

Trabajo Fin de Máster

APLICACIÓN DE UN MODELO SEMIDISTRIBUIDO DE PRECIPITACIÓN- ESCORRENTÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO JALÓN.

Intensificación: *HIDRÁULICA URBANA*

Autor:

DANIEL ANTONIO CHUQUÍN VASCO

Director:

D. JAVIER PAREDES ARQUIOLA

Codirector/es:

D. NÉSTOR LERMA ELVIRA

Junio, 2016



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título: APLICACIÓN DE UN MODELO SEMIDISTRIBUIDO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO JALÓN.

Alumno: Daniel Antonio Chuquin Vasco

E-mail: dachuvas@alumno.upv.es

Director: D. Javier Paredes Arquiola.

Codirector: D. Néstor Lerma Elvira.

Resumen

El estudio tiene como principal objetivo evaluar los recursos hídricos en la cuenca del río Jalón la cual tiene una superficie de 9718 km², con esto se pretende tener un conocimiento más a detalle desde el punto de vista hidrológico del comportamiento de las subcuencas que se extienden a lo largo del sistema de explotación del Jalón, la cual constituye uno de los principales afluentes del río Ebro.

Para alcanzar este objetivo se ha desarrollado un modelo hidrológico precipitación-escorrentía (MPE) semidistribuido con el fin de evaluar los efectos que se producen sobre las características de la cuenca en estudio en base a la respuesta hidrológica de cada subcuenca hidrográfica que componen el sistema.

El modelo utilizado fue el HBV que se trata de un modelo conceptual semidistribuido desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia, este permite la modelación hidrológica con un número no muy elevado de parámetros por lo que es bastante versátil y ha demostrado ser flexible y robusto en varios estudios desarrollados.

La herramienta empleada para la modelación ha sido RS Minerve 2.0 desarrollado por CREALP e Hidrocosmos SA en colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia. Este software simula los procesos de precipitación-escorrentía y se basa en la programación orientada a objetos dando lugar a la modelación hidrológica e

hidráulica tomando como referencia un esquema semidistribuido conceptual que en se centra en este caso en la cuenca del río Jalón.

El desarrollo del modelo, tanto en su proceso de calibración y validación del mismo, es posible gracias a los datos de series históricas de caudales registrados en las estaciones de aforo situadas en la cuenca, mismos que son obtenidos a partir de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (R.O.E.A), y otros datos como demandas de la cuenca, seguimiento de embalse etc., que provienen de un sistema de gestión (Simges) previamente desarrollado y utilizado por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). En lo concerniente a los datos meteorológicos (inputs al MPE) se empleó la base de datos de Spain02 v2.1 desarrollado por el Departamento de Matemáticas Aplicadas, y el grupo de meteorología de la Universidad de Santander en conjunto con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) que consiste en un red mallada de datos de precipitación y temperatura de 50 años de alta resolución, válido para toda la Península de España y las Islas Baleares. A partir de la generación del modelo lo que se trató esencialmente es estudiar el comportamiento de cada una de las subcuencas en lo que respecta a los procesos que se llevan a cabo en la superficie tales como escorrentía directa, los flujos subterráneos debidos a la infiltración así como también los efectos de laminación de los caudales por la presencia de estructuras de regulación tales como embalses, así como la influencia que presenta la cobertura vegetal en los procesos.

Finalmente destacar la importancia de las aportaciones generadas por el modelo, que siendo debidamente validado puede resultar fundamental para posteriores trabajos en materia de gestión y planificación hidrológica, gestión de caudales ecológicos, estimación de garantías de las demandas etc. Estas aportaciones han sido comparadas con las aportaciones en régimen natural del modelo SIMPA, desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras de Públicas (CEDEX) y empleado por la CHE, con el fin de estimar si ellos están sobreestimando o infravalorando las aportaciones, es decir es posible determinar los posibles errores que se pueden estar cometiendo.

Resum

L'estudi té com a principal objectiu, l'avaluació del recursos hídrics a la conca del riu Xaló, la qual té una superfície de 9718 km². Amb açò, es pretén tindre un coneiximent, més detallat, des del punt de vista hidrològic, del comportament de les subconques que s'estenen al llarg del sistema d'explotació del Xaló, la qual constitueix un dels principals afluents del riu Ebre.

Per assolir aquest objectiu s'ha desenvolupat un model hidrològic precipitació-escolament (MPE) semidistribuit per tal d'avaluar els efectes que es produeixen sobre les característiques de la conca, en estudi sobre la base de la resposta hidrològica de cada subconca hidrogràfica que componen el sistema.

El model utilitzat va ser el HBV que es tracta d'un model conceptual semidistribuit, desenvolupat per l'Institut Meteorològic i Hidrològic de Suècia, aquest permet la modelació hidrològica amb un nombre no molt elevat de paràmetres, pel que és bastant versàtil i ha demostrat ser flexible i robust en diversos estudis desenvolupats.

L'eina emprada per a la modelació ha sigut RS Minerve 2.0, desenvolupat per CREALP i Hidrocosmos SA en col·laboració amb la Universitat Politècnica de València. Aquest programa simula els processos de precipitació-escolament i es basa en la programació orientada a objectes donant lloc a la modelació hidrològica i hidràulica prenent com a referència un esquema semidistribuit conceptual que es centra en aquest cas a la conca del riu Xaló.

El desenvolupament del model, tant en el seu procés de calibració i validació, és possible gràcies a les dades de sèries històriques de cabals registrats a les estacions d'aforament situades a la conca, dades obtingudes a partir de la Xarxa Oficial d'Estacions d'Aforament (R.O.E.A), i altres dades com demandes de la conca, seguiment d'embassament etc., que provenen d'un sistema de gestió (SIMGES) prèviament desenvolupat i utilitzat per la Confederació Hidrogràfica del Ebre (CHE).

Pel que fa a les dades meteorològiques (inputs a MPE) es va emprar la base de dades de Spain02 v2.1 desenvolupat pel Departament de Matemàtiques Aplicades, i el grup de Meteorologia de la Universitat de Santander en conjunt amb l'Agència Estatal de

Meteorología (AEMET) que consisteix en un xarxa mallada de dades de precipitació i temperatura de 50 anys d'alta resolució, vàlid per a tota la Península d'Espanya i les Illes Balears. A partir de la generació del model, el que es va tractar essencialment és estudiar el comportament de cadascuna de les subconques pel que fa als processos que es duen a terme a la superfície com ara vessament directa, els fluxos subterranis a causa de la infiltració així com també els efectes de laminació dels cabals per la presència de estructures de regulació tals com embassaments, així com la influència que presenta la cobertura vegetal en els processos.

