativa. La estación que afora el caudal que va por el río Alcanadre al final de esta unidad es la estación 9091-Lascellas y se utilizará el período óptimo base de simulación de 1980-2008.



Figura 69. Unidad 1434.
Fuente: Elaboración Propia.

La principal aportación de la propia subcuenca es la del interflujo generado que luego discurre hacia el cauce del río y la segunda en importancia es el flujo lento o base, el cual discurre casi constante a lo largo de la serie histórica.

Se obtuvo una buena calibración y una muy buena validación siendo 0.81 y 0.83 respectivamente evidenciando su casi régimen natural mostrados en la Figura 70 y Figura 71, en donde se tuvieron buenos ajustes para los picos altos y bajos representados por el índice de Nash y Nash-in, donde se presentan algunas diferencias en los picos altos en la calibración de alrededor de 3 m³/s*mes y de 5 m³/s*mes para el mayor pico de enero de 1996, en cambio para la validación estas diferencias no son tan marcadas ajustándose mejor aumentando de 0.69 a 0.76 este índice de Nash, bajando sus diferencias a 2 m³/s*mes e incluso un poco menos. Lo valores bajos se mantuvieron con la misma inestabilidad en calibración y validación en donde se obtuvieron valores similares de 0.72 y 0.71. En cuanto al estudio de los valores medios de las dos series, la simulada y la observada se tuvo un ajuste perfecto unitario.

Calentamiento 1980-1983			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1983-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.69	Nash	0.76
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.72	Nash-In	0.71
HumIni	0.137	m	Pearson Correlation Coeff	0.84	Pearson Correlation Coeff	0.87
SUIni	0.002	m	Bias Score	1.00	Bias Score	0.99
SLIni	0.009	m	FUNC. OBJ	0.81	FUNC. OBJ	0.83

Tabla 41. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1434.

Parámetros Cuenca		
A	501.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.083	Adim
FC	0.196	m
PWP	0.126	m
SUMax	0.089	m
Kr	0.187	1/d
Ku	0.207	1/d
KI	0.006	1/d
Kperc	0.152	1/d

Tabla 42. Parámetros unidad 1434.

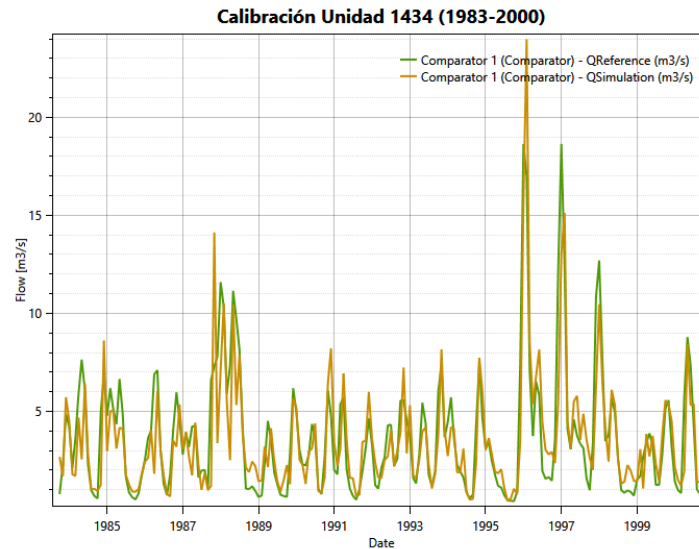


Figura 70. Calibración unidad 1434.
Fuente: RS-Minerve.

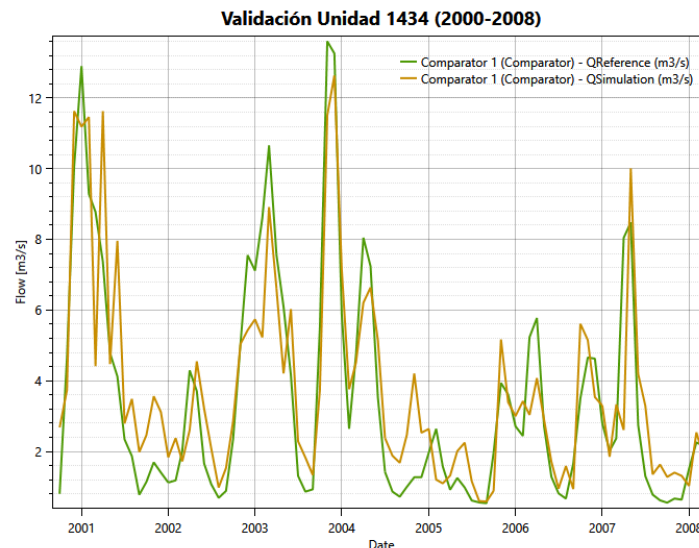


Figura 71. Validación unidad 1434.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.3.2 Unidad 1435

La unidad 1435 es la segunda subcuenca de la cuenca del río Alcanadre con un área de 264 Km², recibe las aguas provenientes de la unidad aguas arriba 1434, la estación de aforo que registra los caudales del río es la 9033-Peralta de Alcofea_Alcanadre para la cual se va a utilizar el período base 1980-2008 como de análisis, ésta se ubica a 1 kilómetro antes de la desembocadura del río Flumen en el Alcanadre. Posee demandas de regadíos que son suplidas en su mayoría por el canal del Cinca proveniente del Embalse del Grado, la restante de aproximadamente 14 Hm³/año es suplida por la propia subcuenca.



Figura 72. Unidad 1435.
Fuente: Elaboración Propia.

Las aportaciones de la propia subcuenca son muy pocas siendo prácticamente las aforadas las mismas que partieron de la unidad 1434 anterior.

Se obtuvo una buena calibración y validación con 0.77 y 0.76 respectivamente en cuanto a la función objetivo. En ambos casos se obtuvo un Nash-In un poco bajo en donde el ajuste no es muy propicio como se puede observar en la Figura 73 y Figura 74 los valores de flujo bajos teniendo por ejemplo sobreestimaciones de hasta 5 m³/s*mes para la calibración y 2.5 m³/s*mes en validación, teniendo más casos de irregularidad en la validación.

Calentamiento 1980-1983			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1983-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.67	Nash	0.72
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.61	Nash-In	0.51
HumIni	0.097	m	Pearson Correlation Coeff	0.82	Pearson Correlation Coeff	0.87
SUIni	0.000	m	Bias Score	1.00	Bias Score	0.95
SLIni	0.002	m	FUNC. OBJ	0.77	FUNC. OBJ	0.76

Tabla 43. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1435.

Parámetros Cuenca		
A	264.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	3.888	Adim
FC	0.650	m
PWP	0.295	m
SUMax	0.078	m
Kr	0.058	1/d
Ku	0.017	1/d
KI	0.003	1/d
Kperc	0.084	1/d

Tabla 44. Parámetros finales unidad 1435.

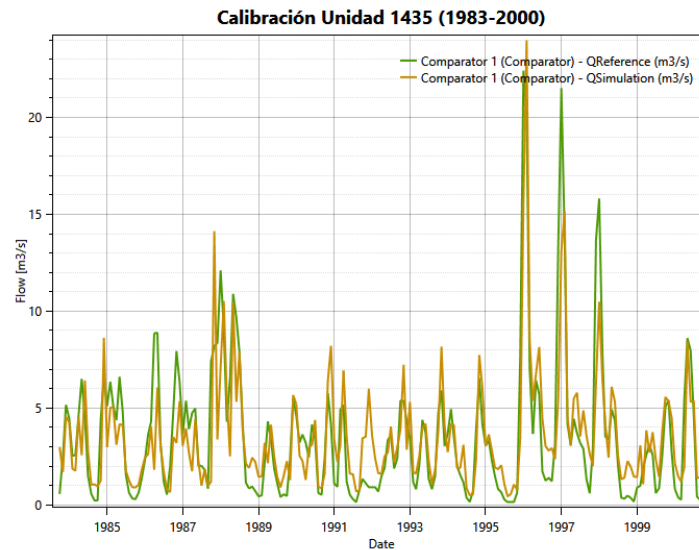


Figura 73. Calibración unidad 1435.

Fuente: RS-Minerve.

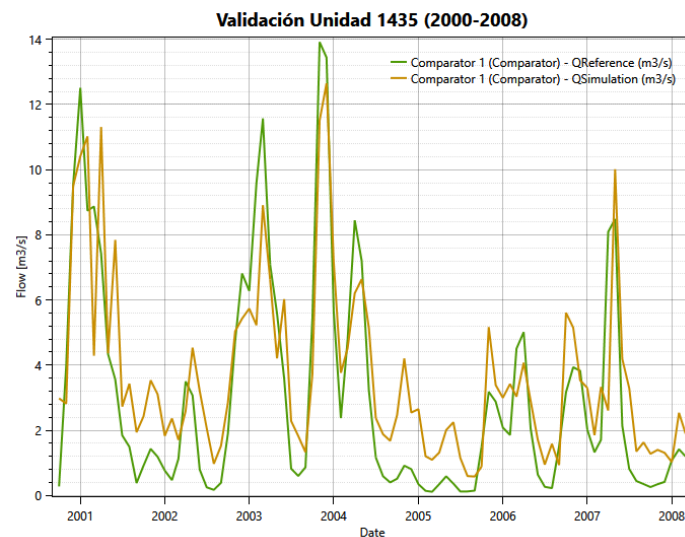


Figura 74. Validación unidad 1435.

Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.3.3 Unidad 1436

La unidad 1436 es la última subcuenca de la cuenca del río Alcanadre el cual desemboca en el río Cinca, recibe las aguas por margen izquierda de los ríos Guatizalema y Flumen, correspondiendo a las unidades de desembocadura 1439 y 1441_2 respectivamente, así como la 1435 de aguas arriba correspondiente a la zona superior del río Alcanadre. Tiene un área de drenaje considerable de 764 Km², la gran mayoría de su territorio se compone de zonas de riego para las cuales el canal del Cinca y el canal de Monegros ayudan a suplir sus necesidades hídricas, sin embargo a la propia subcuenca le corresponde una demanda de 29.97 Hm³/año aproximadamente, a su vez recibe agua de retornos propios y de los regadíos de la cuenca del río Flumen de 38.5 Hm³/año. Estas demandas y retornos, así como el embalse de Vadiello ubicado en la cuenca del río Guatizalema conllevan a que el régimen hídrico se afecte y no sea forma natural, alterando el comportamiento de la cuenca. Las zonas de riego se presentan en la parte baja de la derecha de la Figura 55 previamente expuesta.

La estación de aforo utilizada se encuentra sobre el río Alcanadre a un poco más de 800 metros antes de la desembocadura en el río Cinca, su referencia del R.O.E.A es 9193-Ballobar y el análisis es a partir de año 1989 ya que la estación no es muy antigua y tiene datos a partir de ese año.

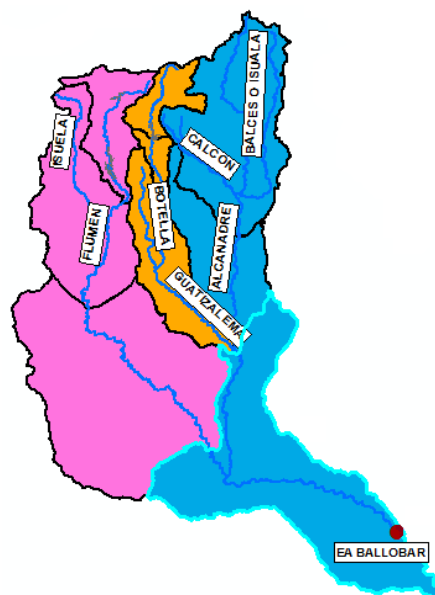


Figura 75. Unidad 1436.
Fuente: Elaboración Propia.

Como de costumbre el mejor de los índices es el Bias Score con 0.97 y 0.99 predominan respectivamente en calibración y validación, nivelando las sobreestimaciones con las subestimaciones. Para los flujos altos y/o crecidas el ajuste es aceptable destacándose para la calibración en enero de 1998 donde la simulación no se igualó a la realidad estando alrededor de 25 m³/s*mes por debajo mientras que para la misma fecha en 1996 y 1997 si se igualó correctamente. En estos mismos flujos altos de la validación no todos se acoplaron exactamente sino que tuvieron diferencias leves o mayores en general no siendo tan buena como en la calibración ya que estas diferencias varían entre 5 a 18 m³/s*mes. Para los flujos llamados bajos el índice de Nash-In también se considera aceptable debido a las irregularidades que se evidencian más en la validación donde se presentan variaciones del caudal simulado de hasta 10 m³/s*mes comparados con los de la calibración que son menores de 6 m³/s*mes.

En general se obtuvieron resultados buenos para las fases de calibración con 0.76 y validación 0.73 en la función objetivo que recopila los 4 índices tenidos en cuenta, a su vez cabe destacar que de la aportación propia de la cuenca la única influyente es la interflujo ya que prácticamente nada percola subterráneamente (Kperc=0.001) y todo fluye subsuperficialmente.

Cabe destacar que a pesar de ser una subcuenca de bien aguas abajo en la que desembocan varias cuencas previas y además trae consigo sus aportaciones de aguas arriba, se obtuvo un buen ajuste contando que se tenían muchas unidades cuyo régimen hídrico natural estaba afectado por las demandas, retornos y la presencia del embalse de Vadiello en la cuenca del río Guatizalema.

Calentamiento 1989-1991			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1991-2001		2001-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.64	Nash	0.57
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.61	Nash-In	0.53
HumIni	0.022	m	Pearson Correlation Coeff	0.83	Pearson Correlation Coeff	0.84
SUIni	0.000	m	Bias Score	0.97	Bias Score	0.99
SLIni	0.000	m	FUNC. OBJ	0.76	FUNC. OBJ	0.73

Tabla 45. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1436.

Parámetros Cuenca		
A	764.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.000	Adim
FC	0.240	m
PWP	0.170	m
SUMax	0.032	m
Kr	0.219	1/d
Ku	0.397	1/d
KI	0.111	1/d
Kperc	0.001	1/d

Tabla 46. Parámetros finales unidad 1436.

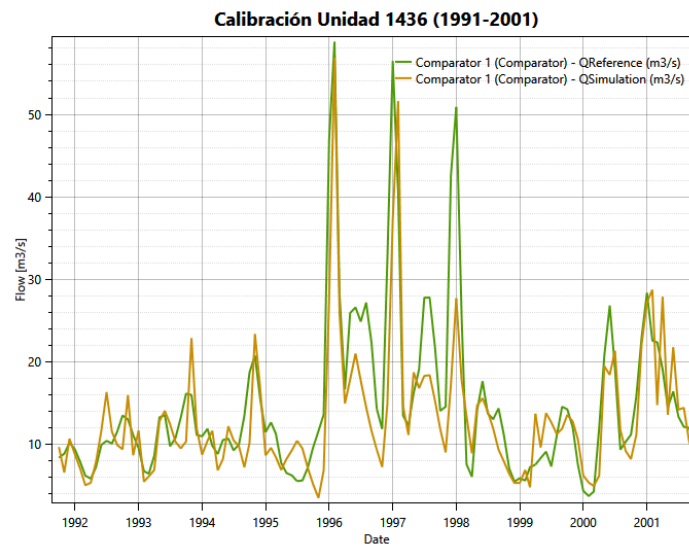


Figura 76. Calibración unidad 1436.

Fuente: RS-Minerve.

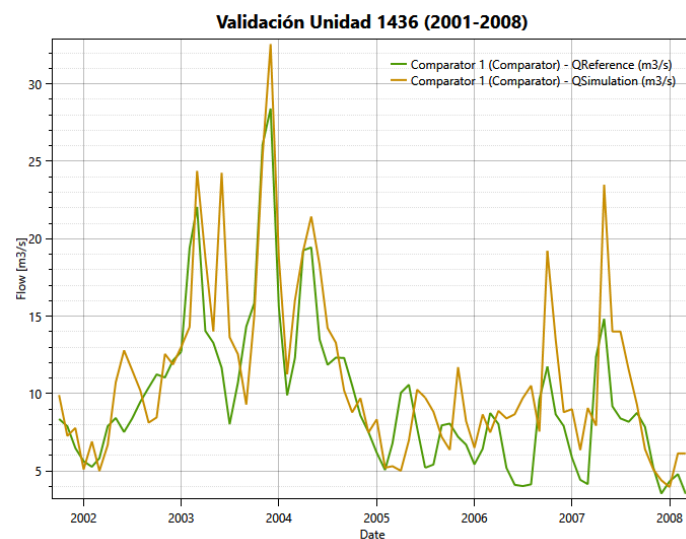


Figura 77. Validación unidad 1436.

Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.4 Cuenca del río Vero

La cuenca del río Vero incluye a 3 subcuencas o unidades como se presenta en la Figura 78 teniendo un área total de 390 Km².

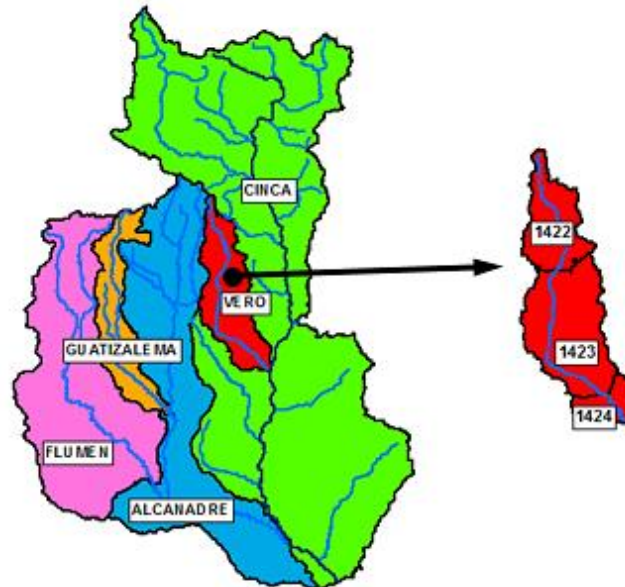


Figura 78. Unidades de la cuenca del río Vero.
Fuente: Elaboración Propia.

5.3.2.4.1 Unidad 1422

La unidad 1422 se encuentra dentro del subsistema del río Cinca y es correspondiente a la subcuenca de cabecera de la cuenca del río Vero, es una subcuenca pequeña poseyendo un área drenante de 110 Km², la estación de aforo utilizada es la Lecina con código R.O.E.A 9046 ubicada sobre el cauce del mismo río Vero. El período de análisis es el óptimo de 1980 a 2008. No posee embalses ni demandas considerables con lo que se puede asumir como en régimen natural.



Figura 79. Unidad 1422.
Fuente: Elaboración Propia.

Se obtuvo una calibración buena así como una validación del mismo tipo teniendo 0.75 y 0.78 respectivamente para la función objetivo recopilatoria, a pesar de que la subcuenca se consideraba natural sus resultados no fueron los esperados, a lo mejor existen en la zona algunas demandas que no se conocen o no se tomaron en cuenta.

El índice de Nash de calibración de 0.59 y de validación 0.62 se encuentran un poco bajos debido a las diferencias de lo observado con lo simulado en los picos altos teniendo diferencias de entre 2 y 2.5 m³/s*mes. En cuanto a los flujos bajos estos dieron mejor que los altos teniendo un Nash-In 0.69 y 0.72 respectivamente teniendo un comportamiento y ajuste muy similar tanto en calibración como validación, con respecto a las medias de ambas series se tiene un buen ajuste de Bias Score casi perfecto.

Las principales aportaciones de la subcuenca en sí son las subterráneas y subsuperficiales en orden de prioridad, siendo la escorrentía directa la menos influyente, la cual sólo actúa cuando se presentan las crecidas y picos principales de la serie histórica.

Calentamiento 1980-1983			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1984-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.59	Nash	0.62
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.69	Nash-In	0.72
HumIni	0.147	m	Pearson Correlation Coeff	0.81	Pearson Correlation Coeff	0.84
SUIni	0.002	m	Bias Score	0.92	Bias Score	0.95
SLIni	0.012	m	FUNC. OBJ	0.75	FUNC. OBJ	0.78

Tabla 47. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1422.

Parámetros Cuenca		
A	110.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.000	Adim
FC	0.240	m
PWP	0.170	m
SUMax	0.012	m
Kr	0.243	1/d
Ku	0.153	1/d
KI	0.012	1/d
Kperc	0.087	1/d

Tabla 48. Parámetros finales unidad 1422.

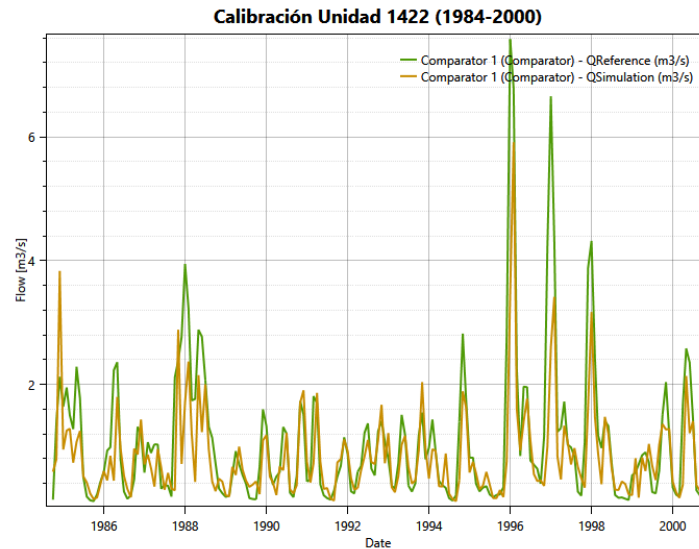


Figura 80. Calibración unidad 1422.
Fuente: RS-Minerve.

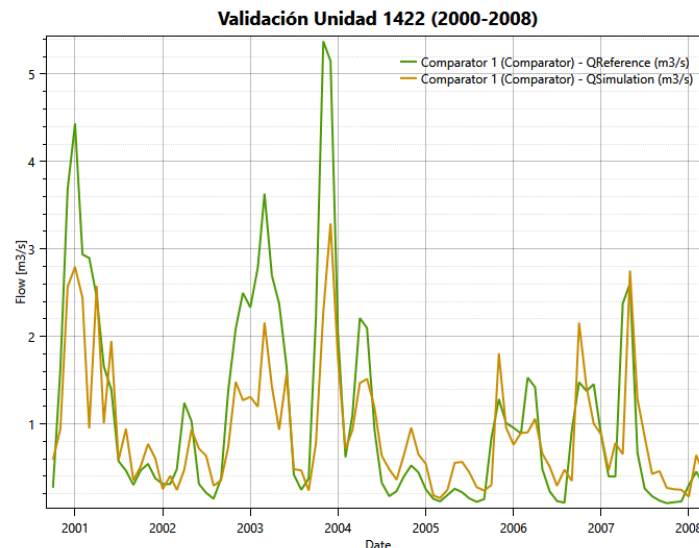


Figura 81. Validación unidad 1422.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.4.2 Unidad 1423

La unidad 1423 perteneciente a la cuenca del río Vero tiene posee un área de 235 Km², le ingresan las aguas provenientes de la unidad 1422 aguas arriba de la actual, sus caudales son medidos por la estación de aforo R.O.E.A 9095-Barbastro para la cual el período de estudio es el base de 1980-2008, a su vez se presenta una demanda de riego de alrededor de 21.7 Hm³/año registrada en el modelo de gestión de Aquatool, con lo cual se modifica el comportamiento natural de la subcuenca considerándose ahora como alterada.

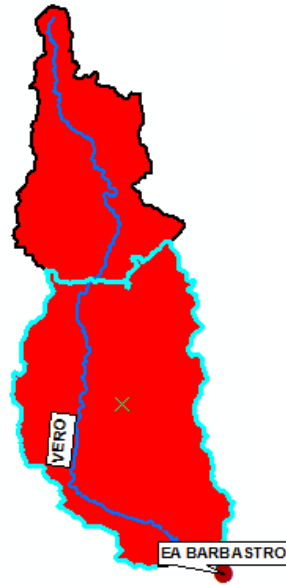


Figura 82. Unidad 1423.
Fuente: Elaboración Propia.

Se obtuvo una aceptable calibración con 0.64 en la función objetivo y una buena validación teniendo 0.68. En ambas situaciones los índices más afectados son los de Nash tanto el normal como el logarítmico, ya que como se puede apreciar en la Figura 83 y Figura 84 en primera instancia para los flujos altos en la calibración no se ajusta bien al más grande de ellos en donde la simulación lo subestima en $8 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$ en 1998 y genera algunos cuantos inexistentes, luego en la validación sucede algo similar ya que en 2004 la simulación se queda corta en $4 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$ y sobreestima algunos de 2007. Con respecto a los picos bajos pasa lo mismo en calibración y validación en donde la simulación intenta mantenerse como la observada sin embargo termina sobreestimando a esta última. Las diferencias entre las dos series en términos de medias son mínimas teniendo un 0.99 de Bias Score.

En cuanto a las aportaciones a la subcuenca, la principal es la proveniente de la unidad 1422 aguas arriba y en cuanto a las propias, la que más genera caudal es la subterránea en gran parte debido a su elevado coeficiente de percolación de 0.735, en segunda posición queda la aportación de interflujo mientras que la escorrentía directa es casi nula.

Calentamiento 1980-1983			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1983-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.48	Nash	0.53
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.45	Nash-In	0.49
HumIni	0.139	m	Pearson Correlation Coeff	0.64	Pearson Correlation Coeff	0.72
SUIni	0.001	m	Bias Score	0.99	Bias Score	0.99
SLIni	0.008	m	FUNC. OBJ	0.64	FUNC. OBJ	0.68

Tabla 49. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1423.

Parámetros Cuenca		
A	245.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.026	Adim
FC	0.556	m
PWP	0.399	m
SUMax	0.053	m
Kr	0.051	1/d
Ku	0.213	1/d
KI	0.008	1/d
Kperc	0.735	1/d

Tabla 50. Parámetros finales unidad 1423.

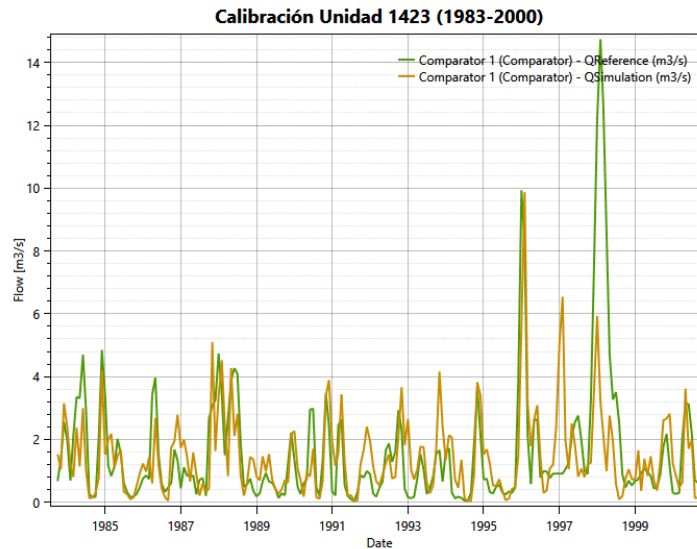


Figura 83. Calibración unidad 1423.

Fuente: RS-Minerve.

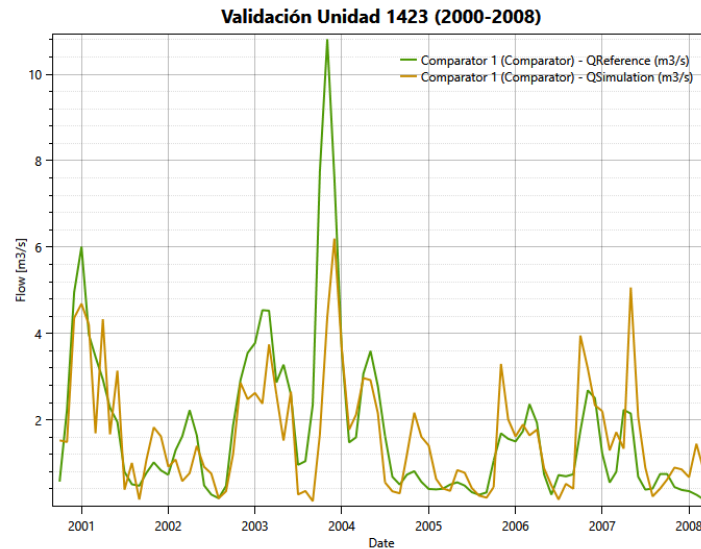


Figura 84. Validaci3n unidad 1423.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.4.3 Unidad 1424

La unidad 1424 perteneciente al subsistema del r3o Cinca, es peque1a con una extensi3n de 45 Km², recibe las aguas provenientes de la unidad 1423 aguas arriba, adem3s es la subcuenca final de la cuenca del r3o Vero ya que desemboca en el r3o Cinca, debido a que no exist3an estaciones de aforo cercanas a la zona se le asignaron los par3metros de la unidad aguas arriba mencionada con lo que su comportamiento para el per3odo 1983-2008 se presenta en la Figura 86 y Figura 87.

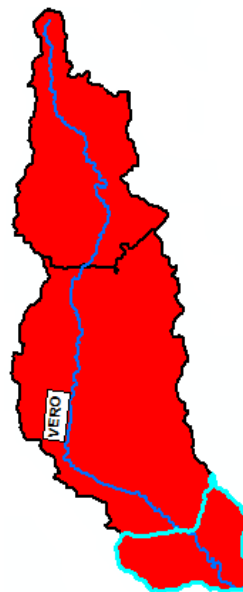


Figura 85. Unidad 1424.
Fuente: Elaboraci3n Propia.

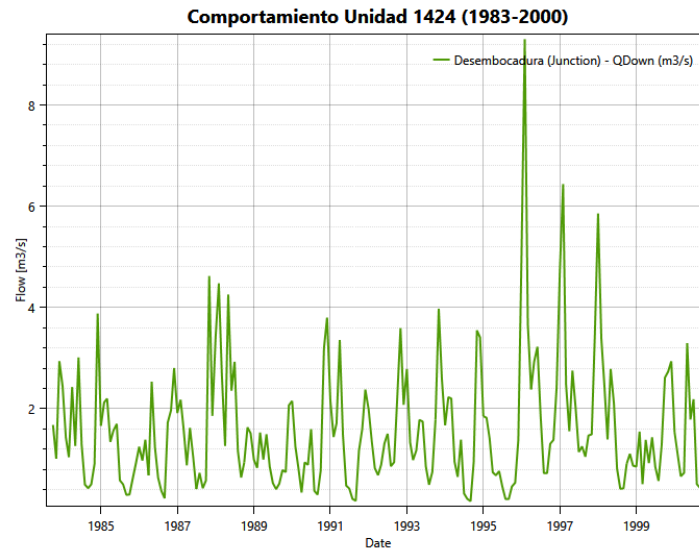


Figura 86. Comportamiento 1 unidad 1424.
Fuente: RS-Minerve.

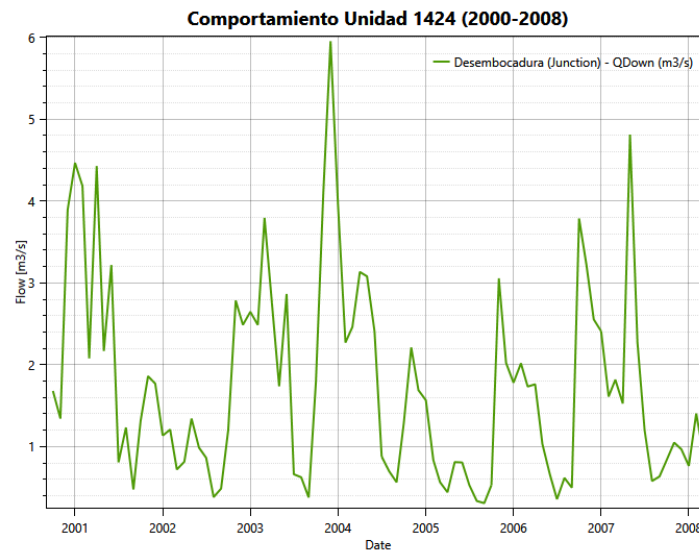


Figura 87. Comportamiento 2 unidad 1424.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.5 Cuenca del río Cinca

La cuenca del río Cinca se compone de 9 unidades o subcuencas como se presenta en la Figura 88 para una superficie total de 4300 Km² siendo la más grande de tanto del subsistema del río Cinca así como del sistema de explotación general Gállego-Cinca.

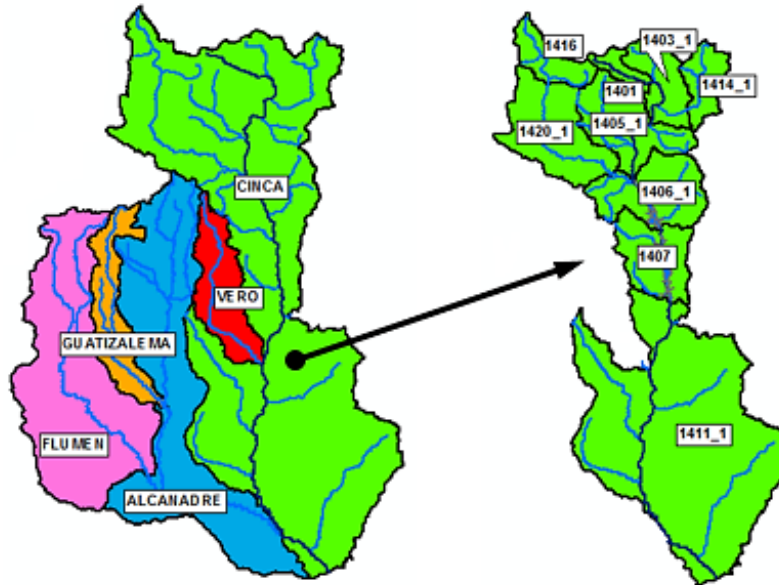


Figura 88. Unidades de la cuenca del río Cinca.
Fuente: Elaboración Propia.

5.3.2.5.1 Unidad 1414_1

La unidad 1414_1 es una de las subcuencas de cabecera de la cuenca del río Cinca, por esta subcuenca discurre el río Cinqueta el cual es un afluente de este último, es una zona que se cubre de nieve en época de invierno, no posee una gran extensión teniendo 157 Km² de territorio, la estación R.O.E.A a utilizar es la 9849-Embalse de Plandescún, éste es un embalse muy pequeño de 0.87 Hm³ el cual no se tuvo en cuenta al momento de describir y enumerar los embalses de la cuenca del río Cinca por su poco volumen de almacenamiento, sin embargo al no tener estaciones de aforo cercanas a esta unidad, se utilizaron sus registros históricos de caudales de entrada para realizar la modelación.



Figura 89. Unidad 1414_1.
Fuente: Elaboración Propia.

Como se menciona en el numeral 8.1.2.12 del Anejo 8.1 Estaciones de aforo los registros de esta estación no corresponden con el período base de simulación que se estaba teniendo en cuenta de 1980 a 2008, sino que es una estación que ya no se encuentra en funcionamiento teniendo registros entre 1950 y 1993, con lo que el período seleccionado fue de octubre de 1965 a septiembre 1993 para que tuviera la misma cantidad de años que el período base.

Debido a la presencia de nieve, los parámetros del modelo HBV correspondientes a la rutina de nieve ahora si son tenidos en cuenta para la simulación.

Se observa que los caudales aumentan a partir de abril generando un pico en junio y a partir de ahí vuelven a disminuir, todo esto es debido al deshielo que se produce por la cobertura de nieve en invierno, patrón que obviamente es repetitivo año tras año.

Tras la simulación se obtuvo un buen resultado tanto como para calibración y validación teniendo a la función objetivo que recopila los 4 índices tenidos en cuenta en 0.71 y 0.61 respectivamente. Se logró un aceptable ajuste a los picos de deshielo asimilándose al observado en muy pocos, ya que en la mayoría la simulación sólo alcanzó a la mitad o un poco más de la mitad del caudal de cada pico afectando al índice de Nash que se mantuvo en 0.59 en la calibración y 0.50 para la validación, sin embargo el caudal simulado se asimila en general a la forma del observado. En cuanto a los flujos bajos también coge la forma de la curva pero siempre los sobreestima un poco siendo relativamente irregular en la calibración y con aumento de esta irregularidad en la validación, logrando una equiparidad en las medias de las dos series para tener un excelente resultado de Bias Score.

La aportación que más está involucrada en esta subcuenca es la subterránea seguida por la subsuperficial, en gran parte por el coeficiente de percolación considerable de 0.601.

Calentamiento 1965-1968			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1968-1985		1985-1993	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.59	Nash	0.50
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.46	Nash-In	0.34
HumIni	0.108	m	Pearson Correlation Coeff	0.79	Pearson Correlation Coeff	0.63
SUIni	0.000	m	Bias Score	0.99	Bias Score	0.99
SLIni	0.055	m	FUNC. OBJ	0.71	FUNC. OBJ	0.61

Tabla 51. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1414_1.

Parámetros Cuenca		
A	157.00	Km ²
CFMax	16.495	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	1.053	°C
TTInt	2.243	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.068	Adim
FC	0.200	m
PWP	0.150	m
SUMax	0.091	m
Kr	0.152	1/d
Ku	0.114	1/d
KI	0.014	1/d
Kperc	0.601	1/d

Tabla 52. Parámetros finales unidad 1414_1.

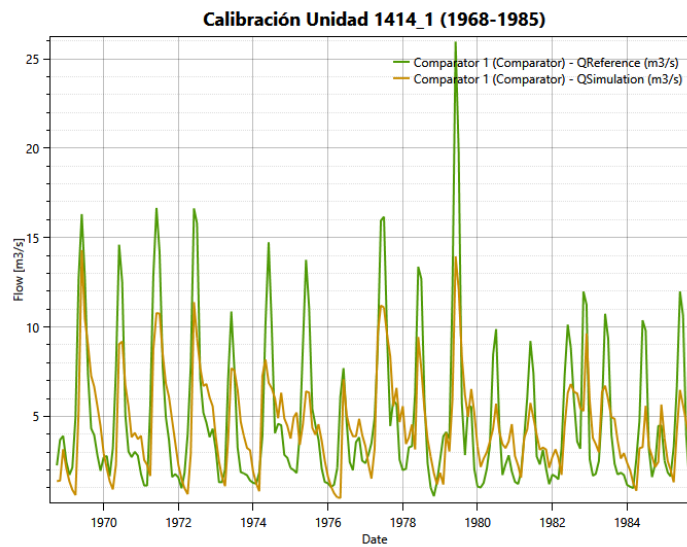


Figura 90. Calibración unidad 1414_1.

Fuente: RS-Minerve.

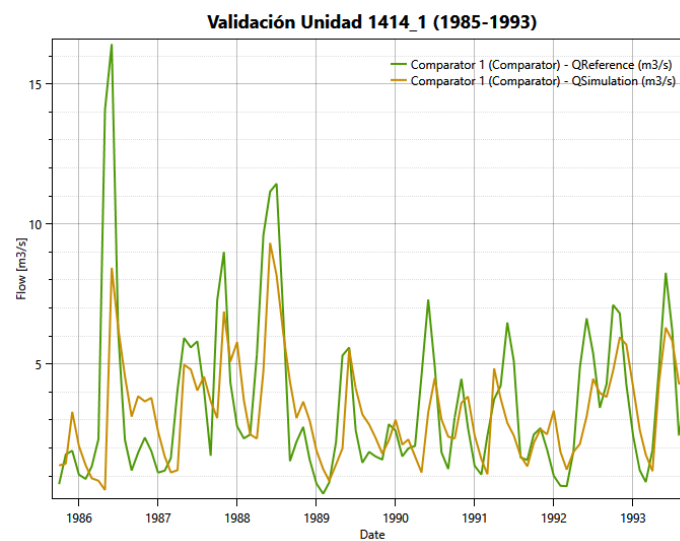


Figura 91. Validación unidad 1414_1.

Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.5.2 Unidad 1401

En la unidad 1401 de cabecera con un área de 73 Km² en donde hay presencia de nieve en épocas de invierno se produce el nacimiento del río Cinca, el cual aporta sus aguas al pequeño embalse de Pineta de 0.26 Hm³ de capacidad, la estación de aforo es la 9845 perteneciente a este embalse, la cual sólo tiene registros hasta septiembre de 1993, con lo cual el período de estudio base se ve cambiado hacia 1965-1993.

Se tuvieron grandes problemas con esta subcuenca ya que no se obtuvo algún resultado bueno, tanto para la calibración y validación la función objetivo fue mala y pésima siendo -4.93 y -3.17 respectivamente tal y como se puede observar en la Figura 93 y Figura 94, en donde por ningún lado se pudo obtener un ajuste cercano, la simulación no arrojó valores parecidos ni en flujos altos, bajos ni en la relación de los valores medios de la serie real con la generada, analizando en detalle las gráficas se puede ver que la simulación trata de coger la forma de los datos de entrada pero pareciera que hiciera falta agua para poder ajustarse de una manera apropiada es decir una mayor lluvia, este problema de calibración puede deberse a que los datos de precipitación son tomados en un solo punto (centroide de la cuenca) con ponderaciones y estimaciones enmalladas por parte de Spain02 v2.1, lo cual puede tener errores de simplificación en estas zonas con presencia de nieve, o también a alguna mala toma de datos para la estación 9845.



Figura 92. Unidad 1401.
Fuente: Elaboración Propia.

Calentamiento 1965-1968			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1968-1985		1985-1993	
HsnowIni	0.000	m	Nash	-1.94	Nash	-1.70
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	-7.03	Nash-In	-5.12
HumIni	0.227	m	Pearson Correlation Coeff	0.63	Pearson Correlation Coeff	0.65
SUIni	0.015	m	Bias Score	-11.40	Bias Score	-6.50
SLIni	0.081	m	FUNC. OBJ	-4.93	FUNC. OBJ	-3.17

Tabla 53. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1401.

Parámetros Cuenca		
A	73.00	Km ²
CFMax	12.336	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	0.486	°C
TTInt	1.111	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	3.339	Adim
FC	0.130	m
PWP	0.090	m
SUMax	0.072	m
Kr	0.228	1/d
Ku	0.066	1/d
KI	0.005	1/d
Kperc	0.482	1/d

Tabla 54. Parámetros finales unidad 1401.

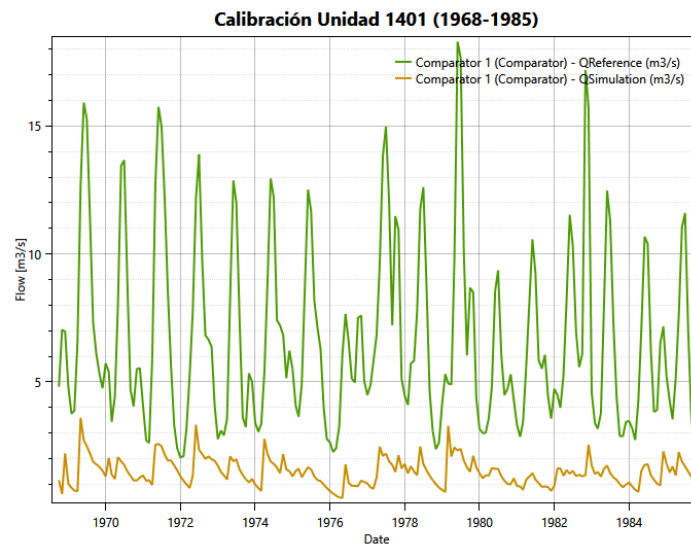


Figura 93. Calibración unidad 1401.

Fuente: RS-Minerve.

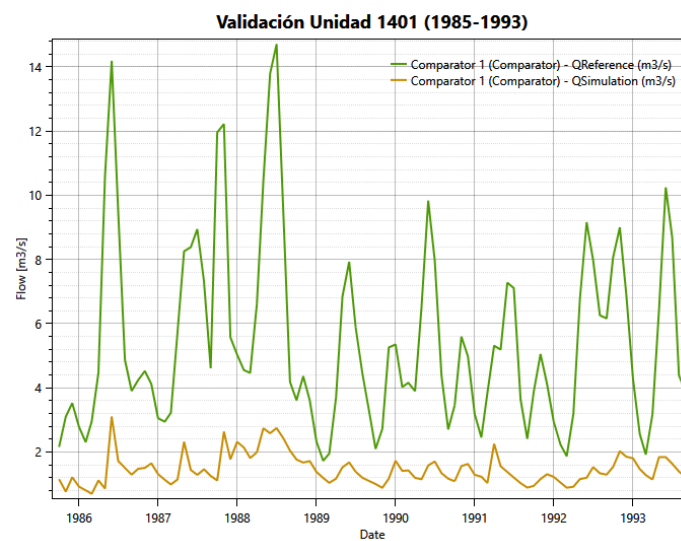


Figura 94. Validación unidad 1401.

Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.5.3 Unidad 1403_1

La unidad 1403_1 que hace parte del subsistema del río Cinca le ingresan las aportaciones provenientes de dos unidades, por margen izquierda la 1401 y por margen derecha 1414_1, posee una extensión de 223 Km², recibe las aguas del río Cinqueta y Barrosa, la estación de aforo utilizada es la de La Fortunada con código R.O.E.A 9172 con la cual vuelve a suceder como se menciona en el numeral 8.1.2.12 los registros de esta estación no corresponden con el período base que se estaba teniendo en cuenta de 1980 a 2008, sino que es una estación que ya no se encuentra en funcionamiento teniendo registros entre 1950 y 1993, con lo que el período seleccionado fue de 1965 a 1993 para que tuviera la misma cantidad de años que el período base. Presenta una pequeña demanda de riego de 3.3 Hm³/año.



Figura 95. Unidad 1403_1.
Fuente: Elaboración Propia.

La subcuenca tiene una parte de cabecera estando en cercanías de Los Pirineos con lo cual hay presencia de nieve, los parámetros del modelo HBV correspondientes a la rutina de nieve vuelven a ser tenidos en cuenta para la simulación.

Se observa que los caudales aumentan a partir de abril generando un pico en junio y a partir de ahí vuelven a disminuir, todo esto es debido al deshielo que se produce por la cobertura de nieve en invierno, patrón que obviamente es repetitivo año tras año.

Debido a que no se logró calibrar la unidad aguas arriba 1401, se utilizó como fuente al sistema las salidas del embalse de Pineta el cual tiene 0.26 Hm³ de capacidad, el cual al ser tan pequeño se puede asumir que los caudales de sus sueltas corresponden al régimen natural de esa unidad no afectándola mucho.

Se obtuvo un resultado común en la modelación hidrológica en la que la validación tuvo un comportamiento peor que la calibración teniendo como función objetivo 0.62 y 0.87 respectivamente, sin embargo éstas funciones objetivo son consideradas buenas.

La calibración tuvo en general buenos índices de eficiencia para los dos Nash y Pearson, en cuanto a Bias Score fue excelente, en la Figura 96 se puede apreciar cómo se tiene un buen ajuste teniendo pocas diferencias para los flujos bajos, una gran correlación y algunas fallas al momento de que el caudal simulado alcanzara los picos observados en donde se tiene diferencias en promedio de 4 m³/s*mes y una máxima en 1979 donde se queda corta en casi 20 m³/s*mes.

En cuando a los índices de eficiencia de la validación el que se destaca como siempre es la comparación de las medias de la serie simulada con la de referencia es decir el Bias Score que fue excelente y ayudó a mejorar la función objetivo ya que los otros 3 índices quedaron dentro del rango aceptable, esto sucede debido a que pesar de que la gráfica simulada va siguiendo de cerca a los datos verídicos existe un evento donde la diferencia entre lo simulado y observado fue bastante como se muestra en la Figura 97 en 1992 donde el flujo pico llegó hasta los 47 m³/s*mes en febrero sin embargo la simulación generó poco caudal en estos meses teniendo sólo 5 m³/s*mes para ese mismo mes afectando gravemente a estos índices de Nash, Nash-In y la correlación de Pearson por este evento singular obteniendo 0.40, 0.52 y 0.59 como resultado respectivamente.

Las principales aportaciones provienen de las dos subcuencas entrantes y en cuanto a sus propias aportaciones la que predomina es el flujo lento subterráneo seguida del interflujo el cual es influyente en el momento de los picos de caudal.

Calentamiento 1965-1968			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1968-1985		1985-1993	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.80	Nash	0.40
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.79	Nash-In	0.52
HumIni	0.138	m	Pearson Correlation Coeff	0.90	Pearson Correlation Coeff	0.59
SUIni	0.002	m	Bias Score	1.00	Bias Score	0.98
SLIni	0.136	m	FUNC. OBJ	0.87	FUNC. OBJ	0.62

Tabla 55. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1403_1.

Parámetros Cuenca		
A	223.00	Km ²
CFMax	19.948	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.899	°C
TTInt	2.397	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.224	Adim
FC	0.250	m
PWP	0.210	m
SUMax	0.086	m
Kr	0.298	1/d
Ku	0.172	1/d
KI	0.001	1/d
Kperc	0.382	1/d

Tabla 56. Parámetros finales unidad 1403_1.

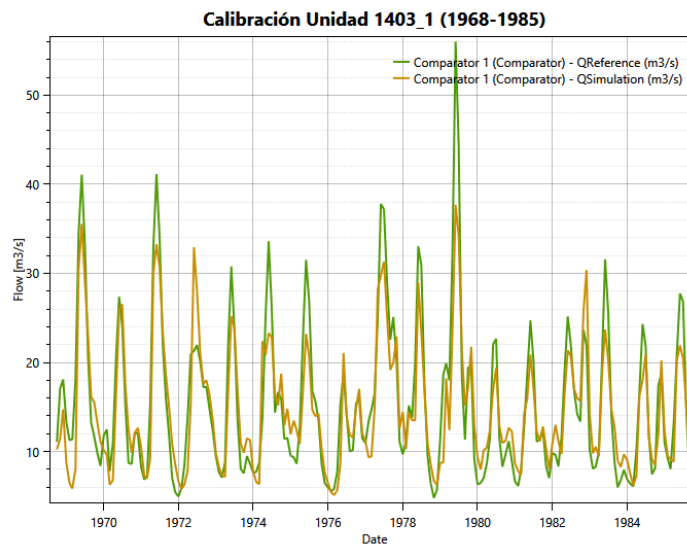


Figura 96. Calibración unidad 1403_1.

Fuente: RS-Minerve.

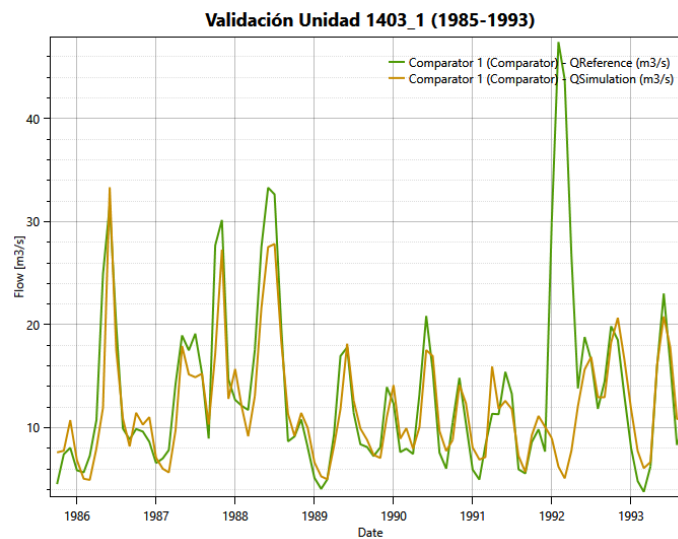


Figura 97. Validación unidad 1403_1.

Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.5.4 Unidad 1405_1

La subcuenca o unidad 1405_1 con una extensión de 382 Km² hace parte del subsistema del río Cinca, recibe las aguas que transmite la unidad aguas arriba 1403_1 y también la de varios ríos que desembocan en el cauce principal del río Cinca como lo son el Garona e Irués por margen derecha, Aso, Vello y Yesa por margen izquierda. No presenta detracciones por demandas que se aprecien en el modelo de gestión de Aquatool. Al final de la subcuenca aporta sus aguas al embalse de Mediano. La estación de aforo de referencia que se utilizó para el modelo de simulación hidrológica es la 9051-Escalona ubicada a un kilómetro y medio antes del embalse, no se utilizaron como referencia las entradas al embalse ya que el río Cinca no es el único que aporta aguas, también lo hacen los ríos Ara, Nata y Usia pertenecientes a otras subcuencas.



Figura 98. Unidad 1405_1.
Fuente: Elaboración Propia.

La estación ha estado sin funcionamiento desde septiembre de 1993 con lo que la modelación no se puede realizar para el periodo base de 1980 a 2008 sino con el nuevo período seleccionado para estos casos de 1965 a 1993 para que tuviera la misma cantidad de años que el período base.

A pesar de que la unidad 1405_1 no es de cabecera totalmente, los nacimientos de los ríos mencionados que desembocan en el río Cinca surgen de zonas en donde se genera nieve con lo que se tomarán en cuenta los parámetros del modelo HBV correspondientes a la rutina de nieve.

Se observa que los caudales aumentan a partir de abril generando un pico en mayo-junio y a partir de ahí vuelven a disminuir, todo esto es debido al deshielo que se produce por la cobertura de nieve en invierno, patrón que se repite año tras año.

La calibración y la validación tuvieron buenos resultados teniendo para ambas 0.71 de función objetivo que recopila los 4 índices de eficiencia tomados en cuenta. En la calibración la simulación tuvo problemas para ajustarse a los picos altos no llegándolos a alcanzar en su totalidad teniendo diferencias entre 5 m³/s*mes a casi 50 m³/s*mes con lo observado, éste último se presenta en junio 1979 afectando el índice de Nash que se encuentra en un regular 0.48 y a su vez la correlación entre datos para un Pearson de 0.86. Situación muy similar para el período de validación donde se tiene una diferencia de hasta 20 m³/s*mes de subvaloración de caudal mensual en 1988 y un poco menores para otros años. En los valores bajos de caudal la simulación trata de adaptarse teniendo éxito en gran parte de la serie, pero en otras no teniendo diferencias promedio de 10 m³/s*mes en ambas situaciones, también sucede que en los primeros meses se tiene un desfase por las condiciones iniciales tomadas del calentamiento que se evidencian más en la validación. Aun así en general las medias de los valores de las dos series, la simulada y la real se mantienen en un rango muy bueno teniendo un Bias Score de 0.89 y 0.93 para calibración y validación en concreto.

De la aportación intercuenca la principal y de mayor influencia es la de interflujo seguida de la subterránea o lenta, para dejar muy de lado la escorrentía directa.

Calentamiento 1965-1968			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1968-1985		1985-1993	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.48	Nash	0.51
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.60	Nash-In	0.57
HumIni	0.196	m	Pearson Correlation Coeff	0.86	Pearson Correlation Coeff	0.82
SUIni	0.008	m	Bias Score	0.89	Bias Score	0.93
SLIni	0.040	m	FUNC. OBJ	0.71	FUNC. OBJ	0.71

Tabla 57. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1405_1.

Parámetros Cuenca		
A	382.00	Km ²
CFMax	5.465	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	0.032	°C
TTInt	2.198	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.000	Adim
FC	0.281	m
PWP	0.212	m
SUMax	0.062	m
Kr	0.302	1/d
Ku	0.386	1/d
KI	0.020	1/d
Kperc	0.264	1/d

Tabla 58. Parámetros finales unidad 1405_1.

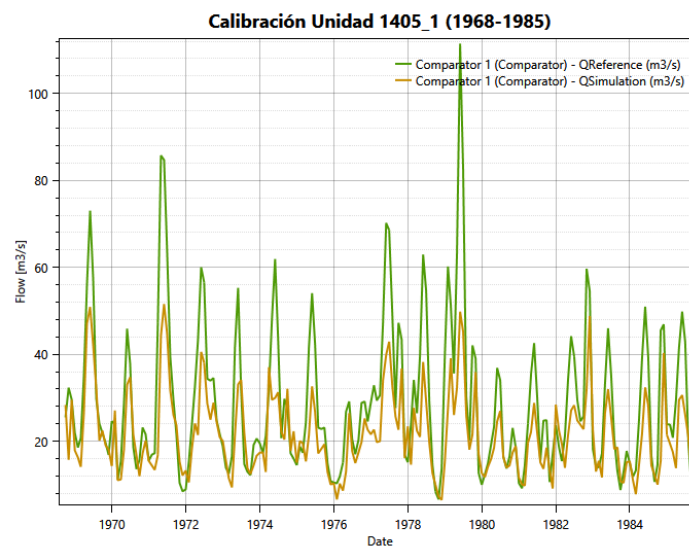


Figura 99. Calibración unidad 1405_1.

Fuente: RS-Minerve.

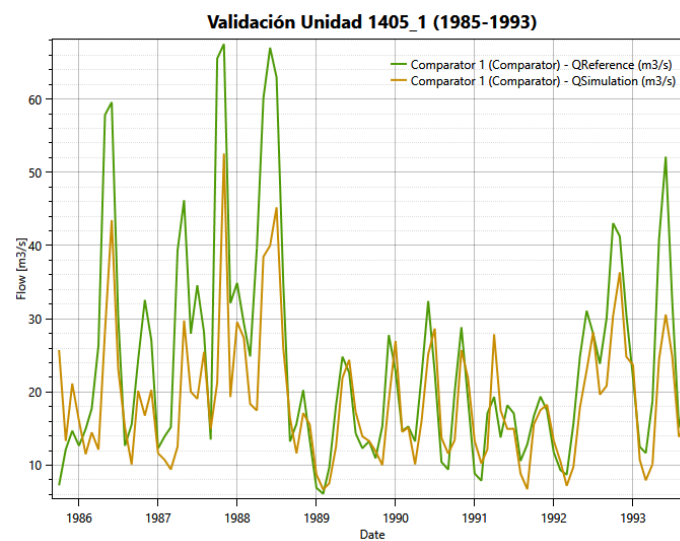


Figura 100. Validación unidad 1405_1.

Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.5.5 Unidad 1416

La unidad 1416 perteneciente a la cuenca del río Cinca tiene una superficie de 180 Km², es una subcuenca de cabecera en donde hay presencia de nieve en épocas de invierno, en esta subcuenca se genera el nacimiento de los ríos Arazas por margen derecha y Oral y Ara por margen izquierda, el río principal es este último. La estación de aforo que registra los caudales de tal río es la de Torla con código R.O.EA 9196, la cual como sucede con las estaciones de toda esta zona superior de la cuenca del río Cinca ya no se encuentra en funcionamiento y como se explicó en numerales anteriores se utilizó otro período de simulación diferente al de base, en este caso la estación tiene datos desde 1967 y 1993, con lo que ese mismo será el período utilizado, a su vez se repite el mismo comportamiento de las subcuencas con nieve donde el caudal aumenta drásticamente desde abril hasta junio y a partir de este mes disminuyendo gradualmente.



Figura 101. Unidad 1416.
Fuente: Elaboración Propia.

Los parámetros correspondientes a la rutina de nieve ya no serán los valores por defecto sino que si se tomarán en cuenta al momento de la calibración.

La función objetivo obtenida para la calibración fue 0.58 quedando en el rango aceptable mientras que la validación tuvo 0.60 considerada buena.

Los mayores problemas presentados se evidencian al momento de que los caudales simulados igualen los picos más altos de junio de los registrados por la estación de aforo donde en pocos lo lograban tanto en calibración como en validación, haciendo que el índice de Nash no fuera bueno siendo 0.38 en ambos casos, afectando a su vez a la correlación entre valores de Pearson con 0.75 y 0.68 respectivamente. En

cuanto a los valores medios de cada serie (la simulada y la observada) en la calibración no se alcanzó a nivelar correctamente (Bias Score=0.78) ya que hay muchos valores más bajos que la realidad, en cambio en la validación se obtuvo un mejor ajuste (Bias Score=0.93) ya que existen algunos períodos en donde a simulación es mayor que lo observado creando un balance entre los flujos altos y bajos.

Dentro las aportaciones de la misma subcuenca, la aportación subterránea es la mayor siendo muy constante en todo el período, sin embargo la interflujo era la que caracterizaba mejor al momento de los picos altos superando a la subterránea en esos momentos; la escorrentía superficial es muy poca en comparación con las otras dos.

Calentamiento 1967-1968			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1968-1985		1985-1993	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.38	Nash	0.38
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.40	Nash-In	0.43
HumIni	0.147	m	Pearson Correlation Coeff	0.75	Pearson Correlation Coeff	0.68
SUIni	0.004	m	Bias Score	0.78	Bias Score	0.93
SLIni	0.623	m	FUNC. OBJ	0.58	FUNC. OBJ	0.60

Tabla 59. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1416.

Parámetros Cuenca		
A	180.00	Km ²
CFMax	3.480	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.534	°C
TTInt	1.337	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	3.659	Adim
FC	0.150	m
PWP	0.095	m
SUMax	0.050	m
Kr	0.199	1/d
Ku	0.184	1/d
KI	0.003	1/d
Kperc	0.219	1/d

Tabla 60. Parámetros finales unidad 1416.

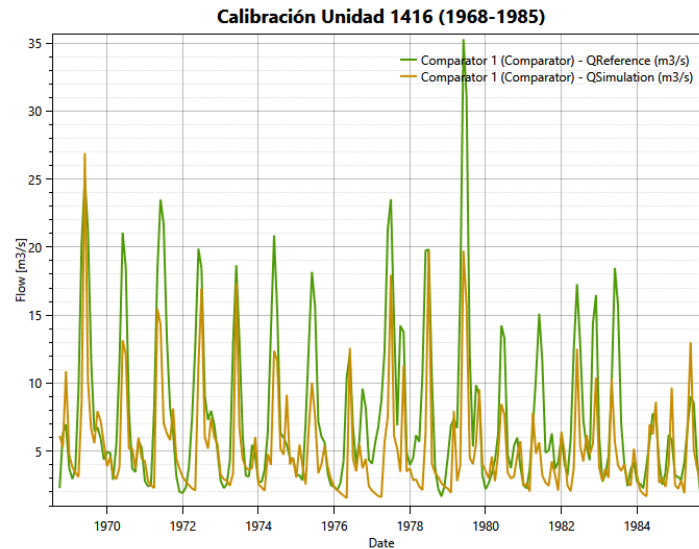


Figura 102. Calibración unidad 1416.
Fuente: RS-Minerve.