Finalment destacar la importància de les aportacions generades pel model, que sent degudament validades poden resultar fonamental per a posteriors treballs en matèria de gestió i planificació hidrològica, gestió de cabals ecològics, estimació de garanties de les demandes etc. Aquestes aportacions han estat comparades amb les aportacions en règim natural del model SIMPA, desenvolupat pel Centre d'Estudis i Experimentació d'Obres de Públiques (CEDEX) i emprat per la CHE, per tal d'estimar si ells estan sobreestimant o infravalorant les aportacions, és a dir és possible determinar els possibles errors que es poden estar cometent.

Summary

The purpose of the study is the water resources evaluation in the Jalon river basin, with 9718 km², and the study of the behaviour of the Jalon system subbasins, one of the most important tributaries of the Ebro river.

For this goal, a semi-distributed rainfall-runoff model has been developed, in order to evaluate the effects produced over the studio basin based on the hydrological response of each hydrographic subbasin of the system. The employed model has been HBV, conceptual semi-distributed model developed by the Meteorological and Hydrological Institute of Sweden. It allows hydrological modelling with a small number of parameters, showing versatility and flexibility in several applications.

The tool that has been employed in the model, is RS Minerve 2.0, developed by CREALP and Hidrocosmos SA, in collaboration with Polytechnic University of Valencia. This software simulates rainfall-runoff processes, being based on object-oriented programming, resulting in hydrological and hydraulic modeling by reference to a semi-distributed conceptual scheme focused, on this case, in the Jalón river basin.

The model development, both in calibration and validation processes, has been possible thanks to the historical series of data, registered by the gauge stations located in the basin, obtained from the Gauge Stations Official Network (R.O.E.A.), while data such as demands, reservoir monitoring, etc., has been obtained from a management system (SIMGES) previously created and used by the Ebro Hydrographic Confederation (CHE). Meteorological data (inputs to the model), Spain0s v2.1 database has been used, developed by the Applied Mathematics department, University of Santander's Meteorology Group and the State Meteorological Agency. This database contains a 50 years network of rainfall and temperature data valid for all Spanish Peninsula and the Balearic Islands. After the model generation, it was studied the behaviour of each one of the subbasins, according to the processes that are carried out on the surface such as direct runoff, groundwater flows due to infiltration, as well as flow reduction due to regulation structures such as reservoirs and the influence that vegetation cover presents in the process.

Finally, it is remarkable the contributions generated by the model, as correctly validated, could be really useful in upcoming jobs in hydrologic planning and management, ecological flow management, demands guarantees estimations, etc.

This contributions have been compared with natural regime SIMPA model, developed by the Center for Studies and Experimentation of Public Works (CEDEX) and used by the CHE, in order to estimate whether they are overestimating or underestimating the contributions, trying to find possible mistakes which they may be done.

Palabras clave: Calibración, escorrentía, Jalón, modelación, Rs Minerve, subcuenca, validación.

Paraules clau: Calibratge, escolament, Xaló, modelació, Rs Minerve, subconques, validació.

Keywords: Calibration, runoff, Jalón, modeling, Rs Minerve, subbasin, validation.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVO.....	3
1.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO	4
2. ESTADO DEL ARTE.....	6
2.1. MODELOS DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA (MPE).....	6
2.1.1. Tipo de Modelos de Precipitación-Escorrentía	8
2.1.2. Principio de Parsimonia en la modelación	10
2.2. CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS	12
2.3. MEDIDAS DE LA BONDAD DEL AJUSTE	13
2.3.1. Índice de Nash-Sutcliff	14
2.3.2. Índice de Nash-In (Logarítmico)	15
2.3.3. Coeficiente de Correlación de Pearson.....	15
2.3.4. Bias Score (Comparación de medias).....	15
3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	16
3.1. RED DE DRENAJE SUPERFICIAL.....	19
3.2. MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA	21
3.3. EMBALSES DE REGULACIÓN.....	22
3.3.1. Embalse de la Tranquera.....	23
3.3.2. Embalse de Maidevera.....	24
3.3.3. Embalse de Monteagudo	24
3.3.4. Embalse de Lechago	25
3.4. ZONAS DE PROTECCIÓN ESPECIAL.....	26
3.5. RECURSOS Y DEMANDAS DEL SISTEMA.....	26
4. Metodología y Herramientas	28
4.1. METODOLOGÍA EMPLEADA	28
4.2. SOFTWARE EMPLEADO: RS MINERVE.....	30
4.3. MODELO HBV	32
4.3.1. Condiciones Iniciales y Parámetros sujetos a calibración en el modelo.....	33
4.3.2. Descripción del Modelo	34
4.4. ALGORITMO SCE-UA (THE SHUFFLED COMPLEX EVOLUTION UNIVERSITY OF ARIZONA).	40
5. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	44
5.1. INFORMACIÓN GEORREFERENCIADA	44
5.2. DATOS METEOROLÓGICOS	45
5.2.1. Precipitación.....	45
5.2.2. Temperatura	48
5.2.3. Evapotranspiración	48

5.3. ESTACIONES DE AFORO Y SEGUIMIENTO DE EMBALSES.....	51
6. CALIBRACIÓN DEL MODELO	54
6.1. FUNCIÓN OBJETIVO	54
6.2. SISTEMA JILOCA	56
6.2.1. Cabecera del Río Pancrudo: Estación de aforo Navarrete del Río (Unidad 912)	57
6.2.2. Río JILOCA: Estación de aforo Daroca (Unidad 908)	60
6.2.3. Río JILOCA: Estación de aforo Morata (Unidad 909,911)	63
6.3. SISTEMA PIEDRA	67
6.3.1. Cabecera del Río MESA: Estación de aforo Jaraba (Unidad 905).....	67
6.3.2. Cabecera del Río PIEDRA: Estación de aforo Nuévalos (Unidad 901,902)....	71
6.3.3. Cabecera del Río ORTIZ: Estación de aforo Tranquera (Unidad 906)	74
6.4. SISTEMA MANUBLES.....	78
6.4.1. Cabecera del Río MANUBLES: Estación de aforo Ateca (Unidad 816).....	78
6.5. SISTEMA ARANDA	81
6.5.1. Cabecera del Río ISUELAS: Estación de aforo Trasobares (Unidad 826)	82
6.5.2. Cabecera del Río Aranda: Estación de aforo Maidevera C.E (Unidad 823) ..	85
6.6. SISTEMA JALÓN.....	88
6.6.1. Cabecera del Río BLANCO: Estación de aforo Barrio Blanco (Unidad 813) ..	89
6.6.2. Cabecera del Río Jalón: Estación de aforo Jubera (Unidad 801)	92
6.6.3. Río Nájima: Estación de aforo Monreal Ariza (Unidad 810, 811,812)	96
6.6.4. Cabecera del Río HENAR: Estación de aforo Embid de Ariza (Unidad 814)..	99
6.6.5. Río JALÓN: Estación de aforo Ateca (Sueltas E. Tranquera, EA 9307, Unidad 803).....	103
6.6.6. Río JALÓN: Estación de aforo Calatayud (Sueltas E. Tranquera, Sistema Jiloca, Sistema Manubles, Estación ROEA 9126, UNIDAD 804, UNIDAD 910).....	106
6.6.7. Río JALÓN: Estación de aforo Chodes (Salida Embalse La Tranquera, Sistema Jiloca, Sistema Manubles, Estación ROEA 9266, UNIDAD 806, 817, 819)	110
6.6.8. Desembocadura Río JALÓN: Estación de aforo Grisen (Sistema Aranda, Jiloca, Manubles, Jalón, Unidades 807, 821, 822, 824, 825,827)	114
6.7. VALORACIONES GENERALES DE LA CALIBRACIÓN.....	118
7. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LAS SERIES OBTENIDAS CON EL MODELO SIMPA 124	
7.1. SERIE DE APORTACIONES.....	124
7.1.1. Aportaciones del Sistema Jiloca.....	124
7.1.2. Aportaciones del Sistema Piedra.	127
7.1.3. Aportaciones del Sistema Manubles.....	129
7.1.4. Aportaciones del Sistema ARANDA.....	131
7.1.5. Aportaciones del Sistema JALÓN	133
8. CONCLUSIONES	137
9. REFERENCIAS.....	140
10. ANEJOS.....	144