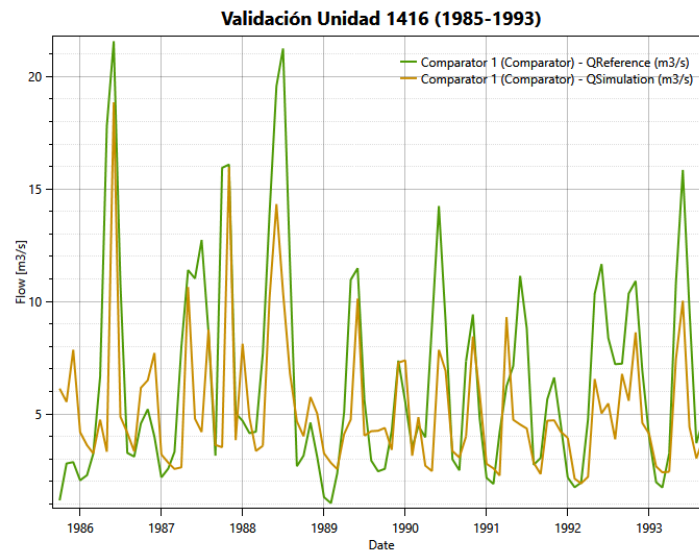


Figura 103. Validación unidad 1416.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.5.6 Unidad 1420_1

Por la unidad 1420_1 discurre el río Ara proveniente de la subcuenca aguas arriba 1416 recibiendo las aguas de esta última, tiene una extensión de 446 Km², la estación de aforo utilizada es la 9040-Boltaña para la cual si se puede utilizar el período de simulación base de 1980-2008, debido a que la unidad ya no presenta coberturas de nieve, la rutina de HBV nívea volverá a no ser tenida en cuenta, de hecho ya no se volverá a hacer ya que aguas abajo ya en ninguna subcuenca hay más presencia de nieve.



Figura 104. Unidad 1420_1.
Fuente: Elaboración Propia.

Se puede identificar que en la subcuenca se presentan dos períodos en donde las aportaciones se amplifican considerablemente, en general tienen un mínimo por los meses de septiembre-octubre aumentando poco a poco hasta un clímax en diciembre-enero, para luego disminuir y volver a aumentar a partir de marzo para tener un pico en mayo-junio y volver a disminuir. El comportamiento de los picos en mayo-junio se debe a que la unidad 1416 de aguas arriba presenta nieve causando deshielo y aumento de caudales a partir de abril, los cuales continúan a lo largo del río Ara.

Dado que la calibración fue aceptable para la unidad 1416 y apenas buena en la validación (0.60) era de esperarse que esta unidad no tuviera tan buenos resultados siendo así en parte ya que la calibración de la subcuenca fue aceptable y la validación fue buena, teniendo de función objetivo para la primera 0.62 y para la segunda 0.76, es decir la validación mejoró considerablemente.

La equiparidad entre los valores medios de la serie simulada y la observada se mantuvieron constantes, lo cual se evidencia con el índice de Bias Score obtenido de 0.96 y 1 para calibración y validación específicamente. En cuanto a la correlación entre las dos series se tiene uno muy bueno para validación y uno aceptable para calibración siendo 0.81 y 0.65 respectivamente, esta correlación de la calibración está afectada principalmente por el regular índice de Nash que se logró de 0.41 en gran parte debido a que los caudales simulados intentan ajustarse y llevar un comportamiento similar al observado sin embargo en la mayoría de los picos se quedaban cortos dejando hasta una brecha de 30 m³/s*mes en el más crítico, en cuanto en la validación los picos más altos fueron mejor alcanzados e incluso superándolos en 10 m³/s*mes, sin embargo como el ajuste era mucho mejor que en la calibración, el Nash se elevó hasta 0.65.

Con respecto a los flujos bajos revisados por el Nash logarítmico en algunos se sobreestiman generando una bajón en este índice tanto en calibración como validación, esto se puede evidenciar mejor en la Figura 106 de validación ya que al tener menos años se pueden apreciar mejor los valores.

Las principales aportaciones intercuenca son la subterránea de flujo lento seguida por la interflujo que participa grandemente al momento de los caudales altos, con una mínima participación de la escorrentía directa.

Calentamiento 1980-1983			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1983-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.41	Nash	0.65
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.46	Nash-In	0.58
HumIni	0.051	m	Pearson Correlation Coeff	0.65	Pearson Correlation Coeff	0.81
SUIni	0.002	m	Bias Score	0.96	Bias Score	1.00
SLIni	0.068	m	FUNC. OBJ	0.62	FUNC. OBJ	0.76

Tabla 61. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1420_1.

Parámetros Cuenca		
A	446.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.000	Adim
FC	0.150	m
PWP	0.110	m
SUMax	0.064	m
Kr	0.202	1/d
Ku	0.198	1/d
Kl	0.009	1/d
Kperc	0.299	1/d

Tabla 62. Parámetros finales unidad 1420_1.

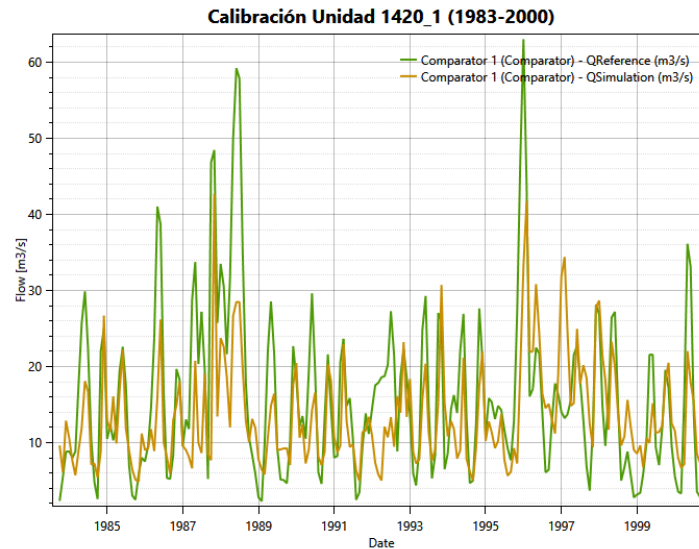


Figura 105. Calibración unidad 1420_1.
Fuente: RS-Minerve.

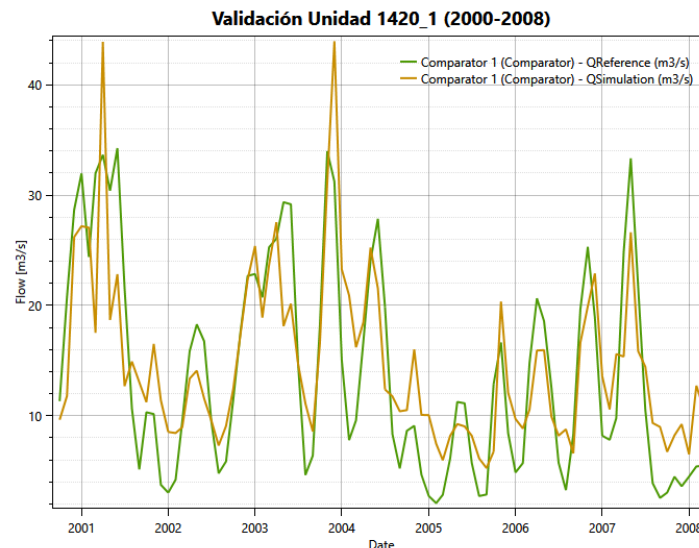


Figura 106. Validación unidad 1420_1.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.5.7 Unidad 1406_1

La unidad 1406_1 perteneciente al subsistema del río Cinca tiene un área de drenaje de 376 Km², en toda la longitud de la parte del río correspondiente a esta unidad se encuentra el embalse de Mediano el cual su superficie de inundación ocupa todo el cauce ya que tiene una capacidad grande de 434.63 Hm³ siendo el más grande de no sólo la cuenca del río Cinca sino de todo el sistema Gállego-Cinca en general, a éste le ingresan las aguas provenientes de las unidades aguas arriba 1405 y 1420_1, a su vez al cauce principal desembocan los ríos Nata y Usía por margen derecha y Sieste, Ena y Ara por la izquierda. No presenta demandas de agua considerables en la zona.



Figura 107. Unidad 1406_1.
Fuente: Elaboración Propia.

La estación a utilizada fue claramente la del embalse de Mediano con código R.O.E.A 9846 la cual registra sus entradas, pero a pesar que tenga datos entre 1970 y 2011 la modelación hidrológica no se realizó en ese período debido a que bien aguas arriba en la unidad 1403_1 se tomó como referencia la estación 9845-Embalse de Pineta y no las aportaciones de esa subcuenca ya que no se pudo realizar una buena calibración, esta estación 9845 tiene registro entre 1965 y 1993, con lo que combinando estas dos estaciones se impuso el período de simulación entre 1970 y 1993.

Debido al comportamiento de las subcuencas aguas arriba, esta continúa en general teniendo un aumento de caudales importante entre abril y junio aproximadamente para después ir disminuyendo hasta septiembre-octubre, desde donde poco a poco van tomando de nuevo fuerza las aportaciones y en algunos años teniendo algunas crecidas de caudal para el mes de diciembre.

Se obtuvo una buena calibración teniendo una función objetivo recopilatoria de 0.76 y una muy buena validación con 0.81, donde para ambas situaciones la serie simulada siguió correctamente la esencia de la observada.

En la calibración los caudales simulados no alcanzaron totalmente a todos los caudales punta registrados estando casi siempre por debajo de la realidad entre 5 m³/s*mes hasta 60 m³/s*mes para la diferencia más amplia en 1979 logrando así un Nash aceptable de 0.59, con respecto a los flujos bajos sucede similar pero pues no teniendo tantas diferencias como con los caudales punta haciendo que el Nash-In se

levante y llegue hasta 0.66 y debido a que la curva sigue de cerca a la de referencia, la correlación y el Bias fueron óptimos siendo 0.81 y 0.98 respectivamente.

Mientras que en la validación hubo una disminución de las aportaciones haciendo que los flujos fueran menores con lo cual al no tener caudales pico tan altos como en el período de calibración, la curva se ajustó mejor a ellos aumentando el Nash a 0.67 y haciendo que para los flujos bajos se tuviera también un ajuste positivo para un Nash-In de 0.74 lo cual se puede evidenciar en la Figura 109. Y al igual que en la calibración la curva sigue de cerca a la de referencia, la correlación y el Bias fueron óptimos siendo 0.82 y 1.00 respectivamente.

En esta subcuenca sucede lo contrario que en casi todas las anteriores de la cuenca del río Cinca, es decir ahora en la aportación propia de la subcuenca la que más influye es la interflujo siendo bien influyente, en cambio la subterránea es muy leve debido a su bajo coeficiente de percolación es decir poca agua ingresa a la zona inferior, y con respecto a la superficial esta no se destaca de las demás siendo muy pequeña.

Calentamiento 1970-1972			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1972-1987		1987-1993	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.59	Nash	0.67
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.66	Nash-In	0.74
HumIni	0.183	m	Pearson Correlation Coeff	0.81	Pearson Correlation Coeff	0.82
SUIni	0.003	m	Bias Score	0.98	Bias Score	1.00
SLIni	0.037	m	FUNC. OBJ	0.76	FUNC. OBJ	0.81

Tabla 63. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1406_1.

Parámetros Cuenca		
A	376.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.000	Adim
FC	0.291	m
PWP	0.204	m
SUMax	0.046	m
Kr	0.336	1/d
Ku	0.322	1/d
KI	0.102	1/d
Kperc	0.041	1/d

Tabla 64. Parámetros finales unidad 1406_1.

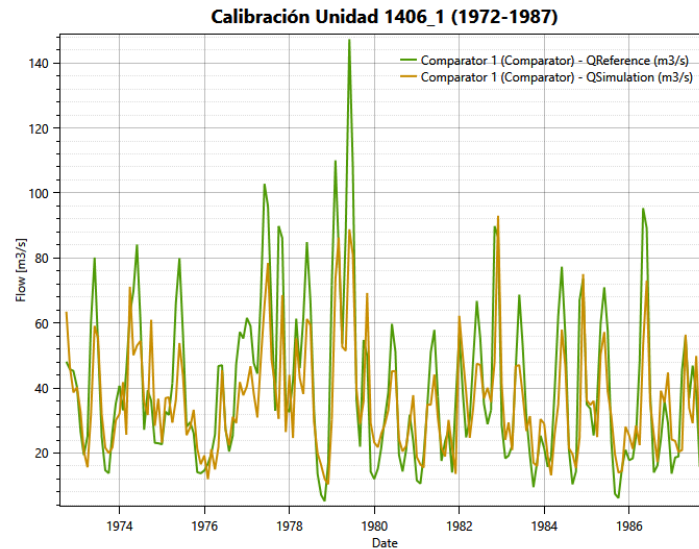


Figura 108. Calibración unidad 1406_1.
Fuente: RS-Minerve.

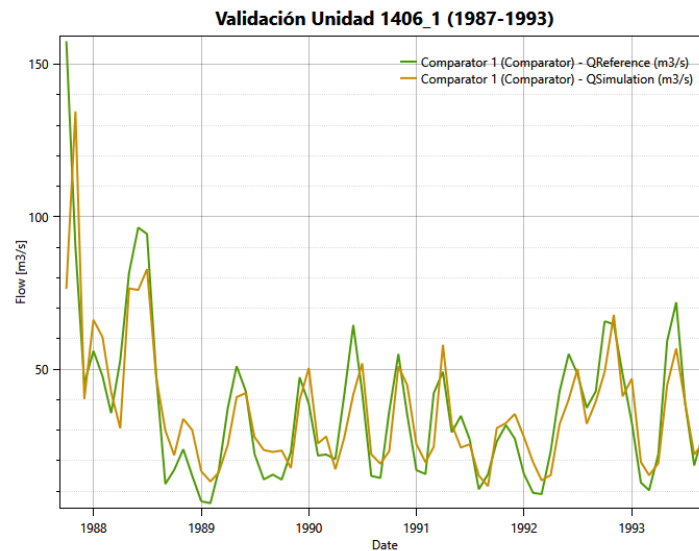


Figura 109. Validación unidad 1406_1.
Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.5.8 Unidad 1407

Al igual que la unidad 1406_1 tiene al embalse de Mediano, la unidad 1407 tiene al embalse de El Grado a lo largo de todo el cauce del río Cinca y también es grande teniendo una capacidad de 400 Hm³ siendo el segundo más grande de todo el sistema Gállego-Cinca, posee un área de drenaje de 300 Km² es una subcuenca muy alterada por la regulación de caudales que ejerce el embalse aguas arriba de Mediano recibiendo directamente sus sueltas y además las aportaciones de los ríos Susia y Naval que nacen en la presente unidad por margen izquierda y desembocan en el río Cinca, la estación utilizada es la 9847-Embalse de El Grado y el período de

modelación es el base de 1980-2008. No se presentan demandas en la zona que influyan como detracciones de agua. Cabe destacar que la zona de inundación del embalse de El Grado abarca todo el cauce del río Cinca de manera longitudinal y se ubica muy cerca del de Mediano estando a poco más de 2 kilómetros.



Figura 110. Unidad 1407.
Fuente: Elaboración Propia.

Su comportamiento en general se caracteriza por tener un aumento de caudales a partir de febrero-marzo llegando a su punto más alto en junio para luego descender paulatinamente, también en algunas ocasiones a partir de octubre se presenta el aumento de caudales para llegar a un pico en diciembre y luego descender de nuevo.

Como era de esperarse debido a la cercanía entre ambos embalses, prácticamente las salidas de el de Mediano son exactamente iguales a las entradas de El Grado causando que todos los índices de eficiencia tenidos en cuenta sea excelentes dando como resultado una calibración con función objetivo 0.99 y una validación de 1.00. Lo cual muestra claramente el efecto de regulación producido en esta zona.

Calentamiento 1980-1983			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1983-2000		2000-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.98	Nash	1.00
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.99	Nash-In	1.00
HumIni	0.137	m	Pearson Correlation Coeff	0.99	Pearson Correlation Coeff	1.00
SUIni	0.001	m	Bias Score	1.00	Bias Score	1.00
SLIni	0.009	m	FUNC. OBJ	0.99	FUNC. OBJ	1.00

Tabla 65. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1407.

Parámetros Cuenca		
A	300.00	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	4.111	Adim
FC	0.646	m
PWP	0.175	m
SUMax	0.060	m
Kr	0.067	1/d
Ku	0.011	1/d
KI	0.002	1/d
Kperc	0.419	1/d

Tabla 66. Parámetros finales unidad 1407.

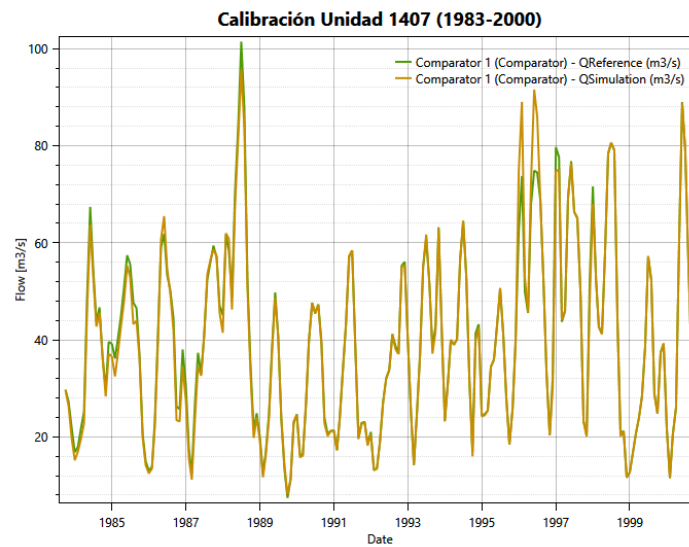


Figura 111. Calibración unidad 1407.

Fuente: RS-Minerve.

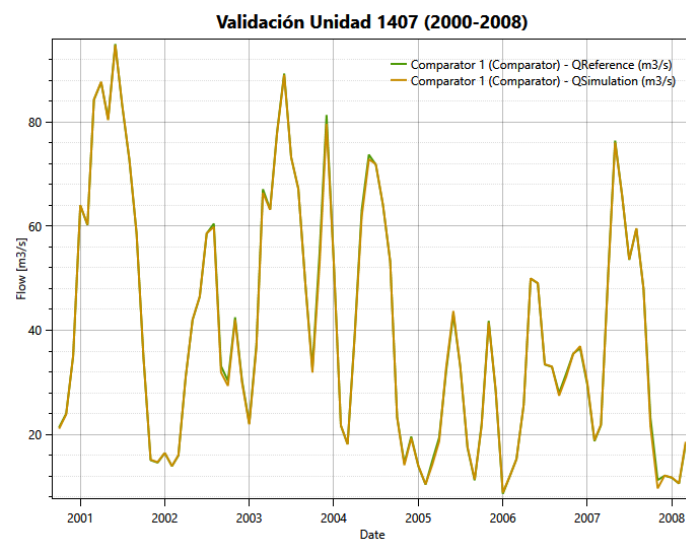


Figura 112. Validación unidad 1407.

Fuente: RS-Minerve.

5.3.2.5.9 Unidad 1411_1

La unidad 1411_1 es la subcuenca final de la cuenca del r3o Cinca y en s3 del Subsistema del mismo nombre, recibe las aguas de todas las otras cuencas de Flumen, Guatizalema, Alcanadre y Vero, es decir estos r3os desembocan en el r3o Cinca por margen izquierda, as3 como los que nacen en la propia unidad siendo Sosa y Tamarite por margen derecha y Clamor I de Fornillos y Clamor II por margen izquierda. Cabe destacar que tambi3n por su margen derecha justo al final del embalse de El Grado desemboca el r3o 3sera el cual no hace parte del sistema G3llego-Cinca sino del 3sera y Noguera Ribagorzana.

Posee un 3rea de drenaje de 2163 Km² con lo cual es la subcuenca m3s grande de la cuenca del r3o Cinca y tambi3n en s3 de todo el sistema G3llego-Cinca, se caracteriza por ser una zona con una gran producci3n agr3cola cuya demanda es suplida en parte por el canal de Arag3n y Catalu3a el cual parte del embalse de Barasona ubicado sobre el r3o 3sera del sistema de explotaci3n externo 3sera y Noguera Ribagorzana. Las zonas regables se pueden apreciar en la Figura 114 teniendo una demanda de la subcuenca de alrededor de 121 Hm³/a3o y tambi3n recibe retornos de agua de estas demandas y de otras de las cuencas adyacentes aproximadamente de 118 Hm³/a3o.

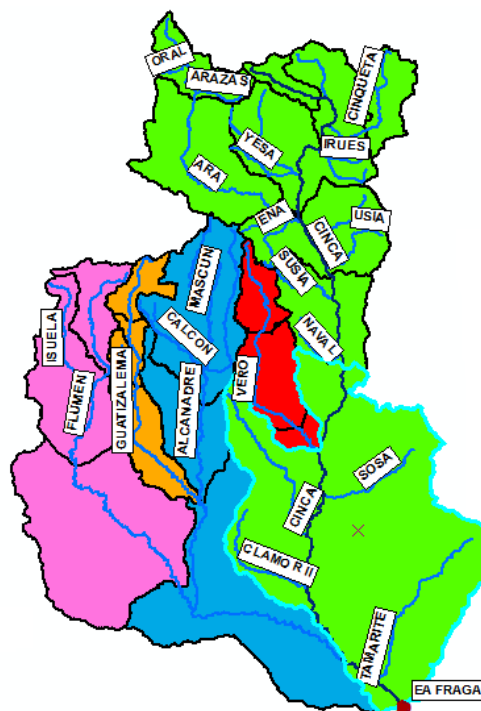


Figura 113. Unidad 1411_1.
Fuente: Elaboraci3n Propia.

SUPERFICIE DE REGADÍO EN LA CUENCA DEL RÍO CINCA (Catastro)

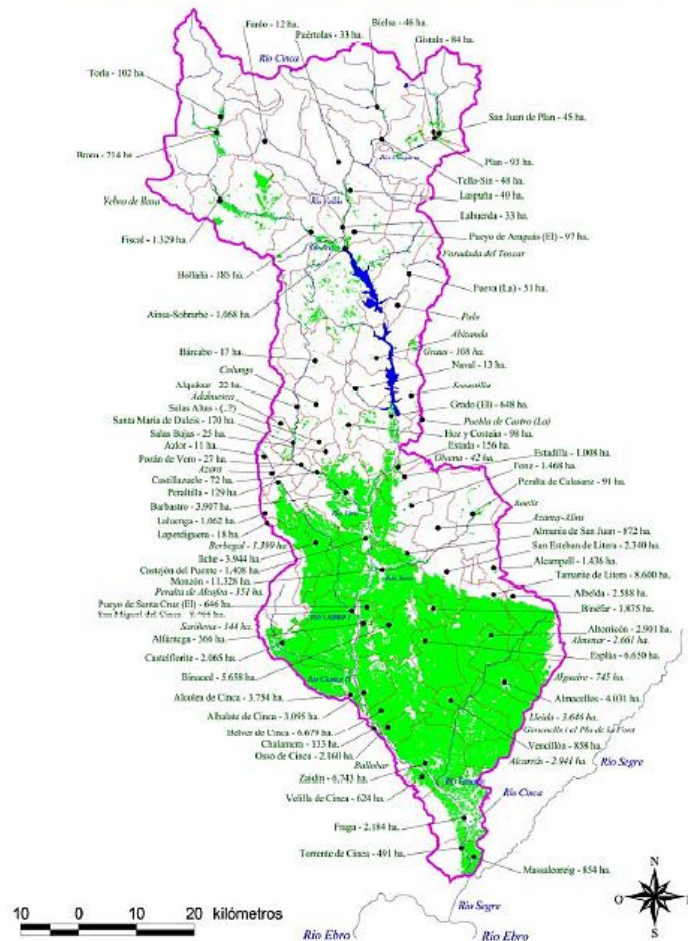


Figura 114. Regadíos zona baja de la cuenca del río Cinca.
Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro, (2008).

La estación de aforo a utilizar ubicada sobre el río Cinca es la 9017-Fraga la cual a pesar de tener datos desde 1928 a 2011, sus períodos de años con buenos datos son 1928 a 1981, 1984 a 1988, 1997 a 2004 y 2006 a 2008, con lo que se seleccionó el período 1997 a 2008 como período de modelación obviando los años sin datos de octubre de 2004 a septiembre de 2006 repartiendo calentamiento, calibración y validación como se muestra en la Tabla 68.

Se debe tener en cuenta para la modelación de esta unidad que se tienen presentes dos elementos importantes, primero el trasvase del canal del Cinca que parte del embalse de El Grado hasta confluir con el canal de Monegros en cercanías del río Gállego y el segundo son las aportaciones inducidas a la subcuenca externamente por las salidas del embalse de Barasona ubicado sobre el río Ésera del sistema Ésera y Noguera Ribagorzana por margen derecha.

Al analizar las entradas y salidas del embalse de El Grado presentadas en la Figura 169 y Figura 170 del Anejo 8.1 Estaciones de aforo, se puede evidenciar que es muy similar lo que entra a lo que sale, es decir se tiene en cuenta globalmente tanto lo que va para el trasvase del canal del Cinca como lo que se suelta al río, siendo éste último el que nos interesa para la modelación ya que lo que discurre por el río es lo que se aporta a la subcuenca, ya que si se toma también en cuenta lo que va por los canales como si entrara al río, la calibración estaría errónea y no se asemejaría a la realidad.

Existe una estación de aforo en el canal del Cinca con código R.O.E.A 9441 luego de partir del embalse de El Grado sin embargo tiene únicamente datos en el período 1985-1990 y no se utilizaron debido a que primero son pocos años de datos y segundo porque el período de modelación no corresponde al seleccionado de 1997 a 2008 como se explicó previamente.

Con lo cual los valores del trasvase del canal del Cinca a utilizar fueron los registrados en el modelo de gestión de Aquatool, los cuales tienen un registro de un valor promedio mensual y se incluyó en la modelación sumándose al registro aforado por la estación 9017-Fraga para garantizar su cumplimiento. En cuanto a las contribuciones externas se incluyeron las sueltas registradas por la estación 9848-Embalse de Barasona ya que son una aportación al sistema.

Mes	Trasvase Canal Cinca (Hm ³ /mes)
Octubre	23.09
Noviembre	13.14
Diciembre	22.76
Enero	37.78
Febrero	42.04
Marzo	47.25
Abril	78.04
Mayo	130.52
Junio	164.61
Julio	170.00
Agosto	170.00
Septiembre	127.50
Total	1026.72

Tabla 67. Trasvase Canal del Cinca.

Como se aprecia en la Tabla 68 la modelación arrojó buenos resultados tanto en la calibración como en la validación lográndose 0.82 y 0.70 de función objetivo respectivamente.



Los caudales simulados siguen el estilo de la curva de los datos observados, en las épocas de caudales altos los valores simulados tienden a ajustarse sin embargo tienen diferencias considerables en la mayoría de ellos de $20 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$ causando una afectación en el índice de Nash de 0.78 para la calibración que igual es bueno, y en la validación al haber sólo un pico por el período tan corto sufre grandes consecuencias teniendo una sobreestimación de también $20 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$ desde su pico en mayo hasta agosto de 2007 cuando regresa al ajuste de la curva con lo cual este índice baja hasta un aceptable 0.53. Con respecto a los flujos bajos representados por el índice logarítmico de Nash-In durante la primera mitad de la serie de calibración los caudales simulados están por debajo de los aforados por la estación entre $15\text{-}20 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$ haciendo que su resultado no sea tan correcto para un aceptable 0.59, situación que se repite al momento de hacer la validación donde para las dos épocas que se evidencian los caudales más bajos también la simulación se encuentra por debajo de lo observado en general en $10 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$ con un máximo de poco más de $20 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{mes}$ haciendo de nuevo que el Nash-In disminuya considerablemente hasta un regular 0.35. En las series simuladas para la calibración y validación se logra un equilibrio entre los valores que se sobreestiman y subestiman haciendo así que sus valores medios sean muy similares a los observados causando un índice de Bias Score excelente en ambos casos, que a su vez causa que las correlaciones entre valores sea correcta evidenciando un coeficiente de Pearson bueno en calibración de 0.93 y muy bueno en validación con 0.94.

Con respecto a las aportaciones propias de la subcuenca las dos más influyentes son la subterránea y la interfujo estando en equiparidad ambas siendo muy similares en su comportamiento.

Cabe destacar que al ser la subcuenca más aguas abajo es la más propicia a recopilar todos los errores y falencias que se van acumulando poco a poco de las subcuencas aguas arriba y de las demás cuencas principales, no obstante a pesar de eso y sufrir de trasvases, demandas, retornos y sueltas de embalses haciendo de la unidad 1411_1 una subcuenca muy alterada se obtuvieron buenos resultados tanto en la calibración como en la validación a nivel global a pesar de las fallas recién enunciadas.

Calentamiento 1997-1998			Calibración		Validación	
Condiciones Iniciales			1998-2004		2006-2008	
HsnowIni	0.000	m	Nash	0.78	Nash	0.53
WHIni	0.000	Adim	Nash-In	0.59	Nash-In	0.35
HumIni	0.017	m	Pearson Correlation Coeff	0.93	Pearson Correlation Coeff	0.94
SUIni	0.001	m	Bias Score	1.00	Bias Score	0.98
SLIni	0.004	m	FUNC. OBJ	0.82	FUNC. OBJ	0.70

Tabla 68. Resultados calentamiento, calibración y validación unidad 1411_1.

Parámetros Cuenca		
A	2163.0	Km ²
CFMax	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	Adim
CWH	0.100	Adim
TT	2.000	°C
TTInt	2.000	°C
TTSM	0.000	°C
Beta	1.000	Adim
FC	0.250	m
PWP	0.179	m
SUMax	0.093	m
Kr	0.265	1/d
Ku	0.399	1/d
KI	0.057	1/d
Kperc	0.306	1/d

Tabla 69. Parámetros finales unidad 1411_1.

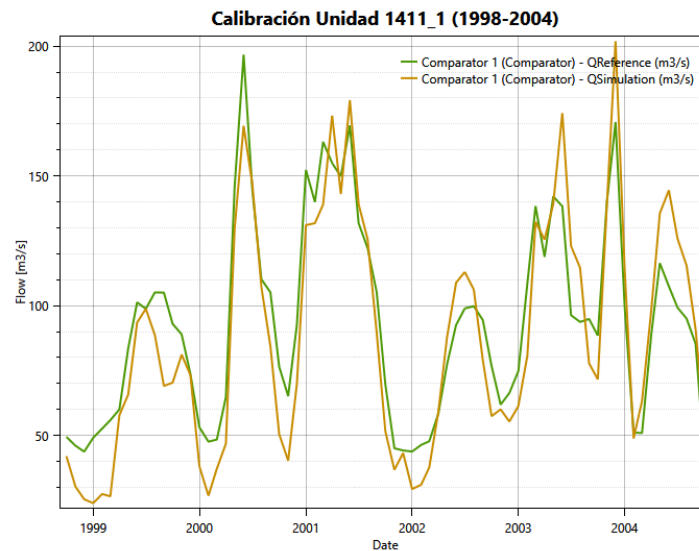


Figura 115. Calibración unidad 1411_1.

Fuente: RS-Minerve.

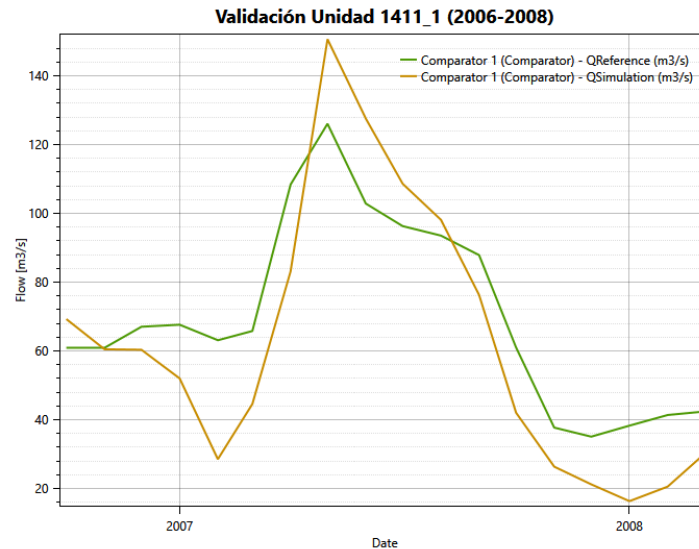


Figura 116. Validación unidad 1411_1.
Fuente: RS-Minerve.

Finalmente se presenta a continuación en la Figura 117 el esquema utilizado en RS-Minerve para la modelación de la presente unidad 1411_1, mostrándose la estación meteorológica, la subcuenca HBV, las subcuencas de directamente aguas arriba la demanda, las salidas de los embalses, el trasvase, el elemento comparador y la estación de aforo de referencia:

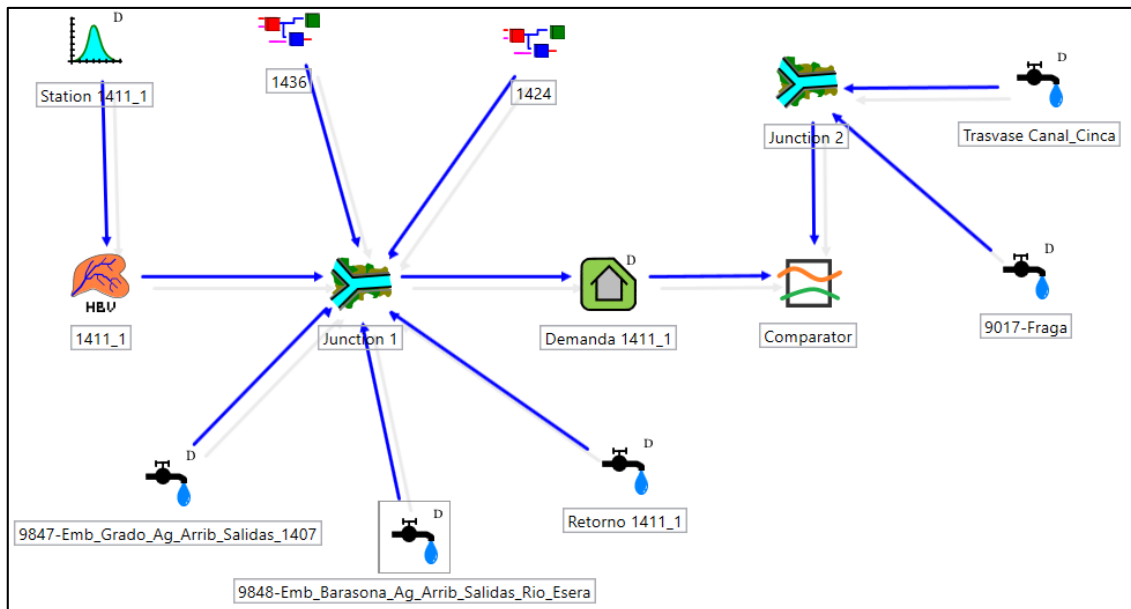


Figura 117. Esquema subcuenca 1411_1 en RS-Minerve.

5.4 Comparación de aportaciones en régimen natural entre SIMPA y HBV

Como último paso para finalizar el presente trabajo de fin de máster se plantea utilizar las aportaciones naturales del modelo SIMPA que vienen registradas en el modelo de



gestión de Aquatool previamente desarrollado por la confederación hidrográfica del Ebro del sistema Gállego-Cinca y realizar la comparación con respecto a las aportaciones que fueron obtenidas mediante la simulación hidrológica realizada en RS-Minerve con el modelo HBV para así hacer una revisión e identificar si las de SIMPA son mayores o menores, es decir si se tiene una sobre o subestimación de las mismas para el período de 1950 a 2006, el cual es elegido así ya que se contrastan el período de datos meteorológicos de Spain02 v2.1 (1950-2008) y el de simulación de Aquatool (1940-2006). La intención de realizar esta comparación es determinar la calidad de SIMPA debido a que es un modelo más general y el realizado en este trabajo con HBV tiene un nivel de detalle más elevado.

Cabe destacar que SIMPA (Sistema Integrado para la Modelación del proceso Precipitación Aportación) (Ruiz, 1998) es un modelo de simulación precipitación-aportación a nivel de España de tipo conceptual y distribuido basado principalmente en el modelo de Témez, es utilizado para la evaluación de los recursos hídricos en régimen natural, en donde la escala temporal es mensual, el terreno es discretizado en celdas de 1.000 m x 1.000 m y ha sido actualizado por el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas del CEDEX, sin embargo a pesar de esta discretización, el modelo fue calibrado no tan a detalle sino a un nivel más genérico con estaciones de aforo donde se miden caudales en régimen natural y también con series restituidas a régimen natural procedentes de los planes hidrológicos de cuenca, teniendo así un poco más de 100 puntos de control seleccionados para toda España (Estrela et al., 1999).

El procedimiento a realizar es obtener las aportaciones naturales de cada una de las cuencas del sistema Gállego-Cinca (Gállego, Flumen, Guatizalema, Alcanadre y Cinca) y compararlas con las de SIMPA para luego juntarlas a su vez en cada subsistema como un todo y posteriormente contrastarlas en la desembocadura.

Estas aportaciones naturales son tomadas al realizar la simulación para el período 1950-2006 con HBV de cada subcuenca calibrada sin incluir ningún tipo de demanda, retorno ni sueltas por parte de los embalses y modelarlas. Cabe destacar que aunque no es el mismo período en el que se calibró, se asume que al estar ya todo calibrado no interesa en qué periodo se vuelva a simular desde que se tengan los datos meteorológicos disponibles y apropiados.

En cuanto a las aportaciones naturales del modelo SIMPA registradas en Aquatool, se identificaron aquellas correspondientes a cada cuenca y se fueron acumulando una a una para luego realizar cada una de las comparaciones.

Se realizaron dos tipos de comparaciones, la primera con respecto a las aportaciones totales anuales y la segunda con respecto a un año medio típico de los promedios históricos de cada uno de los meses.

5.4.1 Subsistema del río Gállego

5.4.1.1 Cuenca del río Gállego

Como se puede observar en la Figura 118 las aportaciones naturales por parte de HBV tienden en general a llevar el mismo estilo de grafica que las de SIMPA, sin embargo se evidencian dos períodos particulares que tienen su punto de inflexión en el año 1986, el primero en donde las aportaciones previas a este año, las del modelo SIMPA siempre son mayores que las de HBV en promedio unos 238 Hm³ y el segundo desde 1986 en adelante en donde se evidencia claramente que ambas aportaciones son muy similares teniendo ahora 78 Hm³ de diferencia promedio, es decir mucho menor que antes. Debido a esto el valor medio de cada serie presentada en la Tabla 70 se ve diferenciada en 173 Hm³.

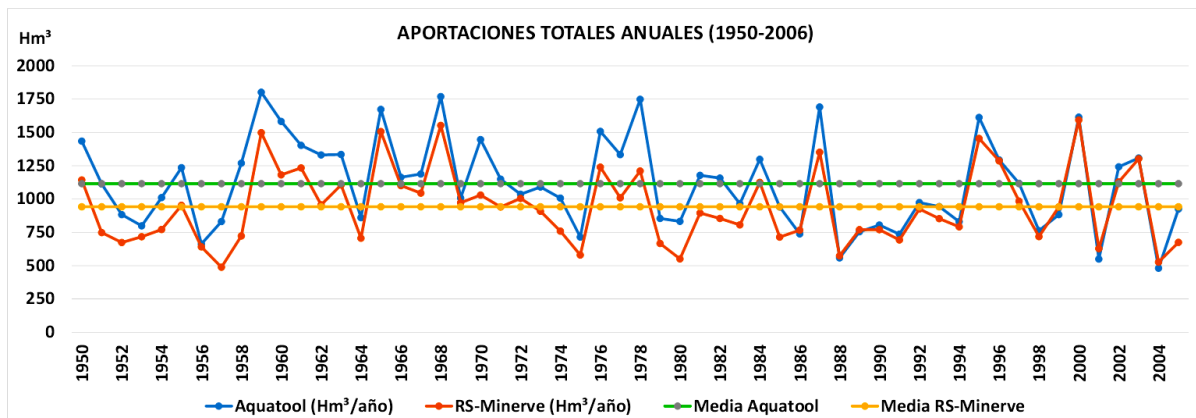


Figura 118. Aportaciones totales anuales subsistema del río Gállego.

Fuente: Elaboración Propia.

	SIMPA (Hm ³ /Año)	HBV (Hm ³ /Año)
Media	1,114.72	941.71
Desviación Estándar	336.16	281.92
Percentil 50%	1,101.22	916.47
Percentil 75%	1,331.38	1,126.30

Tabla 70. Estadísticos aportaciones totales anuales subsistema del río Gállego.

Con respecto a un año medio típico se vuelve a evidenciar en la Tabla 71 y Figura 119 que las aportaciones del modelo SIMPA dan más elevadas en la mayoría de ocasiones, teniendo en general unos 19 Hm³ de diferencia mes a mes, sin embargo se evidencian dos etapas, la primera siendo mayor que HBV de octubre a junio donde su diferencia promedio es de 22 Hm³ y la segunda menor de julio a septiembre donde la diferencia media disminuye a casi mitad de la anterior a 12.5 hm³.

Mes	SIMPA (Hm ³ /mes)	HBV (Hm ³ /mes)
Oct	88.58	52.26
Nov	106.14	64.68
Dic	102.19	80.58
Ene	102.21	82.45
Feb	84.07	84.30
Mar	100.83	84.37
Abr	107.83	91.17
May	132.15	95.98
Jun	114.80	101.85
Jul	69.47	86.65
Ago	48.86	64.51
Sep	57.59	52.90
Total	1,114.72	941.71

Tabla 71. Año medio típico subsistema del río Gállego.

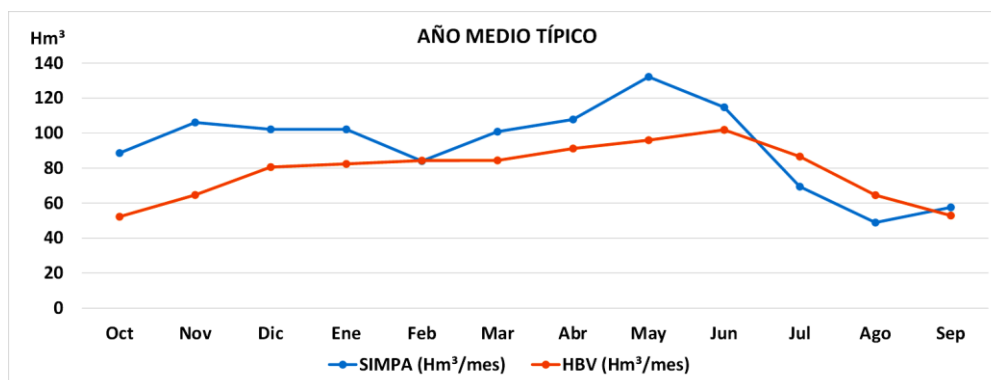


Figura 119. Año medio típico subsistema del río Gállego.
Fuente: Elaboración Propia.

5.4.2 Subsistema del río Cinca

5.4.2.1 Cuenca del río Flumen

Tal como se aprecia en la Figura 120 las aportaciones proporcionadas por el modelo hidrológico HBV siempre se mantienen por encima de las de SIMPA unas veces más que otras pero en promedio 42 Hm³ (las cual es la diferencia entre sus medias).

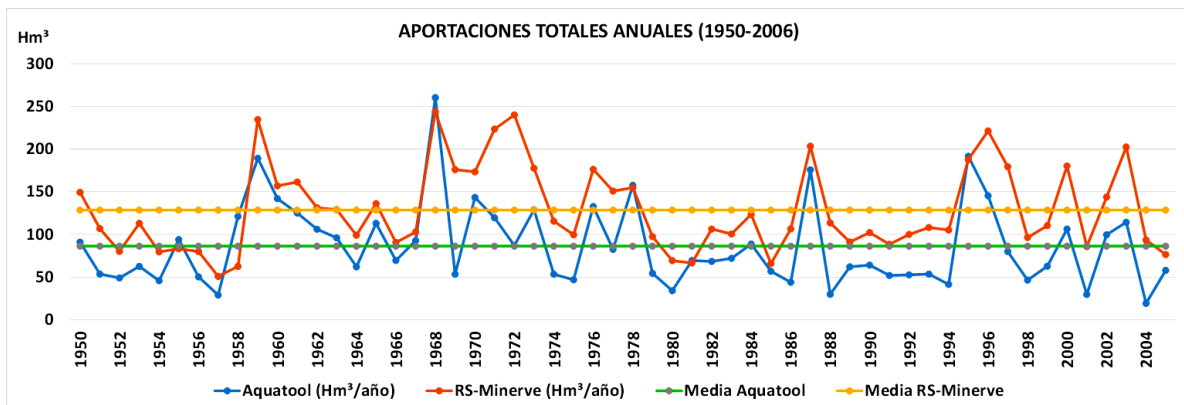


Figura 120. Aportaciones totales anuales cuenca del río Flumen.

Fuente: Elaboración Propia.

	SIMPA (Hm ³ /Año)	HBV (Hm ³ /Año)
Media	86.22	128.55
Desviación Estándar	47.96	50.10
Percentil 50%	69.46	109.19
Percentil 75%	113.20	164.25

Tabla 72. Estadísticos aportaciones totales anuales cuenca del río Flumen.

Al igual que para cada año, en las aportaciones de SIMPA también son menores los valores característicos mensuales mostrados en la Tabla 73 y Figura 121 por alrededor de 3.5 Hm³ promedio mes a mes y 42.33 Hm³ en el total del año, pero acentuándose desde finales de primavera hasta finales del verano. Se evidencia un comportamiento más uniforme en el modelo HBV sin tantas variaciones y cambios.

Mes	SIMPA (Hm ³ /mes)	HBV (Hm ³ /mes)
Oct	6.82	8.56
Nov	7.94	9.29
Dic	9.00	10.71
Ene	10.19	10.98
Feb	6.88	11.84
Mar	10.12	11.64
Abr	9.77	11.88
May	7.88	12.11
Jun	6.54	11.78
Jul	3.15	11.28
Ago	2.78	9.72
Sep	5.15	8.75
Total	86.22	128.55

Tabla 73. Año medio típico cuenca del río Flumen.

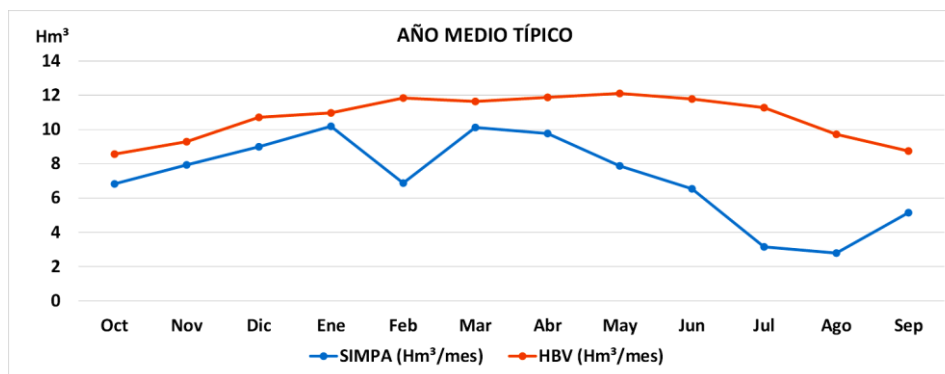


Figura 121. Año medio típico cuenca del río Flumen.
Fuente: Elaboración Propia.

5.4.2.2 Cuenca del río Guatizalema

En la Figura 122 se muestra claramente que las aportaciones de SIMPA siempre están por delante que las de HBV, en donde la media de la primera es aproximadamente el doble de la segunda, y en general sucede lo mismo durante todo período el histórico así como en los valores mensuales típicos de todos los meses, teniendo en promedio 2.4 Hm³ de más excepto en verano donde estas diferencias son menores alrededor de 1 Hm³ como se aprecia en la Tabla 75 y Figura 123.

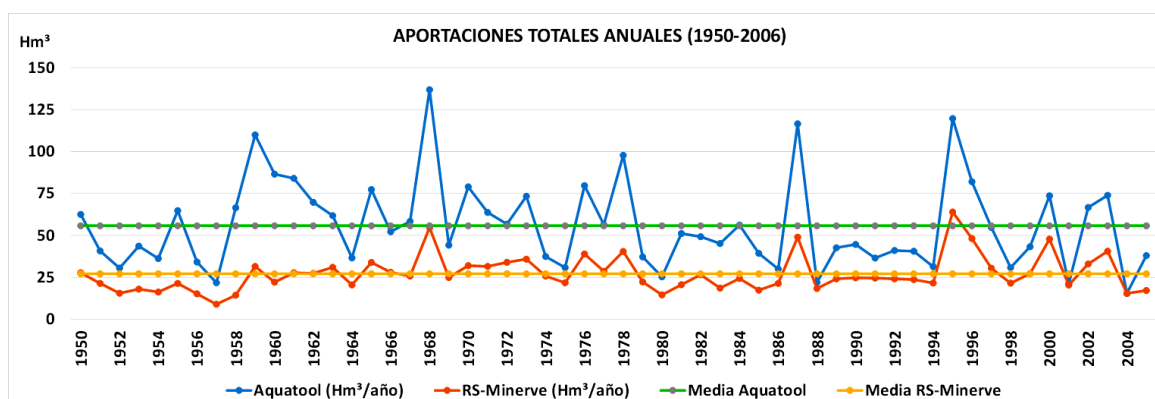


Figura 122. Aportaciones totales anuales cuenca del río Guatizalema.
Fuente: Elaboración Propia.

	SIMPA (Hm ³ /Año)	HBV (Hm ³ /Año)
Media	55.75	27.12
Desviación Estándar	26.37	10.69
Percentil 50%	50.19	24.73
Percentil 75%	70.63	31.56

Tabla 74. Estadísticos aportaciones totales anuales cuenca del río Guatizalema.

Mes	SIMPA (Hm ³ /mes)	HBV (Hm ³ /mes)
Oct	4.47	1.66
Nov	5.34	2.23
Dic	6.21	2.65
Ene	6.28	2.64
Feb	4.72	3.06
Mar	5.75	2.57
Abr	5.95	2.56
May	5.26	2.75
Jun	4.12	2.40
Jul	2.59	2.03
Ago	2.14	1.30
Sep	2.90	1.28
Total	55.75	27.12

Tabla 75. Año medio típico cuenca del río Guatizalema.

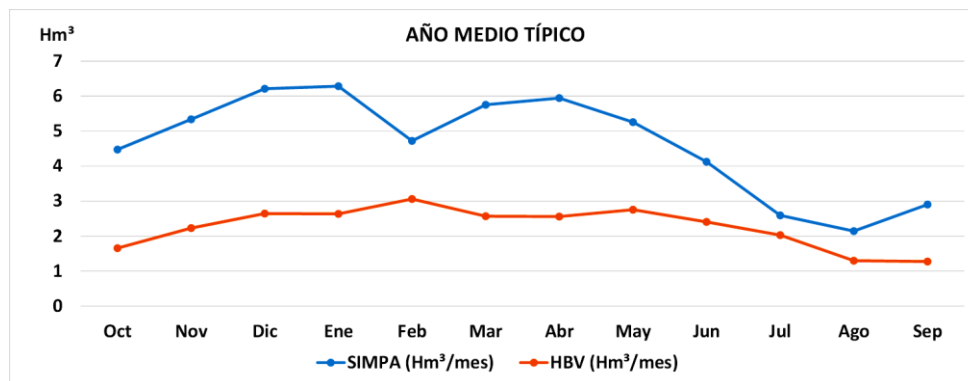


Figura 123. Año medio típico cuenca del río Guatizalema.

Fuente: Elaboración Propia.

5.4.2.3 Cuenca del río Alcanadre

Con respecto a la cuenca del río Alcanadre se puede apreciar en la Figura 124 que ambas aportaciones son similares a lo largo del período 1950-2006, teniendo su valor medio casi idéntico en 162 Hm³. Se evidencian dos momentos, el primero de 1950 a 1970 en donde las de HBV están por debajo de las de SIMPA y lo contrario sucede en general de 1970 en adelante.

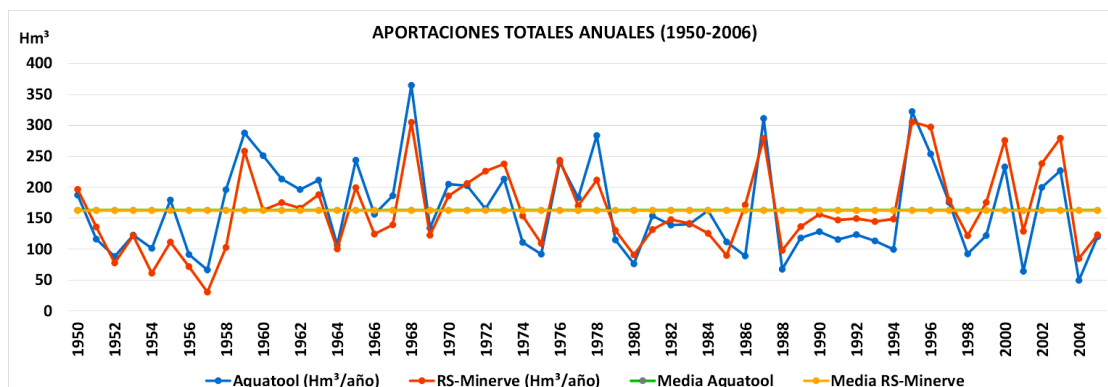


Figura 124. Aportaciones totales anuales cuenca del río Alcanadre.

Fuente: Elaboración Propia.

	SIMPA (Hm ³ /Año)	HBV (Hm ³ /Año)
Media	162.87	162.36
Desviación Estándar	71.94	64.93
Percentil 50%	146.98	148.15
Percentil 75%	206.64	197.36

Tabla 76. Estadísticos aportaciones totales anuales cuenca del río Alcanadre.

En el año medio típico de la Tabla 77 y Figura 125 se ven dos épocas de diferencias, la primera de septiembre a enero donde las aportaciones de SIMPA son mayores que las de HBV y la segunda de febrero a agosto donde ahora las de HBV están casi siempre por encima, en ambos casos manteniendo en promedio 2 Hm³ de diferencia.

Mes	SIMPA (Hm ³ /mes)	HBV (Hm ³ /mes)
Oct	13.95	9.74
Nov	15.65	14.94
Dic	17.87	16.10
Ene	18.55	16.11
Feb	13.91	17.16
Mar	16.19	14.88
Abr	15.66	15.73
May	15.55	16.76
Jun	12.45	15.82
Jul	7.86	12.75
Ago	6.34	6.32
Sep	8.91	6.05
Total	162.87	162.36

Tabla 77. Año medio típico cuenca del río Alcanadre.

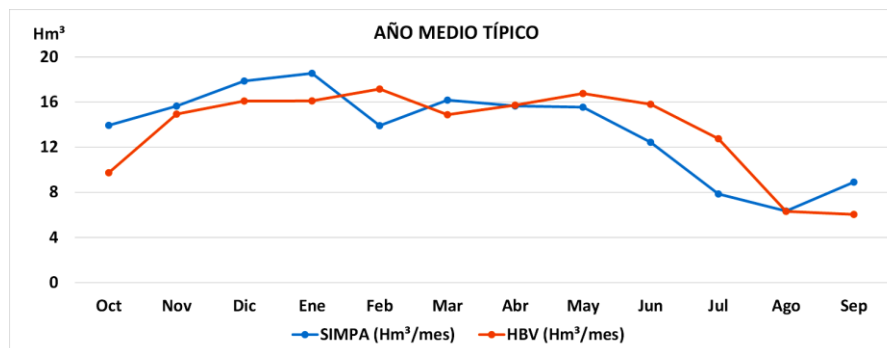


Figura 125. Año medio típico cuenca del río Alcanadre.

Fuente: Elaboración Propia.

5.4.2.4 Cuenca del río Vero

Como se aprecia en la Figura 126 existen tres períodos, el primero en donde las aportaciones de HBV son menores que las de SIMPA hasta 1963 en 15 Hm³ promedio teniendo los picos muy desigualados en donde las diferencias son mayores, la segunda desde ese año hasta 1979 en donde son similares y la tercera de 1980 a 2006 en donde las de HBV siempre son mayores repitiendo los 15 Hm³ de diferencia promedio pero esta vez la diferencia es casi constante. Todo es da lugar a que ambas medias históricas sean casi iguales rondando los 55 Hm³.

En el año típico mostrado en la Tabla 79 y Figura 127, se puede apreciar que ambas aportaciones tienen a estar parecidas de septiembre a mayo con una diferencia aproximada de 0.51 Hm³, ya que lo que es verano en junio, julio y agosto esta se acentúa hasta los 1.78 Hm³ siendo la aportación de SIMPA la que encuentra por debajo.

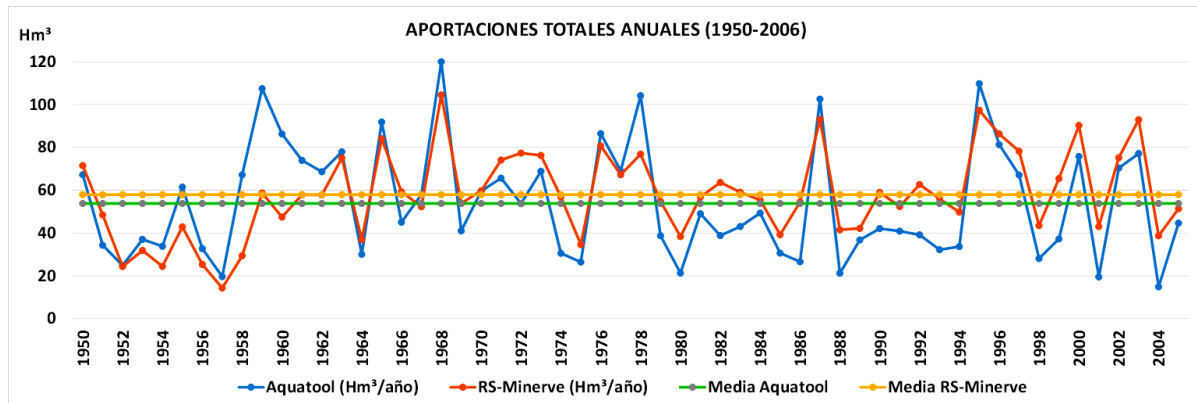


Figura 126. Aportaciones totales anuales cuenca del río Vero.

Fuente: Elaboración Propia.

	SIMPA (Hm ³ /Año)	HBV (Hm ³ /Año)
Media	53.80	57.90
Desviación Estándar	26.41	20.15
Percentil 50%	44.83	56.78
Percentil 75%	69.36	74.33

Tabla 78. Estadísticos aportaciones totales anuales cuenca del río Vero.

Mes	SIMPA (Hm ³ /mes)	HBV (Hm ³ /mes)
Oct	4.36	3.70
Nov	4.60	4.68
Dic	5.76	5.29
Ene	6.45	5.19
Feb	5.10	5.32
Mar	5.51	5.00
Abr	4.87	5.20
May	4.99	5.66
Jun	4.48	5.74
Jul	2.63	5.20
Ago	2.14	3.64
Sep	2.93	3.30
Total	53.80	57.90

Tabla 79. Año medio típico cuenca del río Vero.

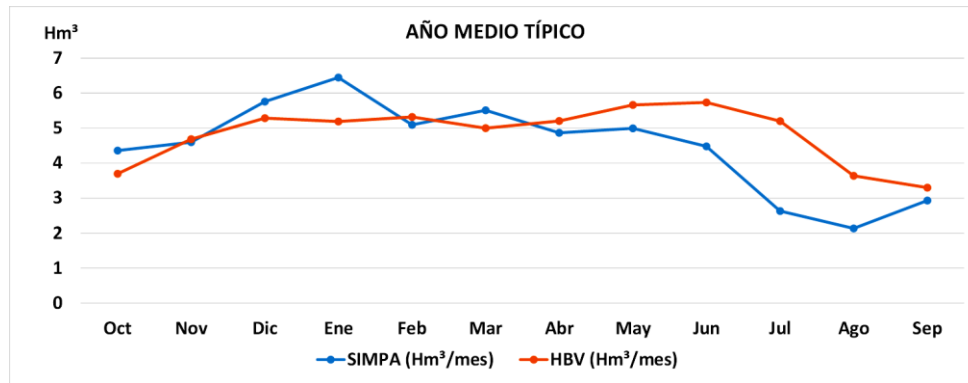


Figura 127. Año medio típico cuenca del río Vero.
Fuente: Elaboración Propia.

5.4.2.5 Cuenca del río Cinca

En las aportaciones totales anuales históricas de la cuenca del río Cinca presentadas en la Figura 128 y Tabla 80, podemos observar que siempre las correspondientes al modelo SIMPA están por encima de las de HBV por bastante, en promedio 490 Hm³ (las cual corresponde a la diferencia entre sus medias), sin embargo se aprecian dos períodos, el primero de 1950-1980 donde las discrepancias son bien marcadas siendo SIMPA muchísimo mayor que HBV teniendo en esta parte una diferencia promedio de 735 Hm³, el segundo va de 1980 al final en 2006 donde las aportaciones ya son menos desiguales una de la otra, pero ya en este sector la diferencia promedio baja hasta más de la mitad siendo 239 Hm³.