10.1. SERIES DE APORTACIONES ESTACIONES DE AFORO (CAUDALES DIARIOS)	144
10.1.1. SISTEMA JILOCA	144
10.1.2. SISTEMA PIEDRA.....	146
10.1.3. SISTEMA MANUBLES	149
10.1.4. SISTEMA ARANDA	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores Referenciales (Índice de Nash)	14
Tabla 2. Áreas de los sistemas de explotación	17
Tabla 3. Masas de Agua Subterránea	21
Tabla 4: Embalses del sistema de explotación del río Jalón.....	23
Tabla 5. Condiciones Iniciales del Modelo HBV.....	34
Tabla 6. Parámetros empelados por el Modelo HBV	34
Tabla 7. Información Georreferenciada	44
Tabla 8. Coeficientes de corrección, kc, para cada subcuenca	51
Tabla 9. Estaciones de aforo de la cuenca del río Jalón	52
Tabla 10. Parámetros empleados en la modelación de unidad 912	58
Tabla 11. Valores Función Objetivo Unidad 912	59
Tabla 12. Parámetros empleados en la modelación de unidad 908	61
Tabla 13. Valores Función Objetivo Unidad 908	62
Tabla 14. Parámetros empleados en la modelación de las unidades 909,911	64
Tabla 15. Valores Función Objetivo EA DAROCA.....	66
Tabla 16. Parámetros empleados en la modelación de unidad 905	68
Tabla 17. Valores Función Objetivo Unidad 905	70
Tabla 18. Parámetros empleados en la modelación de unidad (901,902).....	72
<i>Tabla 19. Valores Función Objetivo Unidad 901,902</i>	<i>73</i>
Tabla 20. Parámetros empleados en la modelación de unidad (906).....	75
Tabla 21. Valores Función Objetivo Unidad 906	77
Tabla 22. Parámetros empleados en la modelación de unidad 816	79
Tabla 23. Valores Función Objetivo Unidad 816	81
Tabla 24. Parámetros empleados en la modelación de unidad 826	83
<i>Tabla 25. Valores Función Objetivo Unidad 826</i>	<i>85</i>
Tabla 26. Parámetros empleados en la modelación de unidad 823	86
Tabla 27. Valores Función Objetivo Unidad 823	88
Tabla 28. Parámetros empleados en la modelación de unidad 813	90
Tabla 29. Valores Función Objetivo Unidad 813	92
Tabla 30. Parámetros empleados en la modelación de unidad 801	94

Tabla 31. Valores Función Objetivo Unidad 801	95
Tabla 32: Parámetros empleados en la modelación de unidad 810, 811, 812	97
Tabla 33. Valores Función Objetivo Unidad 810, 811,812	98
Tabla 34. Parámetros empleados en la modelación de unidad 814	100
Tabla 35. Valores Función Objetivo Unidad 814	102
Tabla 36. Parámetros empleados en la modelación de la Estación Ateca	104
Tabla 37. Valores Función Objetivo: Estación de Ateca	106
Tabla 38. Parámetros empleados en la modelación de la Estación Calatayud	108
Tabla 39. Valores Función Objetivo: Estación de Calatayud	110
Tabla 40. Parámetros empleados en la modelación de la Estación Chodes	112
Tabla 41. Valores Función Objetivo: Estación de Chodes	114
Tabla 42. Parámetros empleados en la modelación de la Estación Grisen.....	116
Tabla 43. Valores Función Objetivo: Estación de Grisen (Etapas de Calibración y Validación)	118
Tabla 44: Resumen de las subcuencas calibradas	119
Tabla 45. Resumen de la parametrización para cada sistema de explotación del río Jalón.	122
Tabla 46. Medidas estadísticas de las Aportaciones Anuales: Sistema Jiloca.....	127
Tabla 47. Medidas estadísticas de las Aportaciones Anuales: Sistema Piedra	129
Tabla 48. Medidas estadísticas de las Aportaciones Anuales: Sistema Manubles	131
Tabla 49. Medidas estadísticas de las Aportaciones Anuales: Sistema Aranda.....	133
Tabla 50. Medidas estadísticas de las Aportaciones Anuales: Sistema Jalón	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Conceptualización Modelo Hidrológico Precipitación-Escorrentía.....	7
Figura 2. Modelos Hidrológicos según el grado de agregación.....	8
Figura 3. Sistema de explotación de la cuenca del río Jalón	16
Figura 4. Localización de la cuenca del río Jalón.	17
Figura 5. Precipitaciones anuales medias.....	18
Figura 6. Temperaturas y Evapotranspiraciones Medias registradas en la Cuenca del Río Jalón.....	19
Figura 7. Red de drenaje superficial y subcuencas aportantes	20
Figura 8. Masas de Agua Subterránea	21
Figura 9. Embalses en funcionamiento de la cuenca del río Jalón.....	22
Figura 10. Embalse de la Tranquera	23
Figura 11. Embalse de Maidevera	24
Figura 12. Embalse de Monteagudo.....	25
Figura 13. Embalse de Lechago	25
Figura 14. Metodología empleada para el desarrollo del modelo.....	30
Figura 15. Interfaz gráfica del software Rs Minerve	32
Figura 16. <i>Conceptualización Modelo HBV</i>	33
Figura 17. Evolución de los grupos.	41
Figura 18. Etapas de Evolución que se lleva a cabo en cada grupo.	42
Figura 19. <i>(a) Estaciones de Precipitación seleccionadas para construir el modelo interpolado. (b) Malla de 0.2º, aproximadamente 20 km (c) Densidad de estaciones en la malla, obtenida como resultado de los registros medios diarios por cada punto de la malla d) Cobertura Temporal obtenida como resultado de los registros correspondientes a las estaciones por cada punto de la malla.</i>	46
Figura 20. Centroides de las subcuencas del sistema hídrico del Jalón.	47
Figura 21. Usos del suelo en la cuenca del Jalón.....	49
Figura 22. Calibración de un Modelo	56
Figura 23. Subcuencas del Sistema Jiloca.....	57
Figura 24. Subcuenca del Río Pancrudo	57
Figura 25. Aportación mensual Cabecera del río Pancrudo (Calibración)	58

Figura 26. Aportación mensual Cabecera del río Pancrudo (Validación).....	59
Figura 27. Subcuenca del Río Jiloca (Estación de Aforo Daroca).....	60
Figura 28. Aportación mensual Río Jiloca: Daroca (Calibración).....	61
Figura 29. Aportación mensual del río Jiloca: Daroca (Validación).....	62
Figura 30. Subcuenca del Río Jiloca (Estación de Aforo Morata).....	64
Figura 31. Aportación mensual Río Jiloca: Morata (Calibración).....	65
Figura 32. Aportación mensual del río Jiloca: Morata (Validación).....	65
Figura 33. Subcuencas del Sistema Piedra.....	67
Figura 34. Subcuenca del Río Mesa.....	68
Figura 35. <i>Aportación mensual cabecera del río Mesa (Calibración)</i>	69
Figura 36. <i>Aportación mensual cabecera del río Mesa (Validación)</i>	69
Figura 37. Subcuencas del Río Piedra.....	71
Figura 38. Aportación mensual cabecera del río Piedra (Calibración).....	72
Figura 39. Aportación mensual cabecera del río Piedra:(Validación).....	73
Figura 40. Subcuenca del Río Ortiz.....	75
Figura 41. Aportación mensual cabecera del río Ortiz (Calibración).....	76
Figura 42. Aportación mensual cabecera del río Ortiz:(Validación).....	76
Figura 43. Subcuencas del Sistema Manubles.....	78
Figura 44. Subcuenca del Río Manubles.....	79
Figura 45. <i>Aportación mensual cabecera del río Manubles (Calibración)</i>	80
Figura 46. <i>Aportación mensual cabecera del río Manubles (Validación)</i>	80
Figura 47. Subcuencas del Sistema Aranda.....	82
Figura 48. Subcuenca del Río Isuela.....	83
Figura 49. Aportación mensual cabecera del río Isuela (Calibración).....	84
Figura 50. Aportación mensual cabecera del río Isuelas (Validación).....	84
Figura 51. Subcuenca del Río Aranda.....	86
Figura 52. Aportación mensual entrada Embalse Maidevera (Calibración).....	87
Figura 53. Aportación mensual entrada Embalse Maidevera (Validación).....	87
Figura 54. Subcuencas del Sistema Jalón.....	89
Figura 55. Subcuenca del río Blanco.....	90
Figura 56. Aportación mensual cabecera del río Blanco (Calibración).....	91
Figura 57. Aportación mensual cabecera del río Blanco (Validación).....	91

Figura 58. Subcuenca de la cabecera del río Jalón. (Estación de Aforo Jubera)	93
Figura 59. Aportación mensual cabecera del río Jalón (Calibración)	94
Figura 60. Aportación mensual cabecera del río Jalón (Validación)	95
Figura 61. Subcuencas del Río Nájima.....	96
Figura 62. Aportación del río Jalón: Estación Monreal Ariza (Calibración)	97
Figura 63. Aportación del río Jalón: Estación Monreal Ariza (Validación)	98
Figura 64. Subcuencas del Río Henar.	100
Figura 65. Aportación del río Henar: Estación Embid de Ariza (Calibración)	101
Figura 66. Aportación del río Henar: Estación Embid de Ariza (Validación)	101
Figura 67. Subcuencas del Río Jalón (Estación de Aforo Ateca).....	103
Figura 68. Aportación del río Jalón: Estación Ateca (Calibración).....	105
Figura 69. Aportación del río Jalón: Estación de Ateca (Validación).....	105
Figura 70. Subcuencas del Río Jalón (Estación de Aforo Calatayud).....	107
Figura 71. Aportación del río Jalón: Estación Calatayud (Calibración).....	109
Figura 72. Aportación del río Jalón: Estación de Calatayud (Validación)	109
Figura 73. Subcuencas del Río Jalón (Estación de Aforo Chodes).	111
Figura 74. Aportación del río Jalón: Estación Chodes (Calibración).....	113
Figura 75. Aportación del río Jalón: Estación de Chodes (Validación)	113
Figura 76. Desembocadura del Río Jalón (Estación de Aforo Gisen).	115
Figura 77. Aportación en la desembocadura del río Jalón: Estación Gisen (Calibración)	117
Figura 78. Aportación en la desembocadura del río Jalón: Estación Gisen (Validación)	118
Figura 79. MPE desarrollado para el sistema de explotación del río Jalón.	123
Figura 80. Aportaciones mensuales sistema Jiloca	125
Figura 81. Aportaciones medias sistema Jiloca	126
Figura 82. Aportaciones anuales sistema Piedra.....	128
Figura 83. Aportaciones medias sistema Piedra	128
Figura 84. Aportaciones anuales sistema Manubles.....	130
Figura 85. Aportaciones medias sistema Manubles.....	131
Figura 86. Aportaciones anuales sistema Aranda	132
Figura 87. Aportaciones medias sistema Aranda.	133