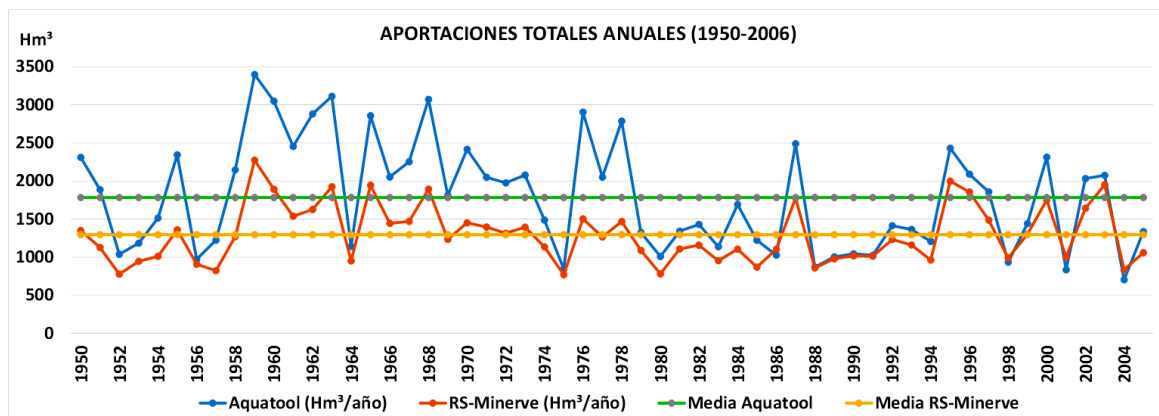


Figura 128. Aportaciones totales anuales cuenca del río Cinca.
Fuente: Elaboración Propia.

	SIMPA (Hm ³ /Año)	HBV (Hm ³ /Año)
Media	1,784.01	1,293.91
Desviación Estándar	712.75	374.63
Percentil 50%	1,751.37	1,232.61
Percentil 75%	2,310.18	1,490.53

Tabla 80. Estadísticos aportaciones totales anuales cuenca del río Cinca.

Con respecto a las aportaciones promedio típicas mostrados en la Tabla 81 y Figura 129, se sigue evidenciando una clara superioridad en las aportaciones del modelo SIMPA con las de HBV, pero no se da así todos los meses ya que se tiene una diferencia de 59 Hm³ promedio de octubre a junio y en los veraniegos de julio a septiembre ya baja hasta 17 Hm³ siendo ahora la de HBV la superior. Pero debido a que durante más tiempo SIMPA es mayor y con una diferencia más amplia, el resultado total del año típico es mucho más grande que el de HBV, distanciándose en 490 Hm³.

Mes	SIMPA (Hm ³ /mes)	HBV (Hm ³ /mes)
Oct	141.72	90.26
Nov	171.27	115.28
Dic	144.43	122.90
Ene	158.10	108.11
Feb	128.40	104.01
Mar	150.42	92.91
Abr	161.66	107.67
May	251.22	124.49
Jun	236.07	147.01
Jul	100.23	126.97
Ago	61.57	80.75
Sep	78.92	73.55
Total	1,784.01	1,293.91

Tabla 81. Año medio típico cuenca del río Cinca.

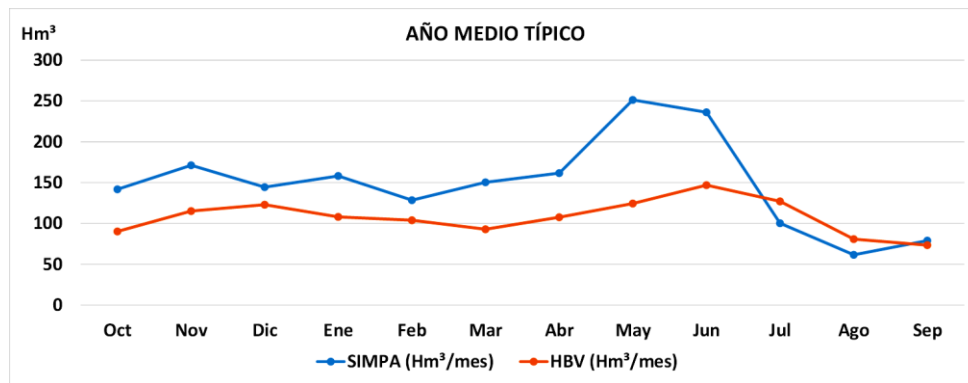


Figura 129. Año medio típico cuenca del río Cinca.
Fuente: Elaboración Propia.

5.4.2.6 Subsistema del río Cinca

Ahora ya en cuanto todo el subsistema en sí de río Cinca, incluyendo las 5 cuencas anteriores podemos apreciar que su comportamiento es muy similar y tiene unas aportaciones muy parecidas a la cuenca del río Cinca ya que ésta es la más grande del subsistema lo cual hace que aporte más de sus aguas.

Con lo cual también se evidencia que las aportaciones del modelo SIMPA siempre son mayores con un promedio histórico de 472 Hm³ a las de HBV, teniendo 2142 Hm³

de aportaciones medias para el primero y 1669 Hm³ para el segundo como se muestra en la Figura 130 y Tabla 82. A su vez presenta los mismos dos períodos representativos siendo 1950-1980 y 1980-2006, en donde en el primer período las diferencias son bastante marcadas siendo en promedio 755 Hm³ y en los flujos altos mucho más evidenciadas. Para el segundo período estas diferencias son mucho menores reduciéndose hasta más de la mitad con 237 Hm³ en promedio, lo cual se ve claramente ya que las dos curvas van muy seguidas una de la otra sin tener discrepancias tan marcadas como en el primer período.

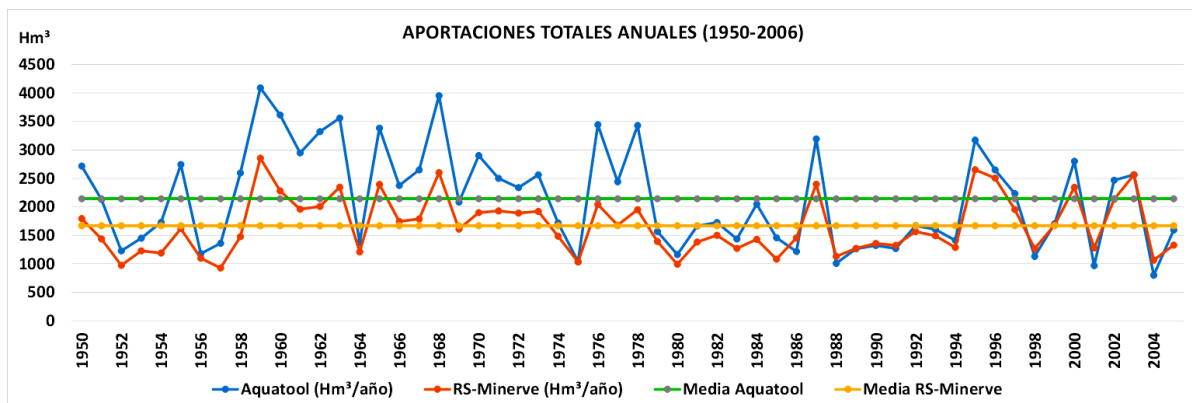


Figura 130. Aportaciones totales anuales subsistema del río Cinca.

Fuente: Elaboración Propia.

	SIMPA (Hm ³ /Año)	HBV (Hm ³ /Año)
Media	2,142.65	1,669.84
Desviación Estándar	866.51	495.25
Percentil 50%	2,065.98	1,534.52
Percentil 75%	2,724.26	1,954.52

Tabla 82. Estadísticos aportaciones totales anuales subsistema del río Cinca.

Como se venía diciendo en general este subsistema tiene el mismo comportamiento de la cuenca del río Cinca, también pasa con el año típico teniendo dos períodos, el primero en donde las aportaciones de SIMPA son siempre mayores que las de HBV de octubre a junio y el segundo en verano donde son menores de julio a septiembre, teniendo mayores diferencias en el primer período con 59.5 Hm³ en promedio y para el segundo ya son menores bajando a 24.8 Hm³.

Mes	SIMPA (Hm ³ /mes)	HBV (Hm ³ /mes)
Oct	171.32	113.92
Nov	204.79	146.43
Dic	183.26	157.65
Ene	199.57	143.02
Feb	159.02	141.39
Mar	187.99	127.00
Abr	197.90	143.04
May	284.89	161.77
Jun	263.66	182.75
Jul	116.46	158.23
Ago	74.97	101.73
Sep	98.81	92.92
Total	2,142.65	1,669.84

Tabla 83. Año medio típico subsistema del río Cinca.

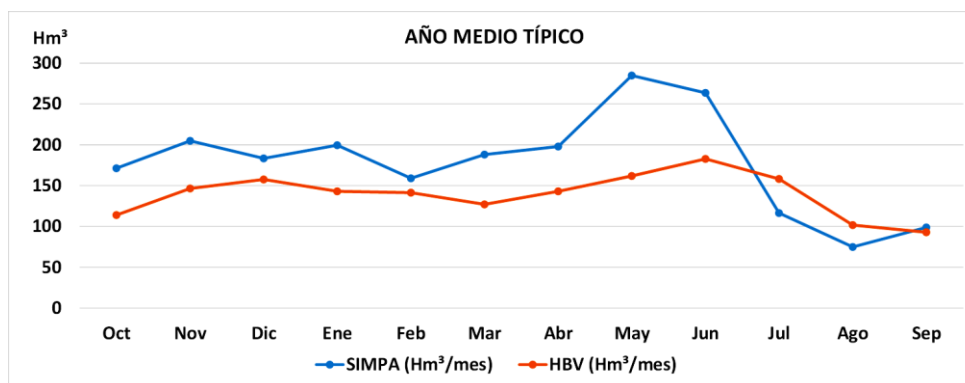


Figura 131. Año medio típico subsistema del río Cinca.

Fuente: Elaboración Propia.

5.5 Valoración de resultados

5.5.1 Calibración y validación del sistema de explotación

A continuación se presenta un resumen de los rangos de los parámetros finales respecto a los hallados en las 6 cuencas:

	GÁLLEGO			Unidad		FLUMEN			Unidad
	Mínimo	Máximo	Promedio			Mínimo	Máximo	Promedio	
A	117.00	1631.00	484.88		A	160.00	965.00	499.67	Km ²
CFMax	5.000	19.624	6.828	mm/°C/d	CFMax	5.000	5.000	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	0.050	0.050	Adim	CFR	0.050	0.050	0.050	Adim
CWH	0.100	0.100	0.100	Adim	CWH	0.100	0.100	0.100	Adim
TT	1.151	2.000	1.894	°C	TT	2.000	2.000	2.000	°C
TTInt	1.647	2.000	1.956	°C	TTInt	2.000	2.000	2.000	°C
TTSM	0.000	0.000	0.000	°C	TTSM	0.000	0.000	0.000	°C
Beta	1.000	4.997	2.193	Adim	Beta	1.000	2.283	1.842	Adim
FC	0.142	0.637	0.328	m	FC	0.173	0.650	0.371	m
PWP	0.090	0.277	0.153	m	PWP	0.092	0.471	0.264	m
SUMax	0.022	0.097	0.062	m	SUMax	0.012	0.063	0.035	m
Kr	0.166	0.498	0.251	1/d	Kr	0.202	0.432	0.312	1/d
Ku	0.010	0.207	0.088	1/d	Ku	0.022	0.130	0.076	1/d
KI	0.000	0.015	0.007	1/d	KI	0.004	0.018	0.009	1/d
Kperc	0.052	0.587	0.330	1/d	Kperc	0.165	0.701	0.346	1/d

	GUATIZALEMA					ALCANADRE			
	Mínimo	Máximo	Promedio	Unidad		Mínimo	Máximo	Promedio	Unidad
A	45.00	227.00	120.67	Km ²	A	264.00	764.00	509.67	Km ²
CFMax	5.000	5.000	5.000	mm/°C/d	CFMax	5.000	5.000	5.000	mm/°C/d
CFR	0.050	0.050	0.050	Adim	CFR	0.050	0.050	0.050	Adim
CWH	0.100	0.100	0.100	Adim	CWH	0.100	0.100	0.100	Adim
TT	2.000	2.000	2.000	°C	TT	2.000	2.000	2.000	°C
TTInt	2.000	2.000	2.000	°C	TTInt	2.000	2.000	2.000	°C
TTSM	0.000	0.000	0.000	°C	TTSM	0.000	0.000	0.000	°C
Beta	1.000	4.990	3.655	Adim	Beta	1.000	3.888	1.990	Adim
FC	0.190	0.259	0.229	m	FC	0.196	0.650	0.362	m
PWP	0.030	0.140	0.073	m	PWP	0.126	0.295	0.197	m
SUMax	0.001	0.077	0.045	m	SUMax	0.032	0.089	0.066	m
Kr	0.184	0.354	0.281	1/d	Kr	0.058	0.219	0.154	1/d
Ku	0.313	0.396	0.353	1/d	Ku	0.017	0.397	0.207	1/d
KI	0.000	0.012	0.005	1/d	KI	0.003	0.111	0.040	1/d
Kperc	0.000	0.233	0.078	1/d	Kperc	0.001	0.152	0.079	1/d

	VERO					CINCA			
	Mínimo	Máximo	Promedio	Unidad		Mínimo	Máximo	Promedio	Unidad
A	110.00	245.00	200.00	Km ²	A	73.00	2163.00	477.78	Km ²
CFMax	5.000	5.000	5.000	mm/°C/d	CFMax	3.480	19.948	8.636	mm/°C/d
CFR	0.050	0.050	0.050	Adim	CFR	0.050	0.050	0.050	Adim
CWH	0.100	0.100	0.100	Adim	CWH	0.100	0.100	0.100	Adim
TT	2.000	2.000	2.000	°C	TT	0.032	2.899	1.667	°C
TTInt	2.000	2.000	2.000	°C	TTInt	1.111	2.397	1.921	°C
TTSM	0.000	0.000	0.000	°C	TTSM	0.000	0.000	0.000	°C
Beta	1.000	1.026	1.017	Adim	Beta	1.000	4.111	1.933	Adim
FC	0.240	0.556	0.451	m	FC	0.130	0.646	0.261	m
PWP	0.170	0.399	0.322	m	PWP	0.090	0.212	0.158	m
SUMax	0.012	0.053	0.039	m	SUMax	0.046	0.093	0.069	m
Kr	0.051	0.243	0.115	1/d	Kr	0.067	0.336	0.228	1/d
Ku	0.153	0.213	0.193	1/d	Ku	0.011	0.399	0.206	1/d
KI	0.008	0.012	0.009	1/d	KI	0.001	0.102	0.024	1/d
Kperc	0.087	0.735	0.519	1/d	Kperc	0.041	0.601	0.335	1/d

Tabla 84. Resumen de parámetros finales de las cuencas.

En la Tabla 85 se puede apreciar un resumen de los resultados de los procesos de calibración y validación de todo el sistema de explotación Gállego-Cinca, teniendo en cuenta los rangos de valoraciones establecidos para la función objetivo de la Tabla 6:

CALIBRACIÓN					
UNIDAD	FUNC. OBJ	VALORACIÓN	UNIDAD	FUNC. OBJ	VALORACIÓN
Subsistema Río Gállego			Cuenca Río Alcanadre		
Cuenca Río Gállego			1434	0.81	Bueno
0504	0.47	Regular	1435	0.77	Bueno
0505	0.92	Muy Bueno	1436	0.76	Bueno
0508_1	0.83	Bueno	Cuenca Río Vero		
0509_1	0.93	Muy Bueno	1422	0.75	Bueno
0511	0.98	Excelente	1423	0.64	Aceptable
0512	1.00	Excelente	Cuenca Río Cinca		
0513_1	0.78	Bueno	1401	-4.93	Malo
0516	0.63	Aceptable	1403_1	0.87	Bueno
Subsistema Río Cinca			1405_1	0.71	Bueno
Cuenca Río Flumen			1406_1	0.76	Bueno
1440	0.87	Bueno	1407	0.99	Excelente
1441_1	0.77	Bueno	1411_1	0.82	Bueno
1441_2	0.62	Aceptable	1414_1	0.71	Bueno
Cuenca Río Guatzalema			1416	0.58	Aceptable
1437	0.71	Bueno	1420_1	0.62	Aceptable
1438	0.75	Bueno			
1439	0.68	Aceptable			

CALIBRACIÓN		
NÚMERO UNIDADES	VALORACIÓN	PORCENTAJE
Subsistema Río Gállego		
1	Regular	12.5%
1	Aceptable	12.5%
2	Bueno	25.0%
2	Muy Bueno	25.0%
2	Excelente	25.0%
TOTAL 8	-	100%
Subsistema Río Cinca		
1	Malo	5.0%
5	Aceptable	25.0%
13	Bueno	65.0%
1	Excelente	5.0%
TOTAL 20	-	100%
Total Sistema Gállego-Cinca		
1	Malo	3.6%
1	Regular	3.6%
6	Aceptable	21.4%
15	Bueno	53.6%
2	Muy Bueno	7.1%
3	Excelente	10.7%
TOTAL 28	-	100%

VALIDACIÓN					
UNIDAD	FUNC. OBJ	VALORACIÓN	UNIDAD	FUNC. OBJ	VALORACIÓN
Subsistema Río Gállego			Cuenca Río Alcanadre		
Cuenca Río Gállego			1434	0.83	Muy Bueno
0504	0.42	Aceptable	1435	0.76	Bueno
0505	0.93	Excelente	1436	0.73	Bueno
0508_1	0.92	Excelente	Cuenca Río Vero		
0509_1	0.81	Muy Bueno	1422	0.78	Bueno
0511	0.99	Excelente	1423	0.68	Bueno
0512	1.00	Excelente	Cuenca Río Cinca		
0513_1	0.87	Muy Bueno	1401	-3.17	Malo
0516	0.56	Aceptable	1403_1	0.62	Bueno
Subsistema Río Cinca			1405_1	0.71	Bueno
Cuenca Río Flumen			1406_1	0.81	Muy Bueno
1440	0.84	Muy Bueno	1407	1.00	Excelente
1441_1	0.81	Muy Bueno	1411_1	0.70	Bueno
1441_2	0.74	Bueno	1414_1	0.61	Bueno
Cuenca Río Guatzalema			1416	0.60	Bueno
1437	0.76	Bueno	1420_1	0.76	Bueno
1438	0.81	Muy Bueno			
1439	0.75	Bueno			

VALIDACIÓN		
NÚMERO UNIDADES	VALORACIÓN	PORCENTAJE
Subsistema Río Gállego		
2	Aceptable	25.0%
2	Muy Bueno	25.0%
4	Excelente	50.0%
TOTAL 8	-	100%
Subsistema Río Cinca		
1	Malo	5.0%
13	Bueno	65.0%
5	Muy Bueno	25.0%
1	Excelente	5.0%
TOTAL 20	-	100%
Total Sistema Gállego-Cinca		
1	Malo	3.6%
2	Aceptable	7.1%
13	Bueno	46.4%
7	Muy Bueno	25.0%
5	Excelente	17.9%
TOTAL 28	-	100%

Tabla 85. Resumen calibración y validación del sistema Gállego-Cinca.

Como se puede observar aquellas subcuencas que tienen los mejores resultados tanto en calibración como en validación son casi todas las que se encuentran influenciadas por los embalses, más específicamente por sus sueltas de agua, siendo en su mayoría las del subsistema del río Gállego ya que en este se encuentran 5 de los 8 embalses utilizados en total, lo cual a su vez repercute en la buena calibración de las subcuencas de dicho subsistema por su regulación en la cuenca, influenciando en primer lugar a las que se encuentran directamente aguas abajo de los embalses y en segundo lugar al resto del sistema que viene siendo regulado previamente, dando



lugar así a que de las 8 subcuencas 4 tengan un calibración y validación superior a 0.90 para la función objetivo e incluso una quinta en validación acercándose con 0.87.

En cuanto al subsistema del río Cinca ya no sucede que muchas unidades estén por encima de 0.90 en la función objetivo, de hecho de la totalidad de 20 pasa sólo en una, siendo la 1407 que tiene 0.99 en calibración y 1.00 en validación la cual evidentemente obtiene estos grandes resultados por estar justo aguas abajo del embalse de Mediano. En general se observan para las demás subcuencas valores por encima de 0.70, 14 de ellas en calibración y 15 en validación. Lo cual representa buenos resultados y estables a pesar de no estar tan regulada como el subsistema del río Gallego y tener afectaciones debido a la producción agrícola y las redes de canales de regadíos que posee.

Cabe destacar que hubo dos subcuencas en las que se tuvieron grandes problemas, siendo la 0504 y 1401, la 0504 no fue tan grave ya que tuvo 0.47 en calibración y 0.42 en validación, pero la 1401 fue crítica ya que obtuvo -4.93 al calibrar y -3.17 al validar. Estas dos unidades se encuentran en zona de cabecera con presencia de nieve en invierno, la primera en el subsistema del río Gállego y la segunda en el del Cinca. Aunque la falta de calibración de la 0504 no es tan importante ya que aguas abajo se encuentra el embalse de Lanuza de 16.85 Hm³ de capacidad con lo que las subcuencas aguas abajo están reguladas por éste, sin embargo aguas abajo en la 1401 existe el embalse de Pineta con 0.26 Hm³ el cual es muy pequeño y no causa una gran regulación como el de Lanuza que su capacidad si es bien considerable, con lo que las influencias de la subcuenca si serán más representativas.

A su vez se puede identificar que para aquellas unidades que se encuentran en cabecera en donde hay nieve las cuales son 5 siendo la 0504, 1401, 1416, 1403_1 y 1414_1, en tres se tuvieron valores relativamente bajos de calibración siendo las dos acabadas de mencionar 0.47 para la 0504, -4.93 para la 1401 y ahora 0.58 con respecto a la 1416, y luego en validación todas las 5 resultaron en valores un poco bajos teniendo 0.42 en la subcuenca 0504, -3.17 para la 1401, 0.60 en la 1416, 0.62 con respecto a la 1403_1 y 0.61 refiriéndose a la 1414_1. Asimismo comparando con los demás resultados de las otras subcuencas, se aprecia que estas 3 unidades con valores relativamente bajos de calibración corresponden a las 3 con valor más bajo de todo el sistema de explotación, y lo mismo sucede en validación donde de las 6 subcuencas con resultado más bajo, 5 de ellas corresponden a las de cabecera que

se enuncian. Es decir se evidencian problemas en la modelización en cabecera con presencia de nieve.

Ahora bien con respecto a los porcentajes del sistema en cuanto a la clasificación en los distintos rangos de evaluación, se puede apreciar que para el subsistema del río Gállego el 75% de las subcuencas se encuentran en una valoración buena e incluso mejor tanto para calibración y validación. Para el subsistema del río Cinca cambia un poco teniendo ahora un 70% de las subcuencas igual a bueno o mucho mejor en calibración y un 95% en cuanto a validación. Finalmente a nivel global para el sistema de explotación Gállego-Cinca se obtiene que del total de las subcuencas el 71.4% está teniendo un resultado entre los rangos bueno y excelente, mientras que para la etapa de validación un 89.3%.

Es decir a nivel general se puede afirmar que la modelación hidrológica realizada nos ofrece grandes resultados que se pueden asumir de confianza.

Cabe destacar a su vez que en las subcuencas de desembocadura se obtuvieron buenos resultados considerables en su función objetivo a pesar de estar en lo más abajo del sistema recibiendo las aportaciones de todas sus subcuencas de aguas arriba, en donde se tienden a ir acumulando poco a poco los errores y falencias de estas unidades situadas encima debido a las alteraciones hechas por el hombre como embalses, zonas agrarias y redes de canales, así como los propios errores sistemáticos que pueda tener el modelo hidrológico y/o el mismo software RS-Minerve, teniendo así para la desembocadura del subsistema del río Gállego en la unidad 0513_1 una buena calibración con 0.78 y una muy buena validación con 0.87, ahora para el subsistema del río Cinca en su desagüe para la subcuenca 1411_1 se tuvo un resultado bueno siendo 0.82 en calibración y 0.70 en validación.

Por último para realizar una comparación más general se calculó el promedio de la función objetivo de las subcuencas de los dos subsistemas y del sistema en general, cuyos resultados se presentan a continuación en la Tabla 86, cabe resaltar que para estos promedios no se tuvieron en cuenta las dos subcuencas con problemas de calibración 0504 y 1401.

	CALIBRACIÓN	VALORACIÓN	VALIDACIÓN	VALORACIÓN
Subsistema Río Gállego	0.87	Bueno	0.87	Muy Bueno
Subsistema Río Cinca	0.75	Bueno	0.75	Bueno
Total Sistema Gállego-Cinca	0.78	Bueno	0.78	Bueno

Tabla 86. Valores generales promedio calibración y validación.

Casualmente se obtuvieron los mismos valores para calibración y validación, sin embargo debido a que los valores en la calibración son más restrictivos, en el subsistema del río Gállego el 0.87 de resultado en calibración representa un valor bueno mientras que en validación es uno muy bueno. Caso contrario con el subsistema del río Cinca en donde el 0.75 representa un resultado bueno tanto en calibración y validación al igual que el 0.78 obtenido globalmente para todo el sistema de explotación Gállego-Cinca.

Además se puede evidenciar en estos resultados medios lo que se mencionó previamente en que el subsistema del río Gállego presenta una gran regulación debida a los 5 embalses que tiene, al registrar un mayor resultado de 0.87 comparado con el 0.75 del subsistema del río Cinca, que recordemos posee grandes influencias agrícolas y unos cuantos canales y acequias.

Cabe resaltar el valor de 0.78 obtenido en general para todo el sistema de explotación Gállego-Cinca, lo cual indica que los procedimientos realizados han sido correctos y representan de una buena manera la realidad del sistema.

5.5.2 Comparación de aportaciones en régimen natural entre SIMPA y HBV

En la Tabla 87 se puede apreciar tanto para cada una de las cuencas como para cada subsistema en sí, que aportación o combinación entre SIMPA y HBV es la dominante en la serie histórica, así como en la Tabla 88 se muestran cuantificadas las aportaciones medias anuales de cada una estas:

CUENCA	Aportación y Período Dominante	SUBSISTEMA	Aportación y Período Dominante
Gállego	SIMPA (1950-2006)	Gállego	SIMPA (1950-2006)
Flumen	HBV (1950-2006)	Cinca	SIMPA (1950-2006)
Guatizalema	SIMPA (1950-2006)		
Alcanadre	SIMPA (1950-1970)-HBV (1970-2006)		
Vero	SIMPA (1950-1980)-HBV (1980-2006)		
Cinca	SIMPA (1950-2006)		

Tabla 87. Aportación y período dominante cuencas y subsistemas.

CUENCA	SIMPA (Hm ³ /Año)	HBV (Hm ³ /Año)
Gállego	1,114.72	941.71
Flumen	86.22	128.55
Guatizalema	55.75	27.12
Alcanadre	162.87	162.36
Vero	53.80	57.90
Cinca	1,784.01	1,293.91

SUBSISTEMA	SIMPA (Hm ³ /Año)	HBV (Hm ³ /Año)
Gállego	1,114.72	941.71
Cinca	2,142.65	1,669.84
TOTAL	3,257.37	2,611.55

Tabla 88. Aportaciones medias anuales cuencas y subsistemas.

La aportación natural que predomina más que todo es la resultante del modelo SIMPA siendo siempre mayor que las de HBV en 3 (Gállego, Guatizalema, Cinca) de las 6 cuencas principales y también aproximadamente en la primera mitad de la serie histórica 1950-2006 de otras 2 (Alcanadre, Vero) cuencas más. Dejando como totalmente dominante a las aportaciones de HBV de sólo 1 cuenca (Flumen) y a la segunda mitad del período restante de las 2 cuencas (Alcanadre, Vero) mencionadas en donde hay influencia compartida. Cabe destacar que en aquellas 2 cuencas donde hay influencia mixta, las aportaciones medias anuales tanto de SIMPA como de HBV son muy similares.

Con respecto a la recopilación en subsistemas, para ambos se tiene que las mayores aportaciones naturales son las de SIMPA para todo el período histórico, para el del Gállego al tener sólo una cuenca, obviamente toma el comportamiento de esta misma y para el del Cinca en donde se recogen las aguas de las 5 cuencas restantes que a pesar de no tener en todas predilección por SIMPA, sucede que la cuenca principal y más grande es la cuenca del río Cinca en donde las aportaciones de este modelo son las mayores.

A modo de resumen a continuación se muestran las aportaciones totalizadas en conjunto de todo el sistema de explotación Gállego-Cinca en régimen natural en donde se recopila el comportamiento de los dos subsistemas:

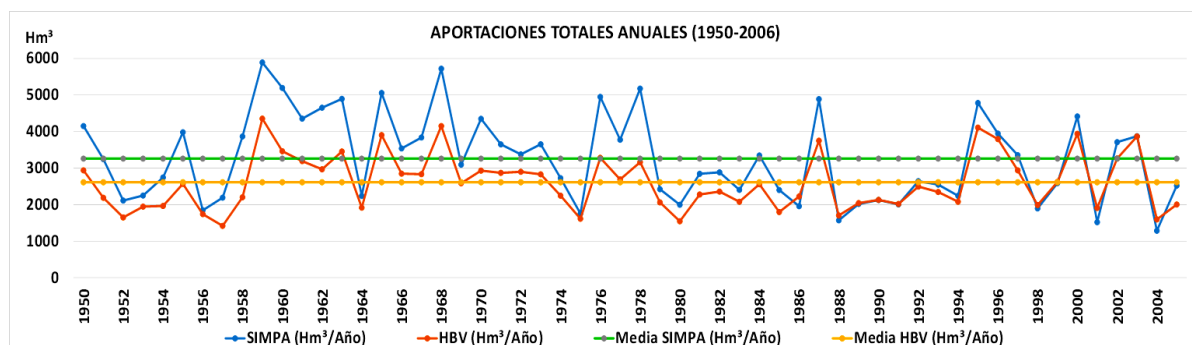


Figura 132. Aportaciones totales anuales sistema de explotación Gállego-Cinca.

Fuente: Elaboración Propia.

	SIMPA (Hm ³ /Año)	HBV (Hm ³ /Año)
Media	3,257.37	2,611.55
Desviación Estándar	1,188.58	763.83
Percentil 50%	3,167.97	2,525.06
Percentil 75%	4,022.76	3,014.71

Tabla 89. Estadísticos aportaciones totales anuales sistema de explotación Gállego-Cinca.

Como podemos observar en la Figura 132 se puede evidenciar la supremacía de las aportaciones del modelo SIMPA en todo el período histórico con una media de 3257 Hm³ y con un promedio en sus diferencias con el modelo HBV de 645 Hm³ el cual tiene una media de 2611 Hm³. También se puede ver que existe un punto de inflexión alrededor del año 1980, en donde en sus años previos las aportaciones de SIMPA son bastante mayores haciendo que la diferencia promedio con HBV aumenten y sea de 994 Hm³, mientras que a partir de 1980 en adelante las dos aportaciones tienden a ser más similares logrando así que su diferencia promedio baje a casi una tercera parte con 341 Hm³.

Con respecto al año típico medio que se presenta en la Tabla 90 y Figura 133, se puede decir que en general las aportaciones de SIMPA continúan siendo mayores durante casi todos los meses teniendo una diferencia promedio con HBV de 70.7 Hm³, sin embargo se evidencian dos períodos particulares el primero de octubre a junio donde las aportaciones de SIMPA son mayores donde esta diferencia promedio aumenta a 81.8 Hm³, el segundo período en verano teniendo a julio, agosto y septiembre con aportaciones de HBV siendo las mayores en donde la diferencia promedio es mucho menor siendo 37.3 Hm³.

Mes	SIMPA (Hm ³ /mes)	HBV (Hm ³ /mes)
Oct	259.90	166.18
Nov	310.92	211.10
Dic	285.45	238.23
Ene	301.78	225.48
Feb	243.09	225.69
Mar	288.82	211.37
Abr	305.74	234.21
May	417.04	257.75
Jun	378.47	284.60
Jul	185.93	244.88
Ago	123.83	166.24
Sep	156.40	145.82
Total	3,257.37	2,611.55

Tabla 90. Año medio típico sistema de explotación Gállego-Cinca.

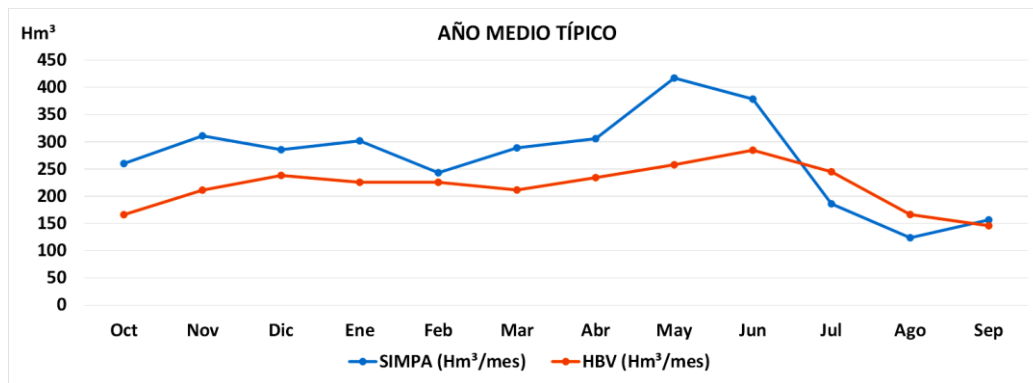


Figura 133. Año medio típico sistema de explotación Gállego-Cinca.
Fuente: Elaboración Propia.

Con lo que podemos indicar que al ver los contrastes de aportaciones de cada una de las cuencas, de los dos subsistemas y en sí en el conglomerado del sistema de explotación Gállego-Cinca vemos que las aportaciones naturales generadas por el modelo SIMPA suelen ser en la mayoría de los casos mayores a las de los resultados de modelo HBV de este trabajo, así como se aprecia que en general a niveles promedio, durante todo el año las aportaciones de HBV son menores que las de SIMPA por una diferencia considerable, excepto en verano de julio a septiembre donde se intercambian los papeles y ahora las de HBV son las que predominan aunque tienden a estar relativamente cerca a las de SIMPA. Es decir que según nuestros resultados se están sobreestimando las aportaciones generadas naturalmente de octubre a junio y subestimando las de julio a septiembre al utilizar el modelo de SIMPA.

6 CONCLUSIONES

El objetivo general de este trabajo es la modelación hidrológica a nivel mensual del sistema de explotación Gállego-Cinca con un enfoque semidistribuido, mediante la utilización del modelo de precipitación-escorrentía HBV y el software RS-Minerve para que con esta modelación se pueda hacer una representación lo más realista posible de sus procesos, poder realizar la caracterización y parametrización de las subcuencas, y en sí de todo el sistema de explotación, logrando con esto estudiar y evaluar el comportamiento de los recursos hídricos, flujos superficiales, subterráneos e influencia de los embalses presentes en la zona de estudio, para obtener así un modelo parametrizado del sistema de explotación capaz de reproducir cualquier tipo de evento con otros datos de entrada diferentes a los utilizados para su calibración.

El objetivo secundario es realizar varias comparaciones de las aportaciones en régimen natural que generen el modelo HBV, con respecto a las de SIMPA registradas en el modelo de gestión de Aquatool previamente desarrollado por la confederación hidrográfica del Ebro. La intención de realizar esta comparación es determinar la calidad de SIMPA debido a que es un modelo más general y el realizado en este trabajo con HBV tiene un nivel de detalle más elevado.

El sistema de explotación fue dividido en 2 partes denominadas subsistema del río Gállego y subsistema del río Cinca, los cuales comprenden 8 y 21 subcuencas respectivamente. La modelación hidrológica fue realizada mediante el software RS-Minerve el cual es un programa para la simulación de la formación y propagación de la escorrentía superficial, y a su vez se utilizó el modelo sueco de precipitación-escorrentía HBV de gran tradición en países nórdicos con una larga historia alrededor del mundo. Para la obtención de los datos de entrada se hizo uso del proyecto Spain02 v2.1 el cual comprende una rejilla de alta resolución de $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ (20 x 20 Km aproximadamente) de precipitación y temperatura diaria para el territorio de la península española y las islas baleares, en el período comprendido entre enero de 1950 y marzo de 2008, con las cuales se calculó la evapotranspiración mediante la fórmula Hargreaves y Samani (1985) que sólo necesita datos de temperaturas y radiación solar, a la que le se aplicó un factor llamado coeficiente de cultivo Kc que depende de la cobertura de la zona. Ya con estos datos para el centroide de cada subcuenca y las demandas de agua de las que se tenga conocimiento de la zona y se encuentren registradas en el modelo de gestión del software Aquatool previamente

desarrollado, se procedió a su modelación en el software RS-Minerve, y con el cual mediante el algoritmo SCE-UA se realizó la calibración de los parámetros del modelo HBV teniendo en cuenta la función objetivo estipulada la cual tiene en cuenta los índices de eficiencia de Nash, Nash-In, coeficiente de correlación de Pearson y Bias Score con respecto a los datos de referencia de las estaciones de aforo de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (R.O.E.A) seleccionadas, ya al tener las subcuencas calibradas se procedió a su validación en un periodo posterior al de calibración para determinar la bondad del modelo. Finalmente se realizaron las comparaciones de las aportaciones en régimen natural generadas por el modelo HBV con respecto a las de SIMPA registradas en el modelo de gestión de Aquatool mencionado.

En sí en gran parte del sistema de explotación se evidencia una clara afección y alteración del régimen natural de caudales a lo largo de todas la cuencas, en primera instancia desde la zona media hacia abajo debido a la gran cantidad de zonas agrarias en donde la mayoría se ubican en el subsistema del río Cinca, las cuales le demandan al sistema gran cantidad de recursos hídricos haciendo que se presenten varias redes de canales, derivaciones en acequias y retornos por toda esta zona que aparte de alterar el medio hacen que ingrese agua de manera externa a las subcuencas, haciendo que los caudales sean inestables, cambiantes y las aportaciones por precipitación esperadas no sean de fácil estimación en su desembocadura.

Otra gran alteración es la gran cantidad de embalses existentes donde la mayoría se sitúa en el subsistema del río Gállego, produciendo una gran regulación de caudales lo cual hace que en el desagüe individual de cada subcuenca y en sí en el final de cada subsistema no se registren tan bien los caudales generados por cada una, sino siendo el aspecto más influyente las sueltas de estos embalses, en donde en varias subcuencas se lograban calibraciones y validaciones casi perfectas haciendo que las aportaciones propias sean poco representativas.

Se evidenciaron problemas en la modelización para subcuencas de cabecera con presencia de nieve, en donde sus resultados se encontraron un poco bajos. Puede deberse a que los datos de precipitación son tomados en un solo punto (centroide de la subcuenca) con ponderaciones y estimaciones por parte de Spain02 v2.1, lo cual puede tener errores sistemáticos de simplificación en estas zonas con nieve que de alguna manera al parecer están afectando los resultados o también a alguna mala toma de datos para las estaciones de aforo. Se recomienda hacer estudios más

precisos en estas zonas para detectar cuales son los inconvenientes que se presentan, tanto en el proyecto Spain02 v2.1 como en las estaciones meteorológicas cercanas.

También con respecto a Spain02 v2.1 se puede decir que al ser simplificaciones de varias estaciones meteorológicas con respecto a varios puntos, no todos los resultados que nos ofrece tienen un 100% de veracidad haciendo que el modelo hidrológico no pueda ser tan exacto y tenga cierto grado de incertidumbre. Sin embargo es un buen método que ayuda bastante al momento de necesitar datos meteorológicos con facilidad, agilidad y en gran parte confiables.

Aquellas subcuencas que tienen los mejores resultados tanto en calibración como en validación son casi todas las que se encuentran influenciadas por los embalses, siendo en su mayoría las del subsistema del río Gállego ya que en este se encuentran 5 de los 8 embalses utilizados en total, lo cual repercute en la buena calibración de dicho subsistema por su regulación, influenciando en primer lugar a las subcuencas que se encuentran directamente aguas abajo de los embalses y en segundo lugar al resto del sistema que viene siendo regulado previamente, dando lugar así a que de las 8 subcuencas 4 tengan un calibración y validación superior a 0.90 para la función objetivo e incluso una quinta en validación acercándose con 0.87.

En el subsistema del río Cinca se observan en general para las subcuencas valores por encima de 0.70, 14 de ellas en calibración y 15 en validación de las 20 analizadas. Representando resultados buenos y estables a pesar de no estar tan regulada como el subsistema del río Gallego y tener grandes afectaciones debido a la producción agrícola y las redes de canales de regadíos que posee.

Con respecto a los porcentajes del sistema en cuanto a la clasificación en los distintos rangos de evaluación, se puede apreciar que para el subsistema del río Gállego el 75% de las subcuencas se encuentran en una valoración buena e incluso mejor tanto para calibración y validación. Para el subsistema del río Cinca se tiene ahora un 70% de las subcuencas igual a bueno o mucho mejor en calibración y un 95% en cuanto a validación. Finalmente a nivel global para el sistema de explotación Gállego-Cinca se obtiene que del total de las subcuencas el 71.4% está teniendo un resultado entre los rangos bueno y excelente, mientras que para la etapa de validación un 89.3%.



En las subcuencas de desembocadura se obtuvieron buenos resultados considerables en su función objetivo a pesar de estar en lo más abajo del sistema recibiendo las aportaciones de aguas arriba, en donde se tienden a ir acumulando poco a poco los errores y falencias de las unidades situadas encima debido a las alteraciones hechas por el hombre como embalses, zonas agrarias y redes de canales, así como los propios errores sistemáticos que pueda tener el modelo hidrológico y/o el mismo software RS-Minerve, teniendo así para la desembocadura del subsistema del río Gállego en la unidad 0513_1 una buena calibración con 0.78 y una muy buena validación con 0.87 y en el subsistema del río Cinca en su desagüe para la subcuenca 1411_1 un resultado bueno siendo 0.82 en calibración y 0.70 en validación.

Para realizar una comparación más general se calculó el promedio de la función objetivo de las subcuencas de los dos subsistemas y del sistema en general, en donde los resultados fueron repetidos en calibración y validación, el subsistema del río Gállego obtuvo 0.87 de resultado en calibración representando un valor bueno mientras que en validación es uno muy bueno. Para el subsistema del río Cinca se logró 0.75 siendo un resultado bueno tanto en calibración y validación, al igual que el 0.78 obtenido globalmente para todo el sistema de explotación Gállego-Cinca en ambas etapas. Se evidencia en estos resultados medios de nuevo que el subsistema del río Gállego presenta una gran regulación debida a los 5 embalses, al registrar un mayor resultado de 0.87 comparado con el 0.75 del subsistema del río Cinca, que recordemos posee grandes influencias agrícolas y unos cuantos canales y acequias.

Al analizar cada una de las subcuencas modeladas se identificó que en general para las aportaciones totales de todo el sistema de explotación Gállego-Cinca el flujo predominante es el subterráneo el cual tendió a ser mayor casi siempre en todas las unidades, en segundo lugar se encuentra el interflujo y por último la escorrentía directa, la cual en la mayoría de los casos fue muy poca y/o casi nula identificándose que el tanque superior de almacenamiento (SU) pocas veces alcanzaba su límite, solo teniendo alguna respuesta al momento de alguna crecida, con lo cual se puede decir que el suelo existente en la zona de estudio tiende a tener una gran permeabilidad y a su vez una capacidad de percolación considerable.

Todos estos resultados nos indican que se logró realizar una buena modelación hidrológica del sistema de explotación Gállego-Cinca, el cual se adapta correctamente en lo posible a la realidad que sucede en la zona, obteniendo grandes ajustes y

resultados en los que se puede confiar, teniendo en cuenta todos los factores naturales y los influyentes causados por la actividad humana siendo los principales los embalses, los campos agrícolas y algunos ganaderos, los trasvases, canales de derivación y acequias que ayudan a solventar las demandas agrarias, así como los mismos retornos que se generan y unas cuantas solicitudes de agua con fines urbanos.

Con lo cual este modelo hidrológico al estar ya calibrado y parametrizado puede ser utilizado en diversos estudios futuros que requieran trabajar en la zona, en donde se puede tener la certeza de que los resultados generados pueden ser utilizados con confianza, asumiendo que tienen un gran nivel de veracidad y credibilidad, sin olvidar nunca que ningún modelo es perfecto, siempre se tiene algún nivel de incertidumbre, además que no todos los eventos hídricos proceden de la misma manera, con la misma intensidad ni regularidad y que el modelo refleja el comportamiento general y típico de la cuenca a un cierto nivel semidistribuido con un grado de simplificación, mas no completamente a detalle.

A nivel de cuenca la aportación natural que predomina más que todo es la resultante del modelo SIMPA siendo siempre mayor que las de HBV en 3 (Gállego, Guatizalema, Cinca) de las 6 cuencas principales y también aproximadamente en la primera mitad de la serie histórica 1950-2006 de otras 2 (Alcanadre, Vero) cuencas más. Dejando como totalmente dominante a las aportaciones de HBV de sólo 1 cuenca (Flumen) y a la segunda mitad del período restante de las 2 cuencas (Alcanadre, Vero) mencionadas en donde hay influencia compartida. Cabe destacar que en aquellas 2 cuencas donde hay influencia mixta, las aportaciones medias anuales tanto de SIMPA como de HBV son muy similares.

Con respecto a la recopilación en subsistemas, para ambos se tiene que las mayores aportaciones naturales son las de SIMPA para todo el período histórico, teniendo una media anual para el del Gállego de 1114 Hm³ en SIMPA contra los 941 Hm³ de HBV y en cuanto al del Cinca 2142 Hm³ y 1669 Hm³ respectivamente.

Para el conjunto de todo el sistema de explotación Gállego-Cinca en régimen natural también se evidencia la supremacía de las aportaciones del modelo SIMPA en todo el período comparado 1950-2006 tal como sucedió en cada subsistema individual. Asimismo se puede ver que existe un punto de inflexión alrededor del año 1980, en



donde en sus años previos las aportaciones de SIMPA son bastante mayores que las de HBV, mientras que en sus años posteriores las dos aportaciones tienden a ser más similares. A nivel global en el año medio del sistema de explotación, las aportaciones en régimen natural del modelo SIMPA son mayores por 645 Hm³, teniendo para éste 3257 Hm³ anuales y para HBV 2611 Hm³.

Al ver los contrastes de aportaciones de cada una de las cuencas, de los dos subsistemas y en sí en el conglomerado del sistema de explotación Gállego-Cinca vemos que las aportaciones naturales generadas por el modelo SIMPA suelen ser en la mayoría de los casos mayores a las de los resultados de modelo HBV, así como se aprecia que en general a niveles promedio, durante todo el año las aportaciones de SIMPA son mayores por una diferencia considerable, excepto en verano de julio a septiembre donde las de HBV son las que predominan aunque tienden a estar relativamente similares a las de SIMPA. Es decir se están sobreestimando las aportaciones generadas naturalmente de octubre a junio y subestimando las de julio a septiembre al utilizar el modelo de SIMPA.



7 REFERENCIAS

- ✓ *Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986a). An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. Journal of hydrology, 87(1), 45-59.*
- ✓ *Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986b). An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. Journal of hydrology, 87(1), 61-77.*
- ✓ *Aghakouchak, A., & Habib, E. (2010). Application of a conceptual hydrologic model in teaching hydrologic processes. International Journal of Engineering Education, 26(4), 963-973.*
- ✓ *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.*
- ✓ *Andreu, J., Capilla, J., & Sanchís, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. Journal of hydrology, 177(3), 269-291.*
- ✓ *Arheimer, B., Lindström, G., Pers, C., Rosberg, J. & Strömqvist, J. (2008). Development and test of a new Swedish water quality model for small-scale and large-scale applications. XXV Nordic Hydrological Conference NHP Report No. 50, pp. 483-492, Reykjavik, Iceland.*
- ✓ *Beven, K. J. (2001). Rainfall-runoff Modelling: The Primer. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.*
- ✓ *Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Journal, 24(1), 43-69.*
- ✓ *Bergström, S. (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. Swedish Meteorological and Hydrological Institute Report RH07. Norrköping, Sweden.*



- ✓ *Burnash, R. J., Ferral, R. L., & McGuire, R. A. (1973). A generalized streamflow simulation system, conceptual modeling for digital computers. US Department of Commerce, National Weather Service and State of California, Department of Water Resources.*
- ✓ *Cabrera, J. (s.f.). Modelos Hidrológicos. Recuperado de http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf.*
- ✓ *Cheng, Q. (2015). Evaluating the Effect of Objective Functions on Model Calibration. Doctoral thesis, Freie Universität Berlin, Berlín, Germany.*
- ✓ *Confederación Hidrográfica del Ebro. (2007a). Plan hidrológico del río Gállego V.2. España.*
- ✓ *Confederación Hidrográfica del Ebro. (2007b). Plan hidrológico del río Alcanadre V.1. España.*
- ✓ *Confederación Hidrográfica del Ebro. (2008). Plan hidrológico del río Cinca V.1.*
- ✓ *Confederación Hidrográfica del Ebro. (2013). Propuesta de proyecto del plan hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Ebro 2010-2015. España.*
- ✓ *Confederación Hidrográfica del Ebro. (2015). Propuesta de proyecto del plan hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Ebro 2015-2021. España.*
- ✓ *Crawford, N.H. & Linsley, R.K. 1966. Digital Simulation on Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Stanford University Technical Report No. 39. Palo Alto, United States.*
- ✓ *Daniel, E. B., Camp, J. V., LeBoeuf, E. J., Penrod, J. R., Dobbins, J. P., & Abkowitz, M. D. (2011). Watershed modeling and its applications: A state-of-the-art review. The Open Hydrology Journal, 5(1), 26-50.*
- ✓ *Duan, Q. Y., Gupta, V. K., & Sorooshian, S. (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. Journal of optimization theory and applications, 76(3), 501-521.*



- ✓ Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. K. (1992). *Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water resources research, 28(4), 1015-1031.*
- ✓ 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.*
- ✓ Dubois, J. and Boillat, J.-L. (2000). *Routing System - Modelisation du routage des crues dans des systemes hydrauliques a surface libre. Communication 9 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ed. A. Schleiss, Lausanne.*
- ✓ Duchon, J. (1977). *Splines minimizing rotation-invariant semi-norms in Sobolev spaces. In Constructive theory of functions of several variables (pp. 85-100). Springer Berlin Heidelberg.*
- ✓ Estrela, T., Calvo-Rubio, F. C., & Lorenzo, F. E. (1999). *La evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. Ingeniería del agua, 6(2), 125-138.*
- ✓ García Hernandez, J., Jordan, F., Dubois, J. and Boillat, J.-L. (2007). *Routing System II. Flow modelling in hydraulic systems. Communication 32 du Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ed. A. Schleiss, Lausanne.*
- ✓ García Hernández, J., Paredes Arquiola, J., Foehn, A., and Roquier, B. (2015). *RS MINERVE – Technical manual v2.1. RS MINERVE Group, Switzerland*
- ✓ Hargreaves, G. H. (1994). *Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe, departmental paper, dept. of boil. and Irrig. Engrg., Utah State University, Logan, Utah.*
- ✓ Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). *Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied engineering in agriculture, 1(2), 96-99.*
- ✓ Herrera, S. (2011). *Desarrollo, validación y aplicaciones de Spain02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitación y temperatura en España. Tesis doctoral, Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación, Universidad de Cantabria, Santander, España.*



- ✓ IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.*
- ✓ Jajarmizadeh, M., Harun, S., & Salarpour, M. (2012). *A review on theoretical consideration and types of models in hydrology. Journal of Environmental Science and Technology, 5(5), 249-261.*
- ✓ Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Advances in Geosciences, 5, 89-97.*
- ✓ Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). *Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water resources research, 35(1), 233-241.*
- ✓ Lerma, N. (2013). *Análisis y mejora de la gestión de un sistema de recursos hídricos mediante el acoplamiento de algoritmos evolutivos y redes de flujo. Caso de aplicación al sistema Tirso-Flumendosa-Campidano. Tesis de master, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.*
- ✓ Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., & Bergström, S. (1997). *Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. Journal of hydrology, 201(1), 272-288.*
- ✓ Mariani, V. C., & dos Santos Coelho, L. (2011). *A hybrid shuffled complex evolution approach with pattern search for unconstrained optimization. Mathematics and Computers in Simulation, 81(9), 1901-1909.*
- ✓ Matheron, G. (1962). *Traité de géostatistique appliquée 1. Paris: Editions Technip.*
- ✓ McKay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. J. (1979). *A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. Technometrics, 21(2), 239-245.*
- ✓ Metropolis, N., & Ulam, S. (1949). *The Monte Carlo method. Journal of the American statistical association, 44(247), 335-341.*



- ✓ *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (s.f.). Demarcaciones Hidrográficas. Recuperado de http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/marco-del-agua/Demarcaciones_hidrograficas.aspx.*
- ✓ *Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50(3), 885-900.*
- ✓ *Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. Journal of hydrology, 10(3), 282-290.*
- ✓ *Nelder, J. A., & Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. The computer journal, 7(4), 308-313.*
- ✓ *Paredes, J. (2004). Integración de la modelación de la calidad del agua en un sistema de ayuda a la decisión para la gestión de recursos hídricos. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.*
- ✓ *Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 279(1), 275-289.*
- ✓ *Ramírez, L. (2013). Análisis de la implementación de un modelo hidrológico distribuido con información estándar en España. Tesis de master, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.*
- ✓ *Rosenbrock, H. (1960). An automatic method for finding the greatest or least value of a function. The Computer Journal, 3(3), 175-184.*
- ✓ *Ruiz, J.M. (1998). Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual distribuido de simulación continua integrado con un SIG. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.*
- ✓ *Sánchez, F. J. (2011). Evapotranspiración. Recuperado de <http://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>.*
- ✓ *Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M., & Musy, A. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 9, 95-109.*



- ✓ SCS. (1972). *SCS National Engineering Handbook, Section 4. Hydrology, Soil Conservation Service, US Department of Agriculture: Washington, DC.*
- ✓ Shepard, D. (1968). *A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference (pp. 517-524). ACM.*
- ✓ Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). *Mathematical modeling of watershed hydrology. Journal of hydrologic engineering, 7(4), 270-292.*
- ✓ Témez, J. R. 1977. *Modelo Matemático de transformación “precipitación-escorrentía”. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. ASINEL. Madrid. 39pp.*
- ✓ Thornthwaite, C. W. (1948). *An approach toward a rational classification of climate. Geographical review, 38(1), 55-94.*
- ✓ United States Army Corps of Engineers (USACE). (2000). *HEC-HMS Technical Reference Manual. Hydrologic Engineering Center. Davis, United States.*
- ✓ Van Dijk, A.I.J.M., Kirby, J.M., Paydar, Z., Podger, G., Mainuddin, M., Marvanek, S., Arancibia, and Peña Arancibia, J. (2008). *Uncertainty in river modelling across the Murray-Darling Basin. A report to the Australian Government from the CSIRO Murray-Darling Basin Sustainable Yields Project. CSIRO Australia. 93pp.*
- ✓ Vélez, J. I. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual distribuido orientado a la simulación de crecidas. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.*
- ✓ Wang, Q. J., Pagano, T. C., Zhou, S. L., Hapuarachchi, H. A. P., Zhang, L., & Robertson, D. E. (2011). *Monthly versus daily water balance models in simulating monthly runoff. Journal of hydrology, 404(3), 166-175.*
- ✓ Wilby, R. L. (1997). *Contemporary Hydrology: Towards Holistic Environmental Science. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.*
- ✓ Xu, C.Y. (2002). *Hydrologic models. Department of Earth Sciences Hydrology, Uppsala University, 168 pp.*

8 ANEJOS

8.1 Estaciones de aforo

8.1.1 Subsistema del río Gállego

8.1.1.1 Estación 9840-Embalse de Lanuza

La estación 9840 se ubica sobre el río Gállego en la provincia de Huesca más exactamente en el municipio de Sallent de Gállego, tiene una cuenca aportante de 117 Km², un registro de 29 años comprendidos entre 1982 hasta 2011, de los cuales presenta 26 años hidrológicos completos y 3 incompletos para los datos de entrada al embalse de Lanuza y 27 años hidrológicos completos y 2 incompletos en referencia a los de salida.

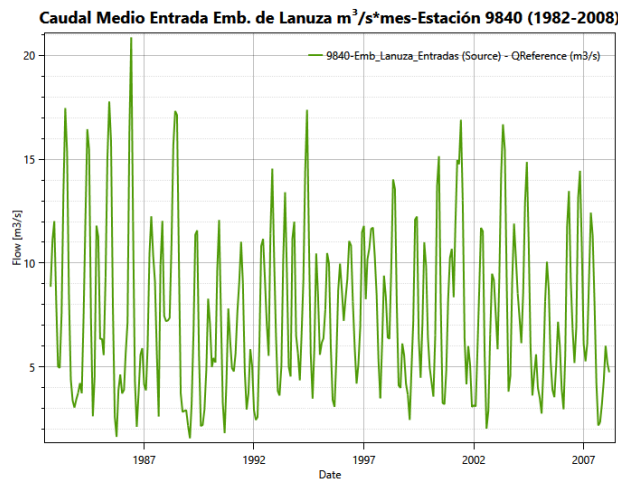


Figura 134. Caudal medio de entrada Estación 9840-Embalse de Lanuza.
Fuente: RS-Minerve.

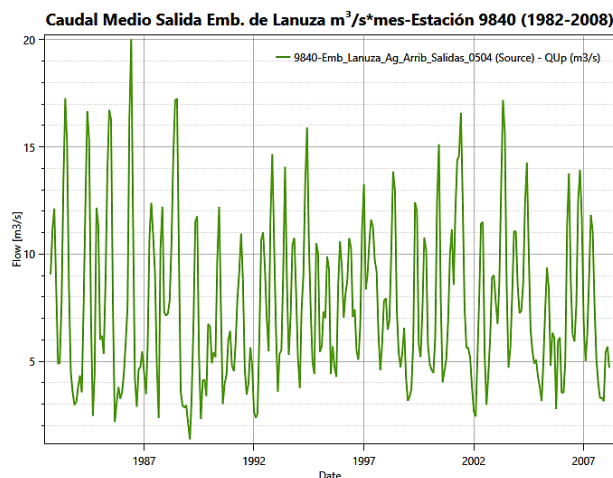


Figura 135. Caudal medio de salida Estación 9840-Embalse de Lanuza.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.1.2 Estación 9835-Embalse de Búbal

La estación 9835 se ubica en el cauce del río Gállego en la provincia de Huesca sobre en el municipio de Hoz de Jaca, tiene una cuenca aportante de 291 Km², con un registro de 41 años comprendidos entre 1970 y 2011, de los cuales solo tiene un año hidrológico con datos incompletos tanto para la entrada como para la salida del embalse de Búbal.

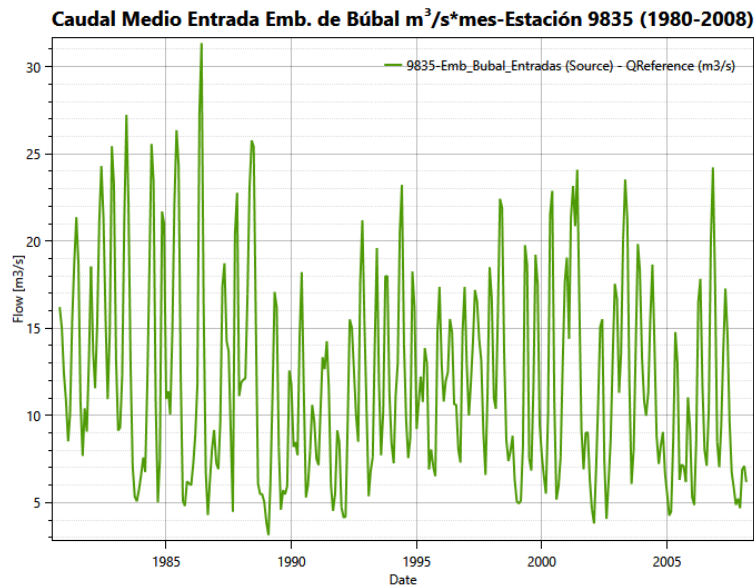


Figura 136. Caudal medio de entrada Estación 9835-Embalse de Búbal.
Fuente: RS-Minerve.

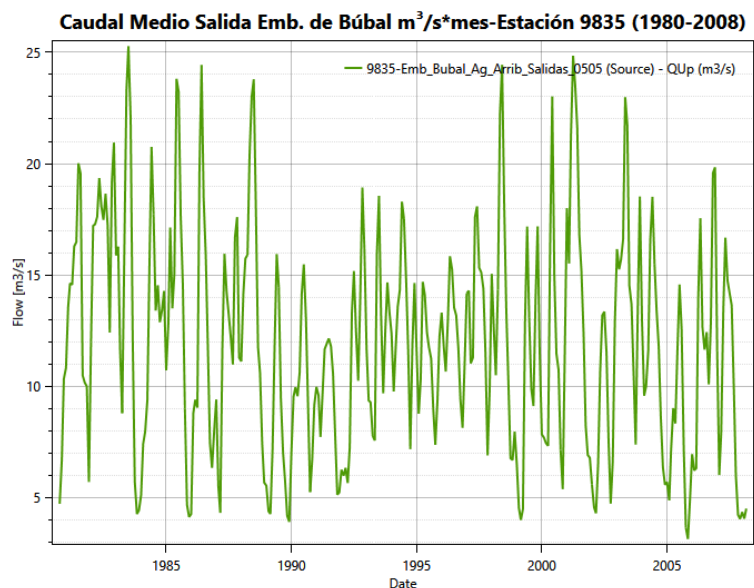


Figura 137. Caudal medio de salida Estación 9835-Embalse de Búbal.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.1.3 Estación 9123-Anzanigo

La estación 9123 se encuentra sobre el cauce del río Gállego en el municipio de Calearenas perteneciente a la provincia de Huesca, recibe las aguas de 1391 Km² de la cuenca aguas arriba, tiene un total de 61 años hidrológicos con datos entre 1949 y 2011, registra 59 años hidrológicos completos y 2 incompletos.