Figura 88. Aportaciones anuales sistema Jalón.....	134
Figura 89. Aportaciones medias sistema Jalón.	135
Figura 90. Estación R.O.E.A 90 42 Calamocha	144
Figura 91. Estación R.O.E.A 90 41 Navarrete del Río	145
Figura 92. Estación R.O.E.A 90 10 Daroca	145
Figura 93. Estación R.O.E.A 90 55 Morata	146
Figura 94. Estación R.O.E.A 90 56 Jaraba	147
Figura 95. Estación R.O.E.A 90 08 Nuévalos.....	147
Figura 96. Estación R.O.E.A 90 08 Nuévalos.....	148
Figura 97. Estación R.O.E.A 9125 Carenas.....	149
Figura 98. Estación R.O.E.A 9184 Ateca	149
Figura 99. Estación R.O.E.A 9261 Trasobares.....	150
Figura 100. Estación R.O.E.A 9238 Maidevera	151
Figura 101. Estación R.O.E.A 9167 Barrio Blanco	151
Figura 102. Estación R.O.E.A 9158 Jubera	152
Figura 103. Estación R.O.E.A 9807 Monteagudo Vicarias	153
Figura 104. Estación R.O.E.A 9147 Monreal Ariza.....	153
Figura 105. Estación R.O.E.A 9007 Cetina	154
Figura 106. Estación R.O.E.A 9057 Embid Ariza	155
Figura 107. Estación R.O.E.A 9126 Ateca	155
Figura 108. Estación R.O.E.A 9266 Calatayud.....	156
Figura 109. Estación R.O.E.A 9009 Huérmada.....	157
Figura 110. Estación R.O.E.A 9278 Chodes.....	157
Figura 111. Estación R.O.E.A 9087 Grisen	158

1. INTRODUCCIÓN

El agua constituye en la actualidad un recurso no renovable indispensable para el desarrollo de la vida y a la vez una de las principales materias primas en la mayoría de los procesos productivos, por tal razón surge la necesidad de implantar mecanismos para la gestión y planificación del recurso hídrico mediante la aplicación de acciones tanto estructurales (construcción de infraestructura) como medidas no estructurales (medidas que promuevan la eficiencia de uso del agua y tecnologías que disminuyan el riesgo hídrico).

Los recursos hídricos en España son de considerable preocupación y controversia debido al estrés hídrico histórico y a la afirmación reconocida de que el país está experimentando una disminución en precipitaciones y escorrentías (Houghton et al., 2001). En España se ha demostrado una considerable variabilidad en la lluvia interanual (Serrano et al., 1999). Escenarios de precipitación construidos para el futuro (2041-90) revelan un aumento de las precipitaciones en invierno y una pequeña disminución en la mayoría de la Península Ibérica para la primavera y el otoño (Trigo and Palutikof, 2001). Según Ayala y Carcedo (2001), la aplicación de modelos agregados regionales para las grandes cuencas hidrográficas en España partiendo del escenario climático horizonte 2060 del modelo Hadley Center (Pope et al., 2000) (incremento de la temperatura media anual de 2,50 °C y descenso de la precipitación media anual de un 8%), pronostica una reducción global de los recursos hídricos del 17%, con cambios mayores en la mitad Sur de España.

Dentro de este marco de preocupación, la hidrología juega un rol importante en la planificación de los recursos hídricos y naturales dado que cualquier cambio del ciclo hidrológico afectará en mayor o menor grado tanto al agua como a los recursos que dependen de la misma. Es así que el conocimiento hidrológico es importante en múltiples aplicaciones entre las que podemos nombrar: abastecimiento de agua, planificación del uso de la tierra, hidroelectricidad, riego, drenaje y control de inundaciones, viabilidad, protección de flora y fauna, estudios ambientales etc.

Dentro de la hidrología los modelos hidrológicos constituyen una herramienta que merece especial importancia para la gestión y planificación de los recursos ambientales e hídricos. Dada la exigencia en cuanto a la capacidad predictiva que un modelo conlleva, hoy en día existe la necesidad de fortalecer los modelos existentes.

A lo largo de la historia la modelación hidrológica ha ido cambiando continuamente, desde el Método Racional (Mulvaney, 1850) a modelos físicos distribuidos (Abbott et al., 1986a, b; Wigmosta et al., 1994; Refsgaard y Storm, 1995; Ewen et al, 2000; Kouwen, 2000; De Roo et al., 1998,2000; Vivoni, 2003). Durante el mismo período, se desarrolló el hidrograma unitario simple (Sheram, 1932), modelos de entrada y salida actualmente llamados modelos basados en datos, mismos que han evolucionado a modelos de redes neuronales artificiales (García-Bartual, 2002). La elección del modelo más apropiado es una tarea difícil dado que cada modelador intenta persuadir y a la vez promover su programa desarrollado.

Los modelos hidrológicos tienen como objetivo principal predecir de la manera más aproximada un fenómeno de crecidas donde la incertidumbre constituye un rol trascendental sin embargo algunos hidrólogos (modeladores) pasan por alto la necesidad de cuantificar la incertidumbre predictiva y tienden a describir implícitamente la incertidumbre en el modelo en lugar de describirlos en valores futuros posibles de la cantidad que se puede predecir o pronosticar condicionados por la salida de los modelos (Krysztofowicz,1999). Otra de las imprecisiones se debe a la falta de apreciación de la diferencia entre los parámetros de incertidumbre y la incertidumbre predictiva.

Por todo lo anterior es conocido que la mayoría de los modelos hidrológicos son complejos y resulta laboriosa la comprensión del proceso que se lleva a cabo en la naturaleza. La modelación de cuencas hidrológicas se han desarrollado por múltiples razones sin embargo son dos objetivos primordiales en los cuales basan su desarrollo. Estos objetivos son: conocer y adoptar un conocimiento a detalle del fenómeno hidrológico que tienen lugar en la cuenca y de la manera en la que los cambios generados afectan al fenómeno desarrollado. Otro de los objetivos es generar secuencias sintéticas de datos hidrológicos los cuales faciliten el diseño o predicción de fenómenos.

El estudio de la presente tesis se enfocará en el uso de modelos hidrológicos de precipitación y escorrentía, que tiene como característica principal de transformar datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración en caudales los cuales corresponden a la respuesta de una cuenca, estos modelos tienen la ventaja de dar lugar tanto al recurso disponible de agua en la cuenca, así como estimar tanto los flujos intermedios e internos que tienen lugar en el proceso de precipitación/escorrentía, estos modelos emplean ecuaciones cuyos parámetros tienen como propósito reproducir de manera aproximada el ciclo hidrológico el cual en conjunto con

una serie de inputs establecen las aportaciones (recursos) generados en la cuenca. Establecidas las aportaciones, el siguiente paso es determinar las estrategias adecuadas y convenientes para la gestión del sistema hídrico.

Por medio de este estudio, mediante el uso del modelo de precipitación-escorrentía, (HBV en específico) se pretende adquirir un conocimiento más a detalle de los recursos hídricos de cada subcuenca perteneciente a la cuenca del río Jalón.

1.1. OBJETIVO

El *objetivo principal* del presente estudio es evaluar el recurso hídrico disponible en la cuenca del río Jalón mediante el uso de modelos de precipitación-escorrentía (MPE) teniendo como primicia el análisis y diagnóstico de la gestión del sistema. El modelo a emplear en la elaboración de la tesis es el modelo HBV desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia.