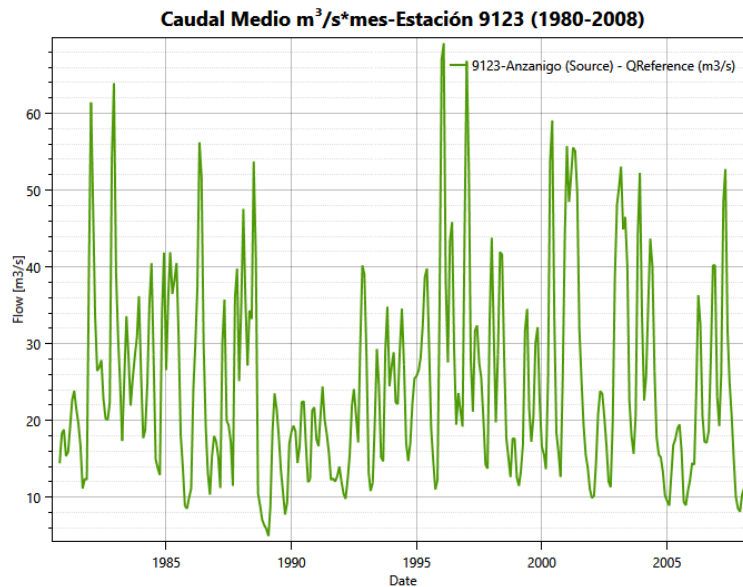


Figura 138. Caudal medio Estación 9123-Anzanigo.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.1.4 Estación 9836-Embalse de La Peña

La estación 9836 se ubica sobre el río Gállego en la provincia de Huesca más exactamente en el municipio de Las Peñas de Riglos, recibe las aguas de 1706 Km² de la cuenca aguas arriba, un registro entre 1945 hasta 2011 del embalse de la Peña, de los cuales para los caudales medios de entrada presenta 52 años hidrológicos con datos siendo 43 completos y 9 incompletos, en cuanto a los caudales medios de salida tiene 55 años hidrológicos con datos siendo 52 completos y 3 incompletos.

A pesar que las entradas al embalse tienen registro desde 1945 y sus datos buenos comienzan en 1982, el análisis se realizó desde 1997 debido a que los datos de 1982 a 1993 al parecer se encontraban erróneos ya que primero el embalse tiene una capacidad de 25 Hm³ y al comparar con la serie histórica de volumen embalsado siempre presentaba valores menores de 15 Hm³ a su vez en este mismo período según la serie de entradas también presentaba muy pocas y al comparar con las aportaciones que provenían de la cuenca aguas arriba no coincidían para nada siendo

mucho menores a 3stas, posteriormente hay un per3odo sin datos de 1993 a 1997, y posterior a 3ste de 1997 en adelante los datos si coincid3an much3simo mejor tanto el volumen embalsado como las aportaciones que ya eran m3s realistas, el volumen teniendo m3ximos de 25 Hm³ y las entradas eran coherentes con las aportaciones de aguas arriba, lo cual reflejaba un error en la toma o c3lculo de datos en la estaci3n 9836 del Embalse de La Peaa, todo lo anterior tambi3n se puede apreciar en los caudales medios de entrada y salida mostrados a continuaci3n.

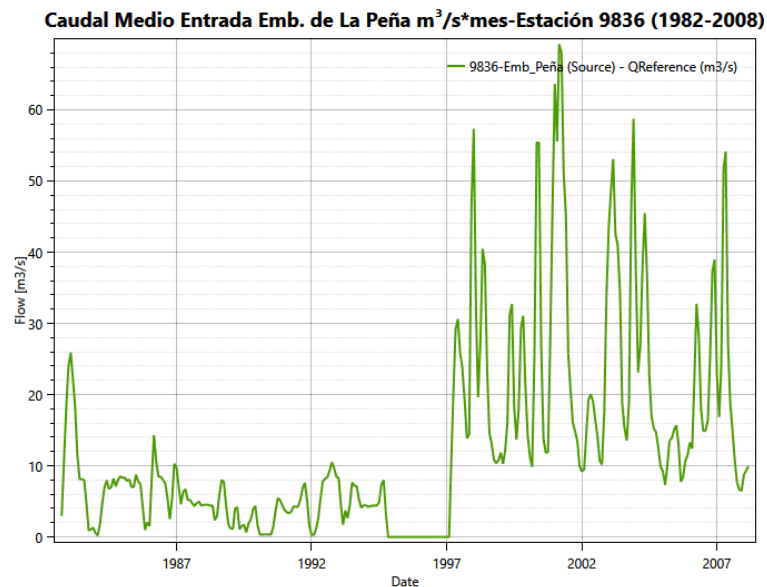


Figura 139. Caudal medio de entrada Estaci3n 9836-Embalse de La Peaa.
Fuente: RS-Minerve.

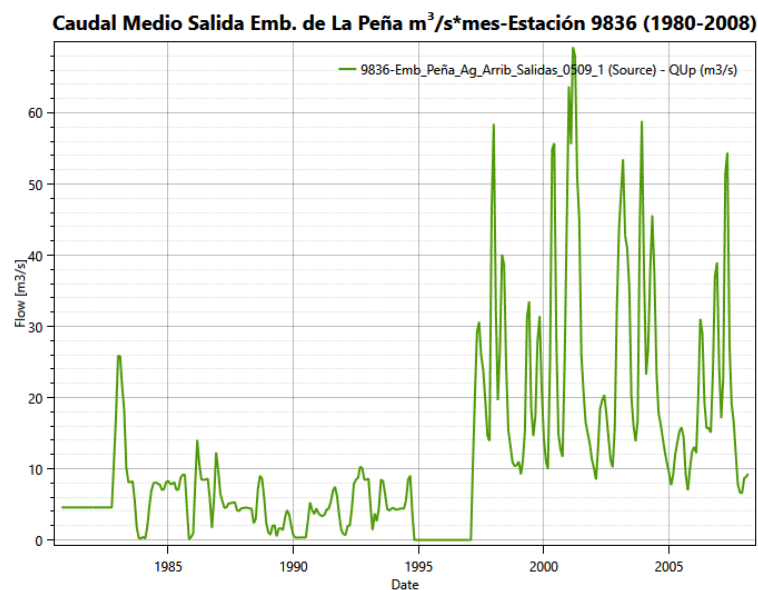


Figura 140. Caudal medio de salida Estaci3n 9836-Embalse de La Peaa.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.1.5 Estación 9059-Santa Eulalia

La estación 9059 se localiza en el cauce del río Gállego en el municipio de Murillo de Gállego perteneciente a la provincia de Zaragoza, recibe las aguas de 1901 Km² de la cuenca aguas arriba, tiene un total de 69 años hidrológicos con datos entre 1934 y 2011, registra 59 años hidrológicos completos y 10 incompletos.

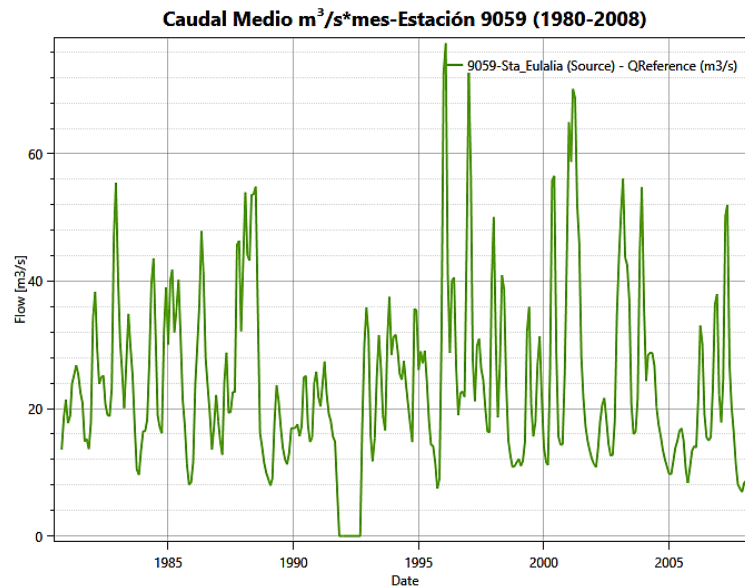


Figura 141. Caudal medio Estación 9059-Santa Eulalia
Fuente: RS-Minerve.

8.1.1.6 Estación 9837-Embalse de Ardisa

La estación 9837 se encuentra sobre el río Gállego en el municipio de Ardisa perteneciente a la provincia de Zaragoza, tiene una cuenca aportante de 2048 Km², con un registro entre 1945 hasta 2009 del embalse de Ardisa, de los cuales para los caudales de entrada presenta 62 años hidrológicos con datos siendo 58 completos y 4 incompletos, en cuanto a los caudales de salida tiene 62 años hidrológicos con datos siendo 60 completos y 2 incompletos.

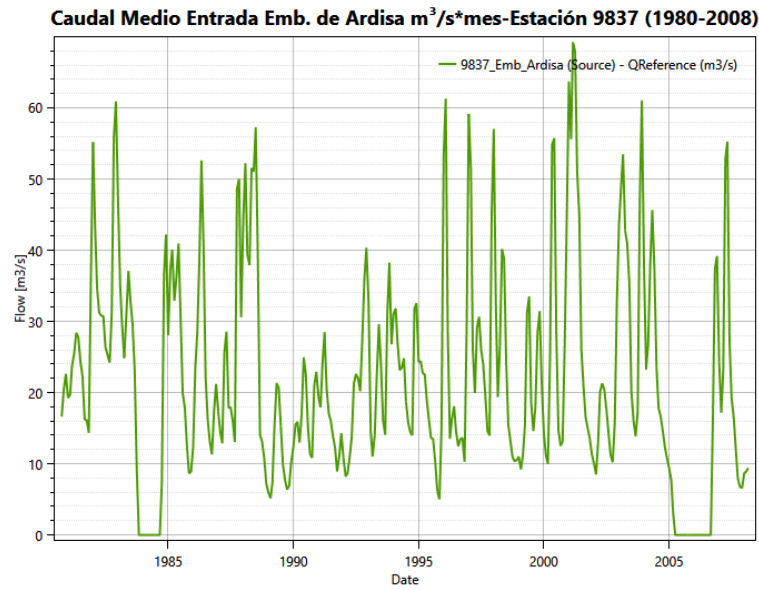


Figura 142. Caudal medio de entrada Estación 9837-Embalse de Ardisa.
Fuente: RS-Minerve.

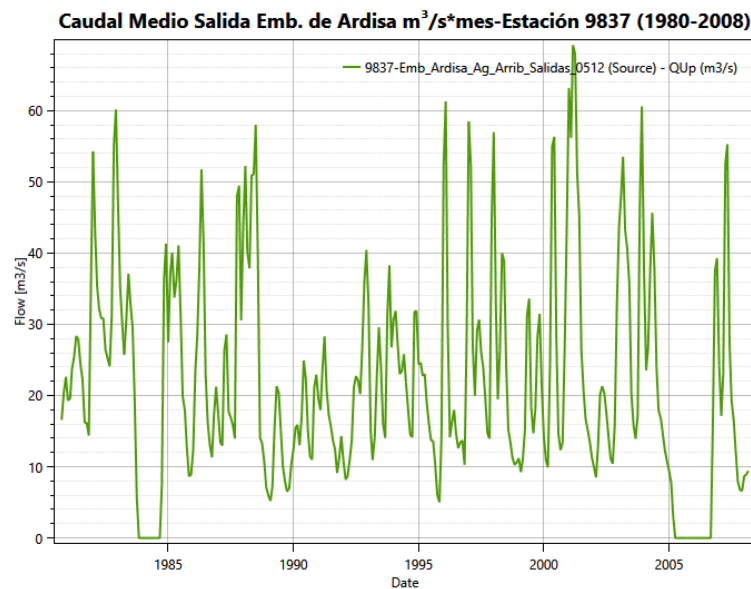


Figura 143. Caudal medio de salida Estación 9837-Embalse de Ardisa.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.1.7 Estación 9838-Embalse de La Sotonera

La estación 9838 se ubica en el río Sotón en la provincia de Huesca sobre en el municipio de Alcalá de Gurrea, tiene una cuenca aportante de 329 Km², con un registro de 68 años comprendidos entre 1944 y 2011, de los cuales solo tiene dos años hidrológicos con datos incompletos tanto para la entrada como para la salida del embalse de La Sotonera.

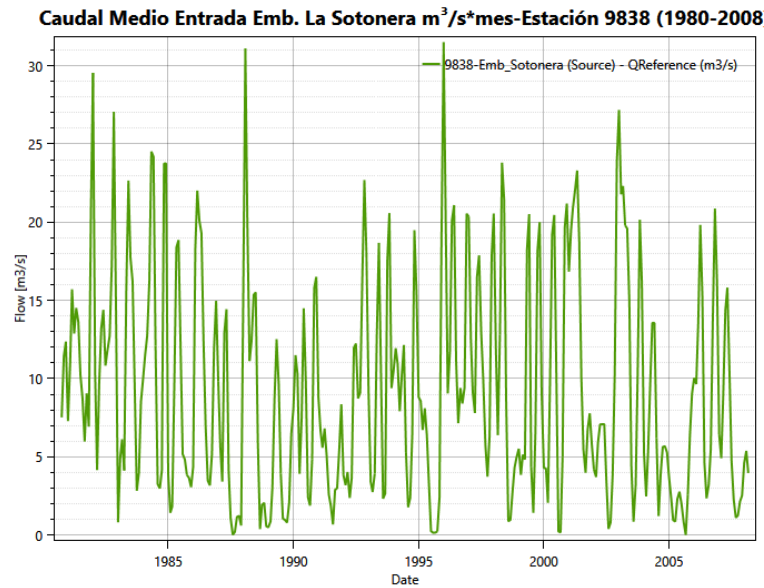


Figura 144. Caudal medio de entrada Estación 9838-Embalse de La Sotонера.
Fuente: RS-Minerve.

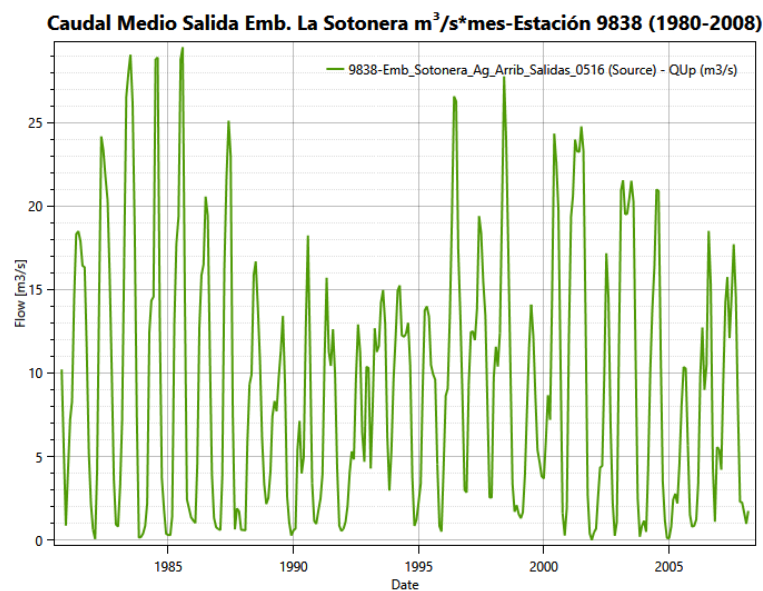


Figura 145. Caudal medio de salida Estación 9838-Embalse de La Sotонера.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.1.8 Estación 9255-Ortilla

La estación 9255 se encuentra en el río Sotón en el municipio de Lupiñén-Ortilla perteneciente a la provincia de Huesca, recibe las aguas de 200 Km² de la cuenca aportante aguas arriba, tiene un total de 20 años hidrológicos con datos entre 1992 y 2011, registrando datos completos en toda la serie histórica.

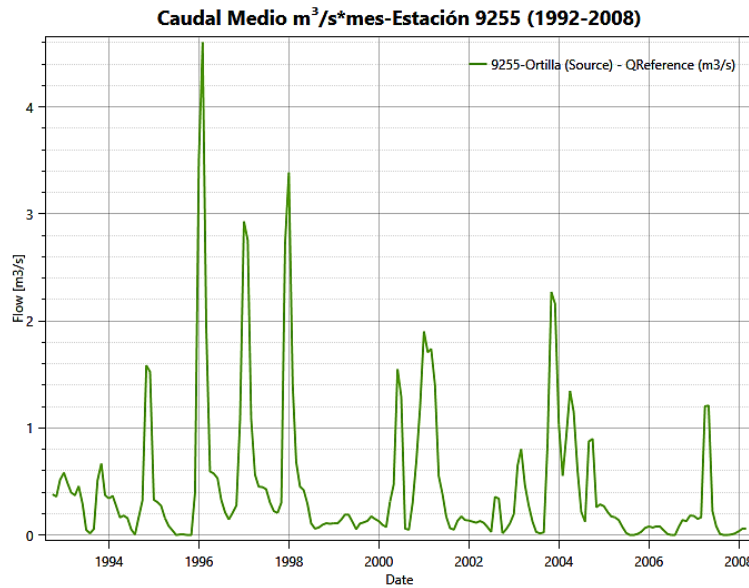


Figura 146. Caudal medio Estaci3n 9255-Ortilla.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.1.9 Estaci3n 90489-Zaragoza

La estaci3n 9089 se localiza en el cauce del r3o G3llego en el municipio de Zaragoza perteneciente a la provincia de Zaragoza unos metros antes de su desembocadura en el r3o Ebro, recibe las aguas de 4008 Km² de toda la cuenca aguas arriba la cual es en s3 la cuenca del r3o G3llego, tiene un total de 15 a3os hidrol3gicos con datos entre 1973 y 2006, de estos son 14 a3os hidrol3gicos completos y 3nicamente una incompleto. Posee datos de dos per3odos de tiempo el primero de 1973 a 1977 y el segundo de 1997 a 2006.

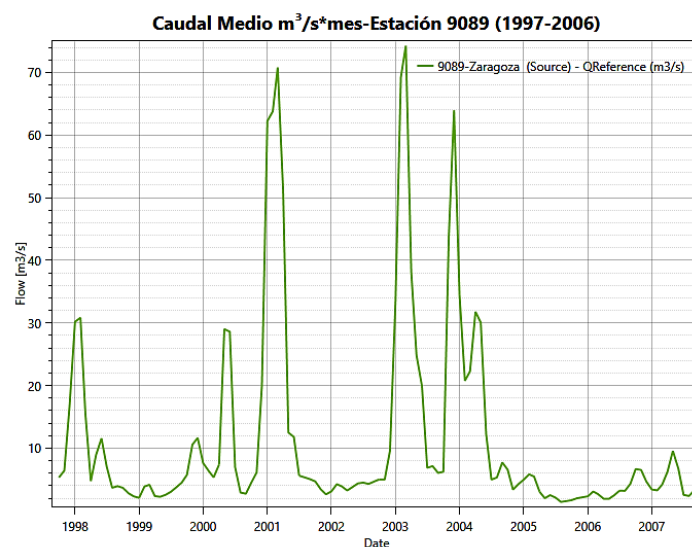


Figura 147. Caudal medio Estaci3n 9089-Zaragoza.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2 Subsistema del río Cinca

8.1.2.1 Estación 9190-Quicena

La estación 9190 se localiza sobre el cauce del río Flumen en la provincia de Huesca más exactamente en el municipio de Quicena, tiene una cuenca aportante de 160 Km², con un registro de 34 años comprendidos entre 1978 y 2011, de estos son 28 años hidrológicos con datos completos y 6 incompletos.

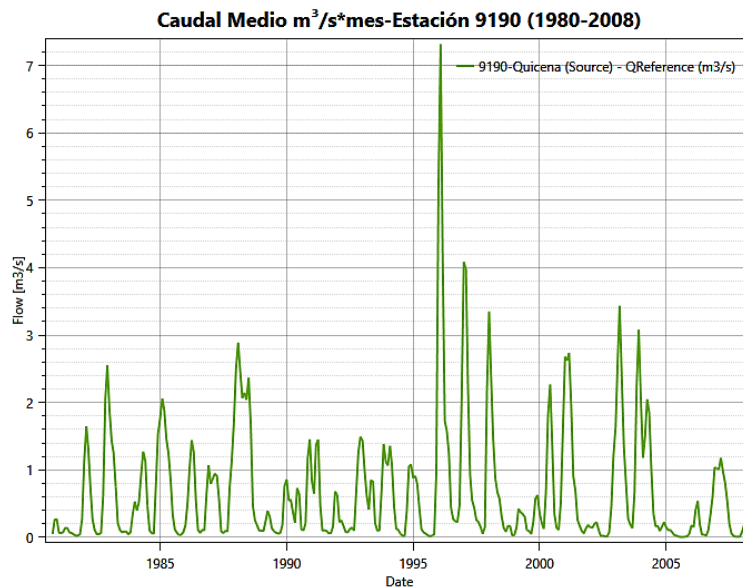


Figura 148. Caudal medio Estación 9190-Quicena.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.2 Estación 9191-Barbués

La estación 9191 se encuentra en el río Flumen en el municipio de Barbués perteneciente a la provincia de Huesca, recibe las aguas de 534 Km² de la cuenca aguas arriba, tiene un total de 34 años hidrológicos con datos entre 1978 y 2011, registra 24 años hidrológicos con datos completos y 10 incompletos.

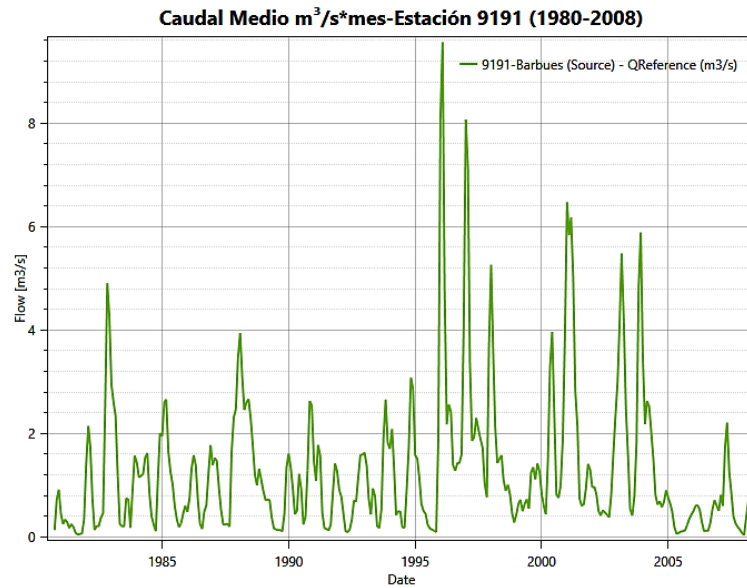


Figura 149. Caudal medio Estación 9191-Barbués.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.3 Estación 9094-Albalatillo

La estación 9094 se localiza en el cauce del río Fumen en el municipio de Sariñena perteneciente a la provincia de Huesca, tiene una cuenca aportante de 1499 Km², con un registro de 20 años comprendidos entre 1992 y 2011, de estos 17 son años hidrológicos con datos completos e incompletos 3.

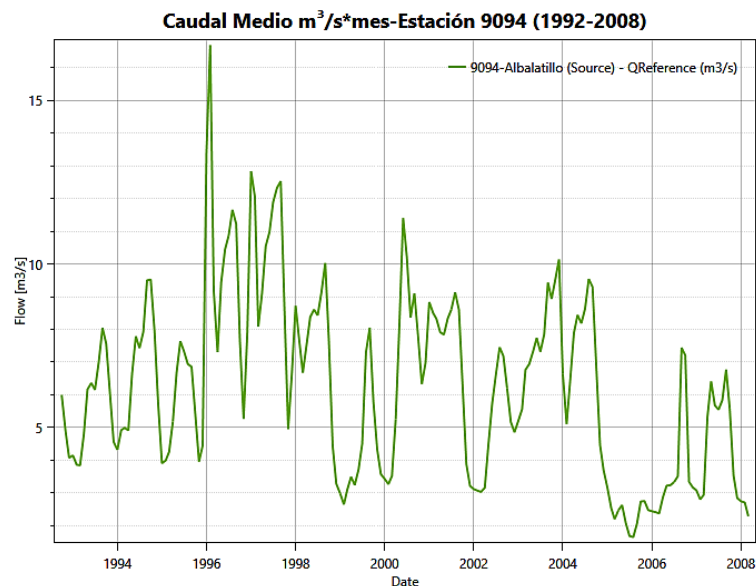


Figura 150. Caudal medio Estación 9094-Albalatillo.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.4 Estación 9841-Embalse de Vadiello

La estación 9841 se ubica sobre el río Guatzalema en la provincia de Huesca más exactamente en el municipio de Loporzano, tiene una cuenca aportante de 90 Km², un registro de 28 años comprendidos entre 1978 hasta 2011, de los cuales presenta 27 años hidrológicos completos y solo 1 incompleto para los datos de entrada al embalse de Lanuza y todos los 28 años completos con respecto a los de salida. Posee datos de dos períodos de tiempo el primero de 1978 a 1979 y el segundo de 1985 a 2011.

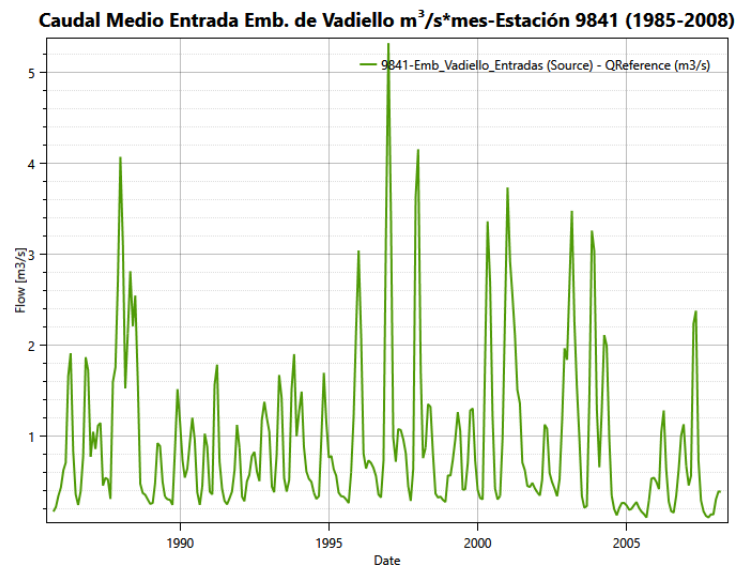


Figura 151. Caudal medio de entrada Estación 9841-Embalse de Vadiello. Fuente: RS-Minerve.

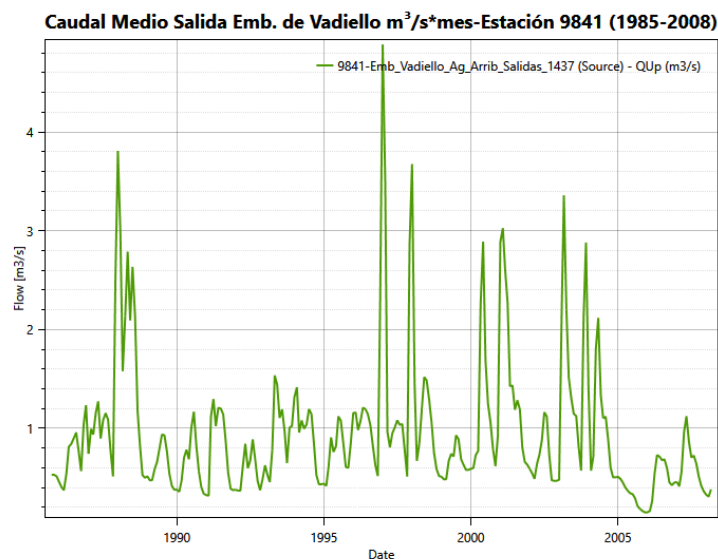


Figura 152. Caudal medio de salida Estación 9841-Embalse de Vadiello. Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.5 Estación 9192-Siétamo

La estación 9192 se encuentra en el río Guatzalema en el municipio de Siétamo perteneciente a la provincia de Huesca, recibe las aguas de 135 Km² de la cuenca aguas arriba, un registro de datos desde 1975 hasta 2011 para un total de 37 años hidrológicos, teniendo 31 de ellos con datos completos y 6 incompletos.

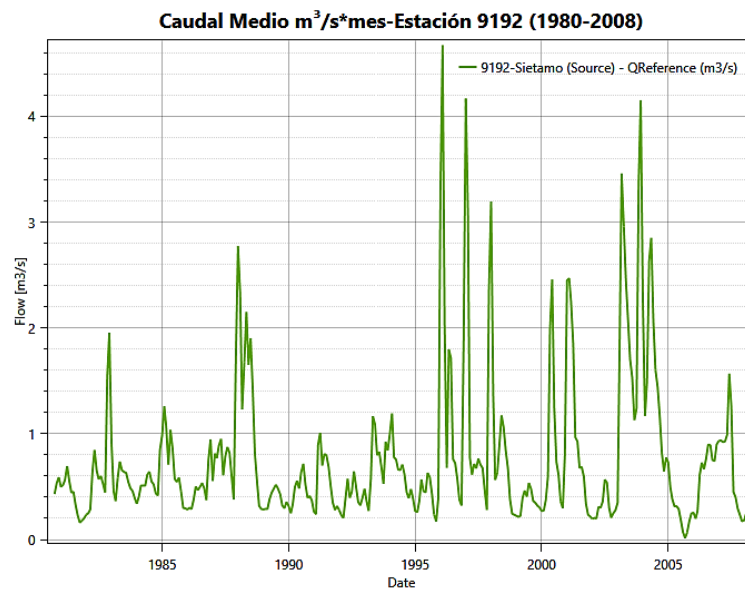


Figura 153. Caudal medio Estación 9192-Siétamo.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.6 Estación 9032-Peralta de Alcofea_Guatzalema

La estación 9032 se localiza sobre el cauce del río Guatzalema en la provincia de Huesca y en el municipio de Huerto, tiene una cuenca aportante de 362 Km², con un registro de 69 años comprendidos entre 1928 y 2011, de estos son 14 años hidrológicos con datos incompletos y 55 completos.

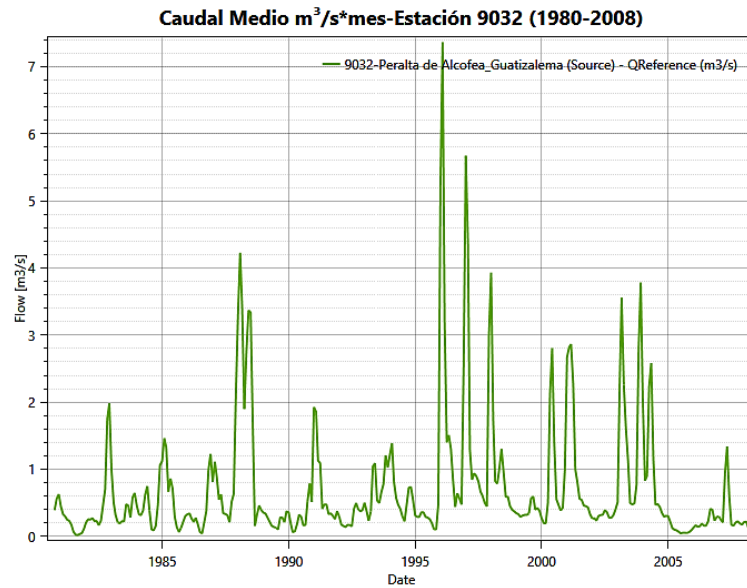


Figura 154. Caudal medio Estación 9032-Peralta de Alcofea_Guatzalema.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.7 Estación 9091-Lascellas

La estación 9091 se ubica en el cauce del río Alcanadre en el municipio de Angüés perteneciente a la provincia de Huesca, tiene una cuenca aportante de 501 Km², con un registro de 64 años comprendidos entre 1944 y 2011, de estos 50 son años hidrológicos con datos completos e incompletos 14.

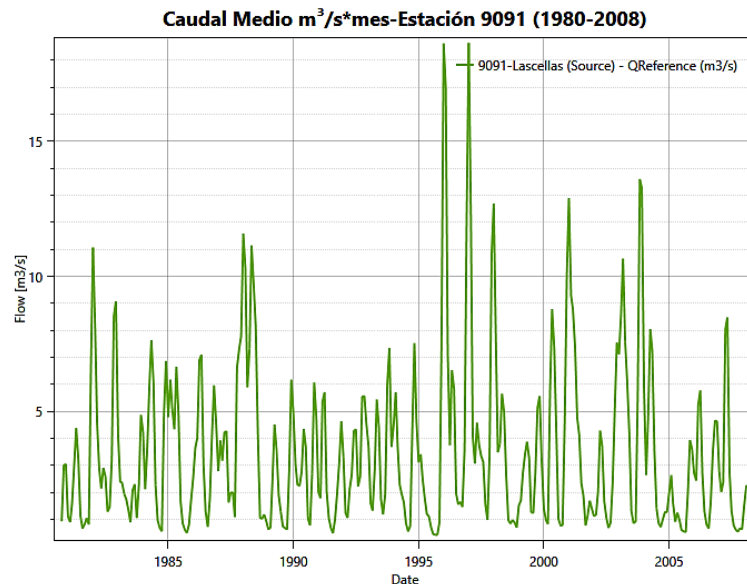


Figura 155. Caudal medio Estación 9091-Lascellas.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.8 Estación 9033-Peralta de Alcofea_Alcanadre

La estación 9033 se encuentra sobre el cauce del río Alcanadre en el municipio de Huerto perteneciente a la provincia de Huesca, recibe las aguas de 765 Km² de la cuenca aguas arriba, tiene un total de 69 años hidrológicos con datos entre 1928 y 2011, registra 55 años hidrológicos completos y 14 incompletos

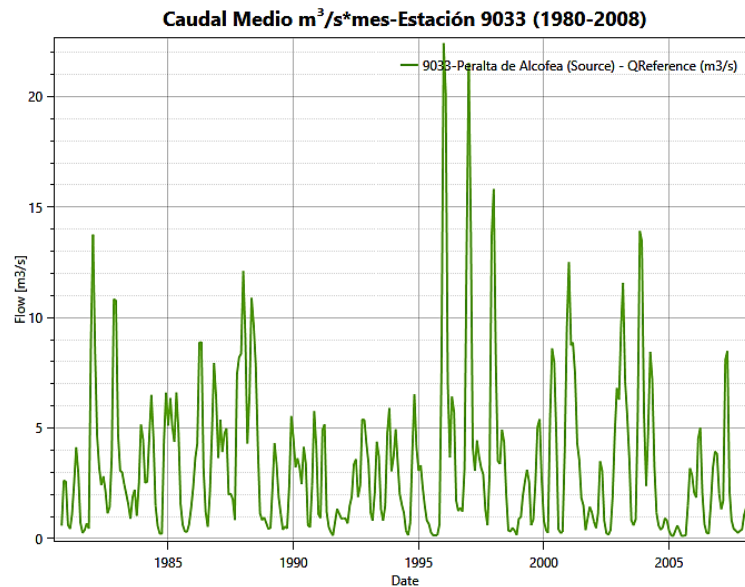


Figura 156. Caudal medio Estación 9033-Peralta de Alcofea_Alcanadre.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.9 Estación 9193-Ballobar

La estación 9193 se localiza en el río Alcanadre en la provincia de Huesca más exactamente en el municipio de Ballobar, recibe las aguas de 3390 Km² de la cuenca aguas arriba, un registro de datos desde 1988 hasta 2011 para un total de 24 años hidrológicos, teniendo 20 de ellos con datos completos y 4 incompletos.

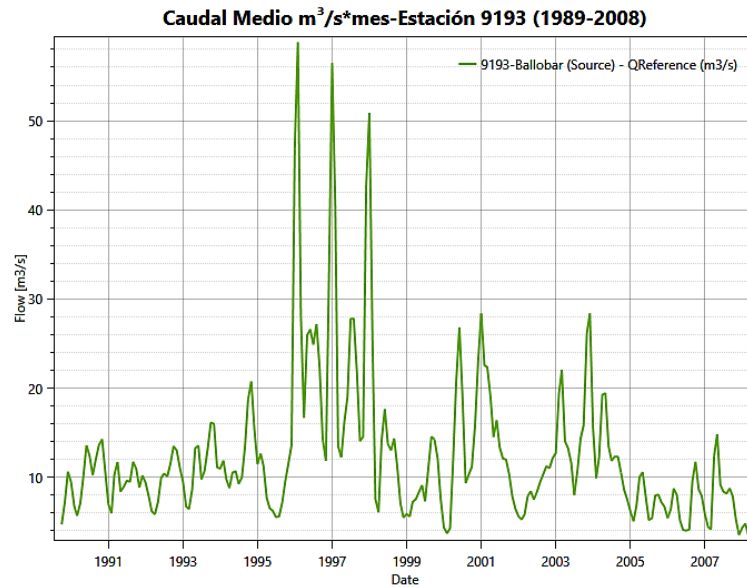


Figura 157. Caudal medio Estaci3n 9193-Ballobar.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.10 Estaci3n 9046-Lecina

La estaci3n 9046 se encuentra en el r3o Vero en el municipio de B3rcabo el cual hace parte de la provincia de Huesca, recibe las aguas de 110 Km² de la cuenca aguas arriba, tiene un total de 55 a3os hidrol3gicos con datos entre 1931 y 2008, de estos son 12 a3os hidrol3gicos incompletos y 43 completos.

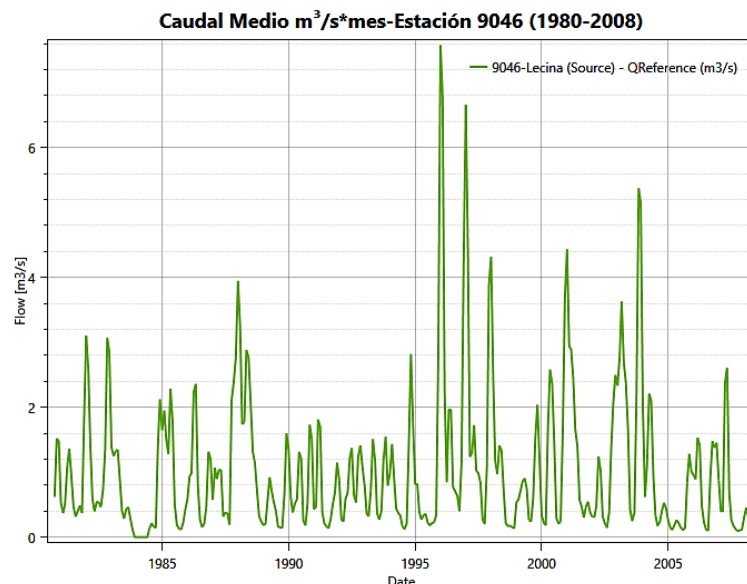


Figura 158. Caudal medio Estaci3n 9046-Lecina.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.11 Estación 9095-Barbastro

La estación 9095 se ubica sobre en el cauce del río Vero en la provincia de Huesca y en el municipio de Barbastro, tiene una cuenca aportante de 345 Km², con un registro de 61 años comprendidos entre 1945 y 2011, de estos 61 son años hidrológicos con datos completos e incompletos 12.

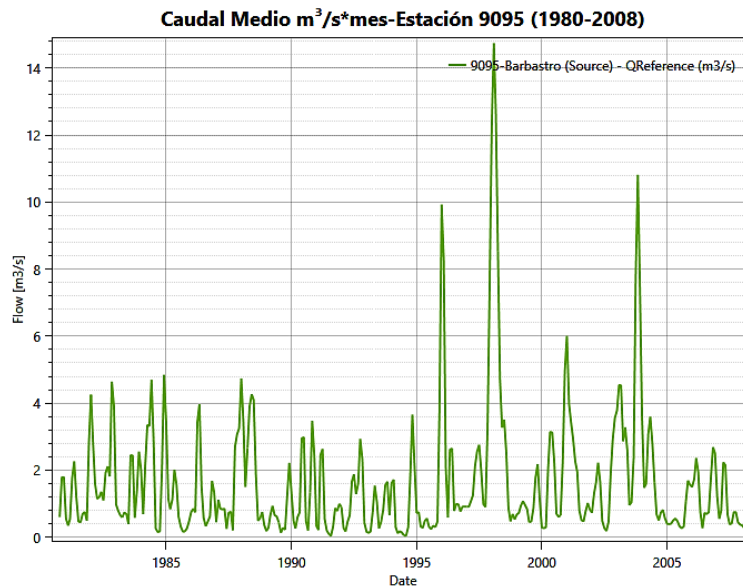


Figura 159. Caudal medio Estación 9095-Barbastro.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.12 Estación 9849-Embalse de Plandescún

La estación 9849 se localiza en el río Cinqueta en la provincia de Huesca, en el municipio de Plan, su cuenca aportante tiene un área de 157 Km², la serie de datos históricos registrados se compone de 43 años hidrológicos entre 1950 y 1993, teniendo para el caudal de entrada 39 años hidrológicos con datos completos y 4 incompletos, en cuanto al caudal de salida se tienen 40 completos y 3 incompletos.

Los registros de esta estación no corresponden con el período base de la simulación a realizar de 1980 a 2008, sino que es una estación que ya no se encuentra en funcionamiento, con lo que el período seleccionado fue de 1965 a 1993 para que tuviera la misma cantidad de años que el período base, lo mismo sucede con las próximas estaciones como la 9845-Embalse de Pineta, 9172-Lafortunada y 9051-Escalona, de manera similar con la 9196-Torla pero en ese caso se toma desde 1967.

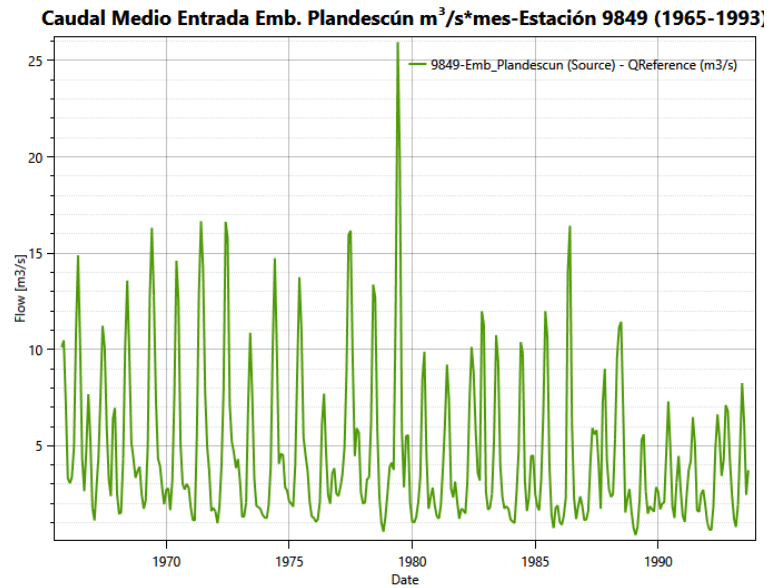


Figura 160. Caudal medio de entrada Estación 9849-Embalse de Plandescún.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.13 Estación 9845-Embalse de Pineta

La estación 9845 correspondiente al embalse de Pineta se ubica sobre el río Cinca en el municipio de Bielsa correspondiente a la provincia de Huesca, el período de registro de datos está comprendido entre los años hidrológicos 1949 y 1993, teniendo de estos 44 años hidrológicos sólo 1 incompleto tanto para el caudal de salida como de entrada. Posee 73 Km² de cuenca aguas arriba del embalse.

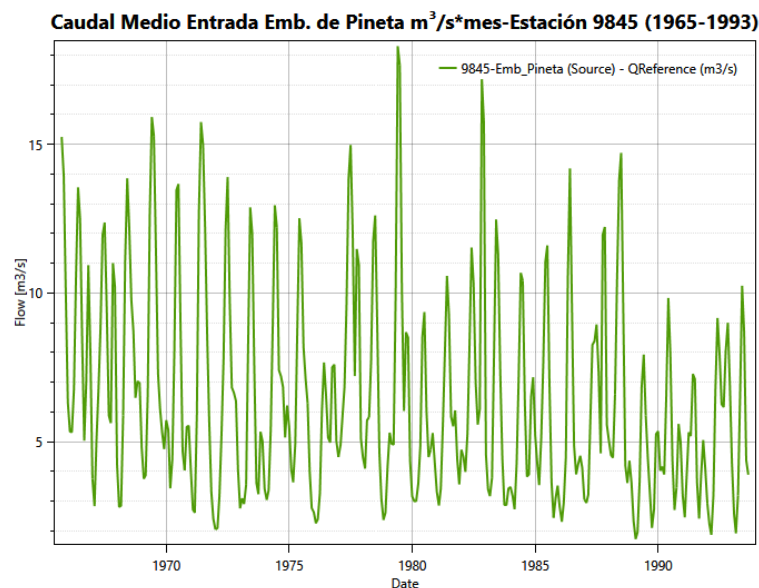


Figura 161. Caudal medio de entrada Estación 9845-Embalse de Pineta.
Fuente: RS-Minerve.

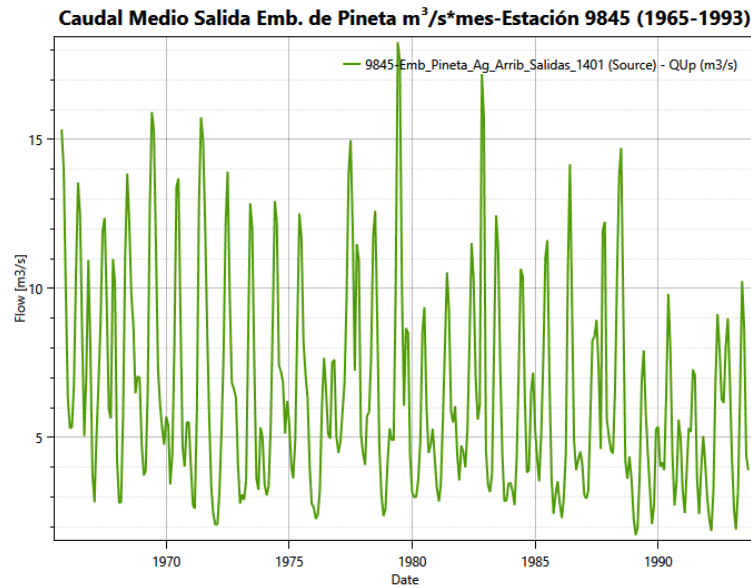


Figura 162. Caudal medio de salida Estación 9845-Embalse de Pineta.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.14 Estación 9172-Lafortunada

La estación 9172 se encuentra en el cauce del río Cinca en la provincia de Huesca en las inmediaciones del municipio de Tella-Sin, posee una serie histórica de datos de aforo de caudales entre 1965 hasta 1993 siendo así 28 años hidrológicos y todos ellos tienen un registro completo sin faltar ningún dato de ningún mes. Su cuenca aportante tiene un área aproximada de 453 Km².

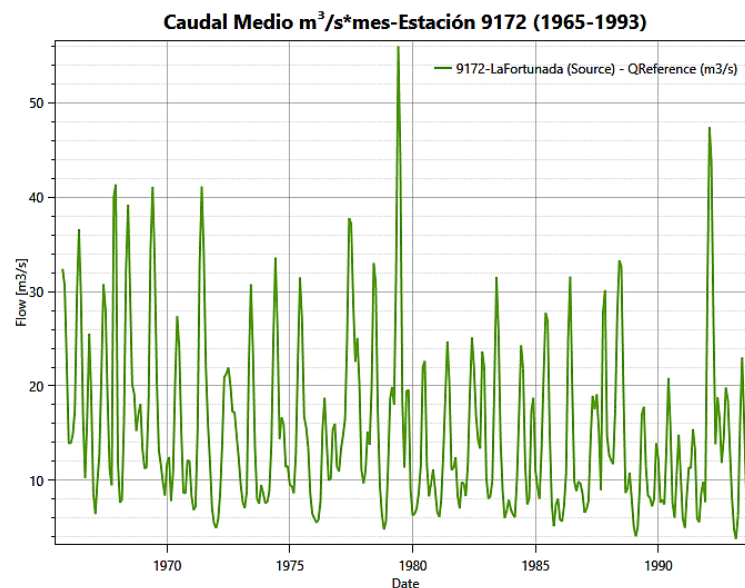


Figura 163. Caudal medio Estación 9172-Lafortunada.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.15 Estación 9051-Escalona

La estación 9051 se localiza en el río Cinca en el municipio de Puertólas de la provincia de Huesca, la cuenca que viene hacia esta estación es de 835 Km². Tiene un registro de 37 años hidrológicos con datos los cuales son completos en su totalidad y el período aforado es de 1959 a 2011.

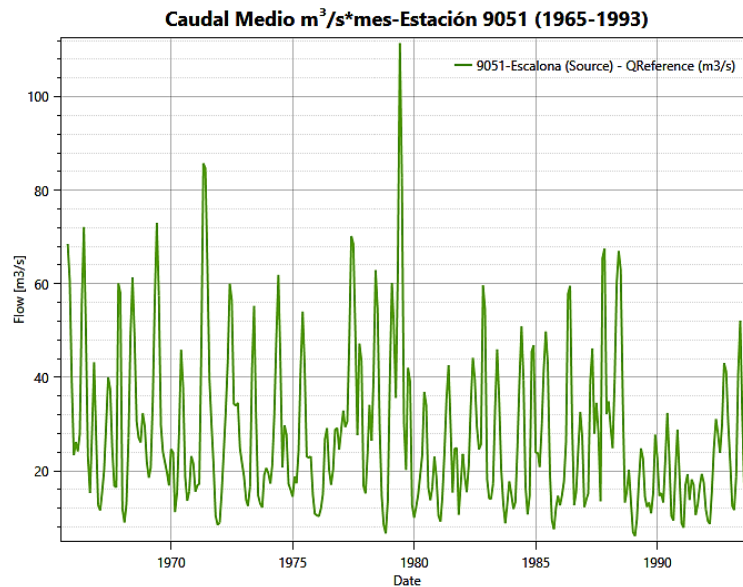


Figura 164. Caudal medio Estación 9051-Escalona.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.16 Estación 9196-Torla

La estación 9196 se sitúa en el cauce del río Ara en la provincia de Huesca más exactamente en el municipio de Torla, el área total de la cuenca aportante es de 180 Km². Los datos de aforo que tiene son del período de 1967 a 1992, contando así con 26 años hidrológicos de registro de los cuales todos se encuentran completos y correctos.

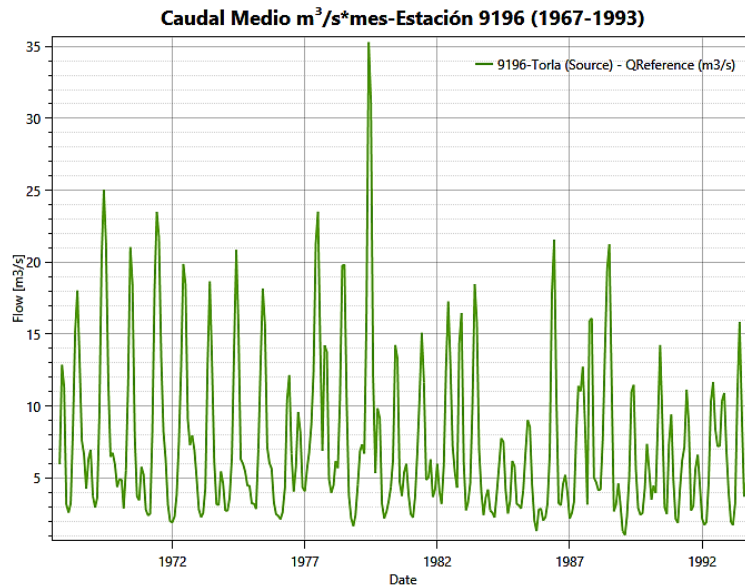


Figura 165. Caudal medio Estaci3n 9196-Torla.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.17 Estaci3n 9040-Boltaña

La estaci3n 9040 se ubica en el r3o Ara, su cuenca aguas arriba de la misma cuenta con 626 Km² en el municipio de Boltaña perteneciente a la provincia de Huesca. Un registro de datos para 67 aÑos hidrol3gicos comprendidos entre 1944 y 2011, de los cuales 55 tienen los datos completos y 12 incompletos.

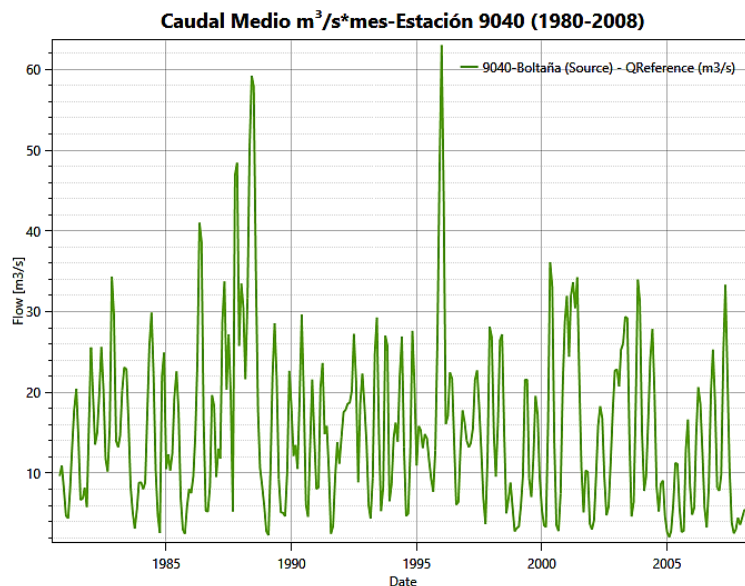


Figura 166. Caudal medio Estaci3n 9040-Boltaña
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.18 Estación 9846-Embalse de Mediano

La estación 9846 se encuentra en el río Cinca en el municipio de La Fueva perteneciente a la provincia de Huesca, tiene una cuenca aportante de 1837 Km², posee un total de 42 años hidrológicos con datos entre 1970 y 2011, teniendo en su totalidad datos completos tanto para caudal de entrada como el de salida del embalse de Mediano.

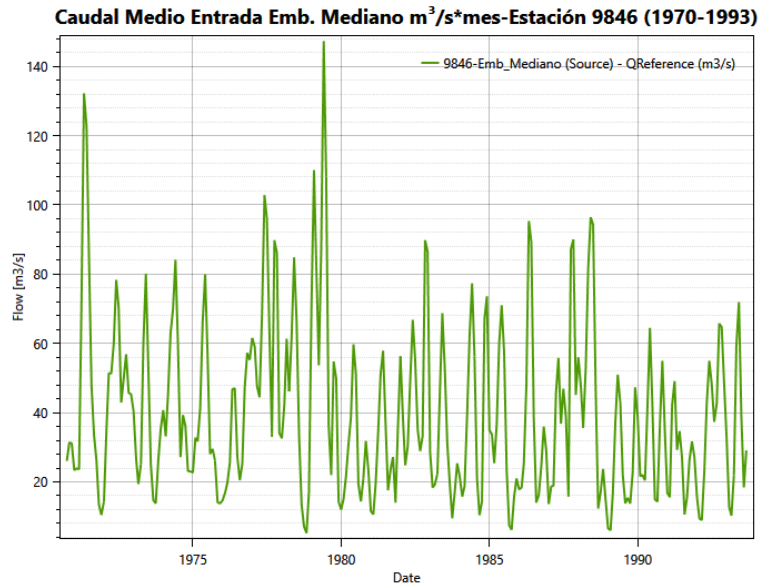


Figura 167. Caudal medio de entrada Estación 9846-Embalse de Mediano.
Fuente: RS-Minerve.

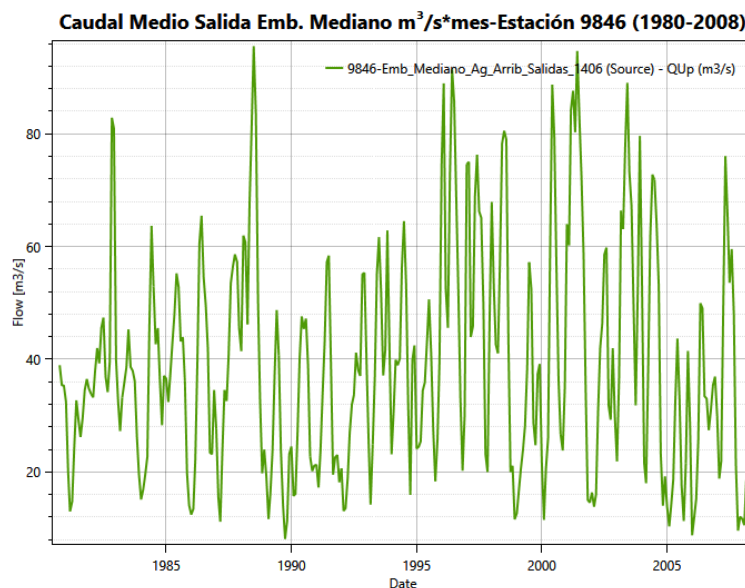


Figura 168. Caudal medio de salida Estación 9846-Embalse de Mediano.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.19 Estación 9847-Embalse de El Grado

La estación 9847 se ubica sobre el río Cinca en la provincia de Huesca más exactamente en el municipio de El Grado, recibe las aguas de 2137 Km² de la cuenca aguas arriba, un registro entre 1966 hasta 2011 del embalse de El Grado, posee datos completos de todos los 46 años hidrológicos tanto para el caudal medio de entrada como el de salida.

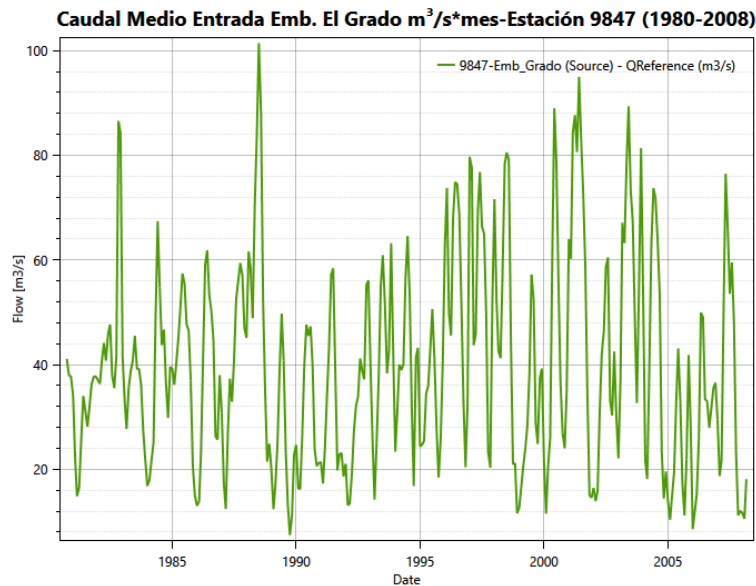


Figura 169. Caudal medio de entrada Estación 9847-Embalse de El Grado.
Fuente: RS-Minerve.

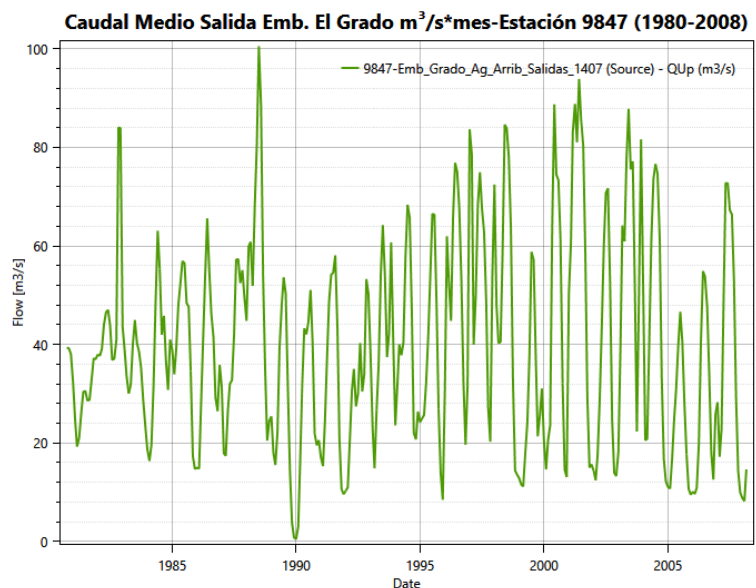


Figura 170. Caudal medio de salida Estación 9847-Embalse de El Grado.
Fuente: RS-Minerve.

8.1.2.20 Estación 9017-Fraga

La estación 9017 se localiza en el cauce del río Cinca en el municipio de Fraga perteneciente a la provincia de Huesca unos metros antes de su desembocadura en el río Segre que posteriormente muy cerca de ésta confluencia a su vez desemboca en el río Ebro, recibe las aguas de 9612 Km² de toda la cuenca aguas arriba la cual incluye a la del presente estudio que es la cuenca del río Cinca perteneciente al sistema de explotación Gállego-Cinca y la cuenca del río Ésera que es un afluente al río Cinca por margen derecha unos kilómetros aguas abajo del embalse de El Grado la cual pertenece al sistema de explotación Ésera-Noguera Ribagorzana como se mencionó previamente, tiene un total de 66 años hidrológicos con datos entre 1928 y 2011, de estos son 51 años hidrológicos completos y 15 incompletos. Se encuentra sin datos o con muy pocos entre 1988 y 1997.

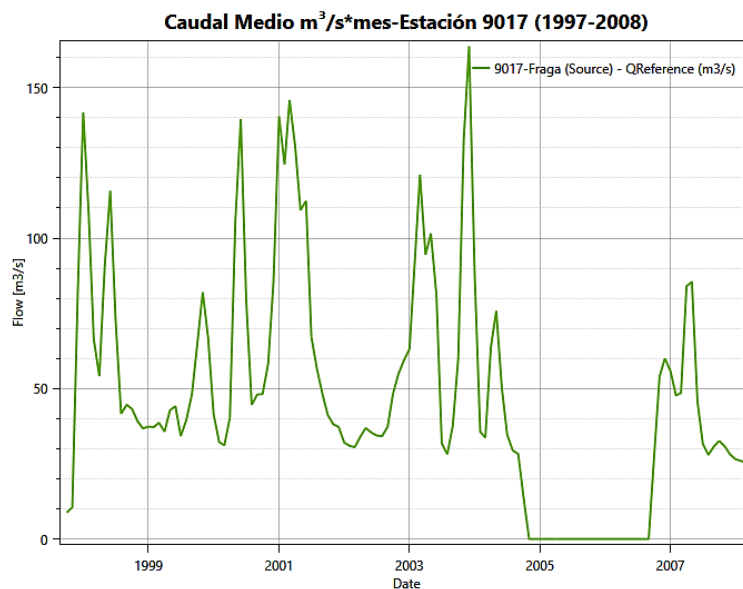


Figura 171. Caudal medio Estación 9017-Fraga.

Fuente: RS-Minerve.