El presente estudio se desarrolla sobre la cuenca del río Jalón, el cual abarca una superficie de 9718 km², extendiéndose gran parte del mismo en la comunidad autónoma de Aragón y en menor proporción en las de Castilla-León (Soria) y Castilla-La Mancha (Guadalajara). El punto más alto que se observa en la cuenca es el Pico Tablado (1747 msnm) localizado a la altura del nacimiento del río Manubles, mientras que el punto más bajo se localiza en la desembocadura del río Jalón junto al Ebro a una altitud de aproximadamente 210 msnm.

El clima predominante en la cuenca es el típico del clima mediterráneo en donde las precipitaciones registradas más abundantes se producen en primavera y en menor proporción en otoño mientras que en verano se evidencian precipitaciones en forma de tormentas que en ciertos casos dan lugar a problemas relacionados con avenidas.

La regulación del recurso hídrico que se lleva a cabo en la cuenca genera una alteración importante del régimen natural del sistema, esta regulación produce una disminución del caudal circulante en el río durante los meses de llenado del embalse (Desde octubre hasta cuando alcance su nivel máximo) y a la vez produce un aumento de los caudales circulantes en los meses de regadío. La regulación en la cuenca viene dado principalmente por 4 embalses: Embalse la Tranquera en el curso del río Piedra, embalse de Maidevera en el río Aranda, embalse de Monteagudo de las Vicarias en el cauce del río Nájima y actualmente en funcionamiento el embalse de Lechago (puesto en funcionamiento en el año 2012).

La modelación a realizar en el presente estudio será de tipo semi-distribuido, dividiéndose la cuenca en subunidades (subcuencas) las cuales se convierten en objeto de análisis. Cada subcuenca analizada dará lugar a una respuesta (aportación) que será comparada con los caudales aforados de las redes R.O.E.A. El software RS MINERVE 2.0 es la herramienta empleada para la modelación. La calibración de las cuencas se lo realizará de manera automática con la ayuda de la herramienta RS Expert de RS MINERVE, el método de calibración emplea el algoritmo de optimización SCE-UA el cual es uno de los más utilizados en la calibración de modelos hidrológicos de cuencas debido a la robustez y eficiencia que presenta el mismo.

Calibrados los modelos se procede a comparar las series de aportaciones generadas con las aportaciones provenientes del modelo SIMPA (Simulación Precipitación-Aportación) que es el empleado por la confederación hidrográfica del Ebro para el estudio de las aportaciones en régimen natural.

1.2. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Estructuralmente, el proyecto va a estar compuesto por los siguientes puntos:

En el capítulo 1 se realiza una breve introducción de la importancia de la modelación hidrológica en la gestión de los recursos hídricos, a la vez se establece el objetivo del trabajo, el modelo y software empleado para la modelación.

El capítulo 2 corresponde al estado del arte, en el que se da una visión general de la modelación hidrológica, se enuncian los diferentes tipos de modelos que se han desarrollado con el tiempo y se hace referencia a la importancia del principio de parsimonia al momento de elegir un modelo. Además se enuncia los principios fundamentales de un modelo hidrológico así como también se describen las medidas de bondad para evaluar el ajuste efectuado en la calibración.

En el capítulo 3 se describe la cuenca que será objeto de estudio, se realiza una descripción del relieve, geológica, hidrogeológica, y de los usos del suelo y agua del medio. Al mismo tiempo se da a conocer los elementos propios del sistema, el régimen que gobierna en la cuenca, así como la infraestructura presente en la zona tales como embalses, estaciones de aforo, demandas presentes en el sistema.

En el capítulo 4 se describe la metodología empleada para la calibración y validación de los modelos desarrollados para cada subcuenca. A la vez se define la herramienta informática empleada para alcanzar el objetivo planteado y se establece el fundamento, principios, condiciones iniciales empleados por el modelo HBV, que es el empleado para la representación de cada una de las subcuencas objeto de análisis. Por último se describe el algoritmo de optimización (SCE-UA) utilizado en la determinación de los parámetros óptimos que maximizan la función objetivo.

En el capítulo 5 se detalla el procedimiento empleado para la obtención y procesado de los datos tales como precipitación, temperatura y evapotranspiración que serán empleados para el desarrollo del modelo. En este apartado toma especial importancia la cobertura del suelo la cual vendrá determinada por los usos del suelo establecidos por el proyecto CORINE LAND COVER 2006 que se encarga de la recopilación, coordinación y la homogenización de la información sobre el estado del medio ambiente y de los recursos naturales en la comunidad.

En el capítulo 6 se especifica la función objetivo a evaluar en la modelación y posterior se desarrolla la calibración de los parámetros del modelo de precipitación HBV, a partir de los datos (Precipitación y temperatura) empleados en la modelización se presentan los resultados de su aplicación en la cuenca del río Jalón, el proceso de calibración se lo realiza de manera individual sobre cada subcuenca, y posteriormente el modelo es validado para tener una idea de la bondad del mismo.

En el Capítulo 7 se realiza una comparación de caudales en régimen natural de las aportaciones obtenidas por el modelo desarrollado en Rs Minerve con las que se derivan del modelo SIMPA que son las empleadas por la Confederación Hidrográfica del EBRO (CHE) para obtener los caudales en régimen natural con el fin de emplearlas para la gestión y planificación de los recursos hídricos disponibles en la cuenca, mediante esta comparación determinaremos si la CHE sobreestima o infravalora las aportaciones que se producen.

Por último, en el Capítulo 8 se presentan las conclusiones que se obtienen a partir de los objetivos planteados en el presente trabajo para finalmente realizar una breve síntesis de la modelación llevada a cabo en la cuenca del río Jalón.

A continuación, se describen los puntos aquí descritos para la consecución de este documento.

2. ESTADO DEL ARTE

Los modelos hidrológicos son representaciones conceptuales y simplificadas de una parte del ciclo hidrológico, generalmente son usados para la predicción y comprensión de los procesos hidrológicos que se llevan a cabo en la naturaleza. Estos toman especial importancia cuando se evidencia la carencia de base de datos que establezcan las características de la línea base (iniciales) y determinen de esta manera los impactos a largo plazo. Los modelos a su vez son capaces de simular los procesos hidrológicos en el espacio y serie de temporal deseada (De vos et al., 2006, citado en Taffese, 2012).

Generalmente dos tipos de modelos son desarrollados:

- Modelos basados en datos disponibles, los cuales se caracterizan por ser sistemas de cajas negras que usan conceptos matemáticos y estadísticos para vincular una entrada (precipitación evidentemente) a una salida (escorrentía). La simplicidad de estos modelos es que se tratan de modelos lineales, pero comunes para dar lugar a componentes no lineales para representar de manera general algunos aspectos relacionados a la respuesta de una cuenca en específico sin desarrollar un estudio profundo de los procesos físicos reales que involucran esta clase de procesos.
- Modelos basados en la descripción del proceso, estos modelos intentan representar los procesos físicos observados en el mundo real, estos modelos involucran representaciones de la superficie de escorrentía, flujo subsuperficial, evapotranspiración y flujos bases. Estos modelos se conocen generalmente como modelos hidrológicos determinísticos.

2.1. MODELOS DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA (MPE)

Los modelos de precipitación escorrentía (MPE) tienen como objetivo principal evaluar los efectos que se producen sobre las características de una cuenca en base a la respuesta hidrológica de las cuencas hidrográficas. Los MPE se basan en el estudio y simulación con leyes físicas conocidas o relaciones empíricas formuladas de cada uno de los componentes del sistema hidrológico. Para llevar a cabo la modelación la cuenca es dividida en pequeñas unidades en donde la pendiente, uso de suelo, geología y distribución de la precipitación es similar. La respuesta hidrológica que se produce dentro de cada unidad generalmente tienden a ser homogéneas y cada una de las mismas son conocidas como respuestas hidrológicas unitarias. Para la obtención de la respuesta de toda la cuenca se llevan a cabo balances de

A modo general los modelos hidrológicos llevan consigo una gran incertidumbre asociada, y esto en gran parte se debe a los escenarios de precipitación y temperatura empleados como inputs al modelo. Otro de los principales problemas es la manera en que el proceso de producción de escorrentía cambia con el tiempo por la evolución de la cubierta vegetal, cambios en las demandas del sistema, modificación del suelo y en la actualidad por los efectos que tiene sobre la precipitación y temperatura el cambio climático.

2.1.1. Tipo de Modelos de Precipitación-Escorrentía

En base al proceso de modelación los MPE son clasificados según Weather (2008) y Singh (1995) en las siguientes categorías:

Distribuidos y Agregadas: En modelos agregados las entradas y salidas (parámetros del modelo) son promediadas espacialmente y toman un valor único para toda la cuenca. Mientras que en modelos distribuidos las entradas y salidas varían espacialmente. Un modelo semidistribuido emplea el concepto de subcuencas individuales agregadas.

En la Figura 2 se presentan los modelos en base al grado de agregación y dentro de ellos en base a su dependencia con el tiempo (simulación por eventos o continua).

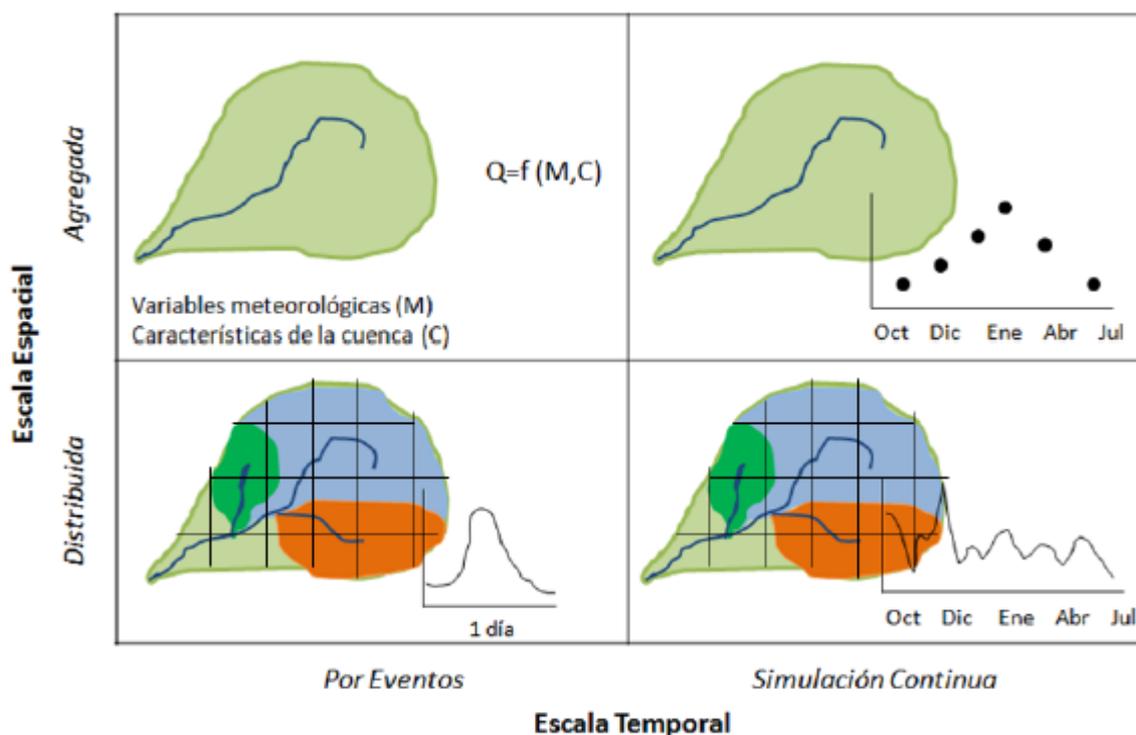


Figura 2. Modelos Hidrológicos según el grado de agregación

Fuente: Modificado Poblete, 2008

- **Estocásticos y Determinísticos:** Los modelos determinísticos son aquellos que dan lugar a los mismos valores de salida a partir de una serie de valores de entrada, mientras que los modelos estocásticos dado que sus componentes son aleatorios pueden o no generar los mismos valores de salida en diferentes ensayos.
- **Basados en Eventos y Continuos:** Un modelo se considera basado en eventos si este únicamente da lugar a una salida para una lluvia específica, evento o periodo de tiempo específico, mientras que los continuos generan salidas continuas.

Además hay que resaltar que dentro de estos grupos citados anteriormente los modelos pueden ser clasificados en base a su estructura según Wagener et al., 2004 de la siguiente manera:

- **Empíricos:** Se caracterizan por emplear las series de tiempo disponibles para trabajar conjuntamente con la estructura del modelo y los valores de los parámetros, se fundamentan principalmente en las entradas y salidas y son generalmente agregadas espacialmente. Estos modelos a su vez excluyen en su estudio el comportamiento de la cuenca y el proceso de flujo (Wagener et al, 2004). Entre los métodos empíricos destacan: el método racional, regresiones empíricas, Redes Neuronales Artificiales e hidrograma unitarios. (Beven, 2001).
- **Conceptuales:** Son los modelos hidrológicos empleados más comunes y destacan por emplear un elemento de almacenamiento como principal componente, en el cual se concentran los diferentes flujos y procesos tales como precipitación, evapotranspiración, drenaje, escorrentía, etc. (Wagener et al., 2004). Los modelos conceptuales tienen 3 características especiales:
 - a) Se fundamentan en la comprensión del sistema hidrológico por parte del modelador, la estructura del mismo viene especificado por la prioridad del usuario.
 - b) Las propiedades hidrológicas de las cuencas (tamaño, distribución de flujo, elementos de almacenamiento) vienen especificados por los parámetros empleados en el modelo.
 - c) Como la mayoría de procesos son usualmente agregados en un solo parámetro, estos no tienen un significado directo por tanto no pueden ser calculados a partir de mediciones por tanto estos parámetros son estimados generalmente por medio de

calibraciones, un ejemplo de este tipo de modelos lo constituyen el modelo IHACRES (Jakeman et al., 1990) y el Modelo de Probabilidad Distribuida (Moore et al., 1985,2007).

- **Físicos:** Estos modelos se derivan de leyes tales como la conservación de la masa, momento, energía y de la comprensión de los físicos de los procesos hidrológicos (Wheater, 2008). Son difícilmente ejecutables dado los problemas de parametrización y los problemas relacionados con la escala de tiempo, por tanto los parámetros no pueden ser derivados de medidas y por esta razón deben ser obtenidas a través de calibraciones. Adquieren importancia cuando un alto nivel de discretización espacial es requerido.

Es importante indicar que el presente trabajo empleará un modelo “semidistribuido y semiagregado” dado que estos permiten considerar tanto la variabilidad espacial de las variables como de los parámetros hidrológicos. La estructura del modelo se basará en un sistema de tanques ordenados en vertical los cuales formarán parte de un modelo de cascada lineal. Los tanques en mención son los de precipitación, evapotranspiración, escorrentía directa, escorrentía en zona no saturada, el caudal base y el caudal del río. La estructura descrita es la que presentan los modelos principales y más utilizados como son el HEC-HMS, MIKE-SHE, Sacramento (SAC-SMA), NASIM y HBV.

El modelo a emplear para el desarrollo del presente trabajo, será el modelo HBV el cual fue desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) (Bergstrom,1976,1995), mismo que ha sido modificado por varios autores entre los cuales destacan, HBV light (Jan Seibert. 1996) desarrollado por la Universidad de Uppsala en colaboración de la Universidad de Oregón, HBV desarrollado por el Instituto de Hidráulica de la Universidad de Stuttgart, Alemania (Lindstrom, 1997; Ehret,2002; Hundecha y Bárdosy, 2004; Das et al., 2006) el cual incorpora modificaciones en la materialización de distintos procesos como la acumulación y fusión de nieve, humedad del suelo y precipitación efectiva, evapotranspiración y estimación de la escorrentía.

2.1.2. Principio de Parsimonia en la modelación

Investigaciones realizadas han demostrado que el número de parámetros requeridos para describir el comportamiento de un determinado sistema es a menudo bajo. (Jakeman y

Hornberger, 1993; Young et al., 1996). El grado de complejidad del modelo aumenta cuando mayor es el número de parámetros, por encima de un número determinado de niveles no se evidencia una mejora significativa del modelo respecto a la eficiencia al momento de reproducir el comportamiento de una cuenca (Naef, 1981; Hornberger et al., 1985; Refsgaard y Knutsen, 1996). En lugar de encarar el problema con una serie de combinaciones de parámetros a menudo se distribuye en rangos factibles individuales generando de esta manera eficiencias aceptables de los modelos (Spear, 1995; Kuczera y Mroczkowski, 1998).

En la mayoría de los casos para analizar la necesidad de los parámetros del modelo para reproducir el comportamiento de una cuenca y reducir la complejidad del modelo se emplea un análisis de sensibilidad. Varios investigadores han sugerido que los modelos que no contemplan más de 12 parámetros son requeridos para describir el comportamiento de una cuenca respecto a la producción de caudal diario. (Beven, 1989; Jakeman y Hornberger, 1993; Beck, 1987). Estos hallazgos han dado lugar a investigaciones que involucren modelos de estructura menos compleja que conduzcan a respuestas claves de los sistemas hidrológicos (Hornberger et al., 1985; Jakeman y Hornberger, 1993; Young et al., 1996).

Es así que el *Principio de Parsimonia requiere modelos* que contemplen la parametrización más simple y que a la vez reproduzca los datos observados eficientemente (Box and Jenkins, 1976). El principio puede ser descrito como un método teórico cauteloso (Spade, 2000, p.101). El enfoque de manejar únicamente los componentes necesarios en la modelación asegura que estos sean afirmados positivamente, sin embargo usando este enfoque en el contexto de la modelación de los procesos de precipitación-escorrentía no garantiza que todos los componentes necesarios de la modelación sean conocidos. Es por tal razón que diversas estrategias deben ser consideradas para asegurar que el modelo no omita uno o más procesos hidrológicos importantes para un problema a desarrollar. Al momento de modelar procesos de precipitación-escorrentía es necesario usar datos con alto contenido de información con el objetivo de garantizar que la respuesta de la cuenca sea adecuada durante la etapa de calibración (Gupta y Soroshian, 1985; Yapo et al., 1996).

Popper (2000, p.142) recomienda el uso de teorías simples basadas en el grado de veracidad, el estudio se justifica estableciendo que teorías más simples aplican más restricciones en la manera de cómo un sistema tiende a representar un determinado proceso siendo de este modo más fáciles de comprobar. El grado de veracidad de una teoría es proporcional a la

cantidad de comportamientos prohibidos por este (Popper, 200, 9.119). En lo que respecta a la modelación hidrológica es importante considerar que la veracidad de un modelo aumenta en casos donde las variables de salida puedan ser comparadas con observaciones, predicciones de niveles de agua subterránea o áreas saturadas (Nash y Sutcliffe, 1970; Seibert, 1999a). Estas teorías proporcionan información adicional para evaluar los modelos desarrollados y rechazarlos en casos que el comportamiento muestre que no se ajusten adecuadamente con los datos observados.

2.2. CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

En términos generales, los modelos hidrológicos vienen definidos por variables de estado y por parámetros que definen la dinámica dentro de un sistema de explotación. Estos parámetros según Sorooshian y Gupta (1995) puede ser de dos tipos: parámetros físicos (medidos directa e independiente de la respuesta de la cuenca, por ejemplo área y permeabilidad) y de procesos (medidas indirectas, Gupta et al., 1998, por ejemplo coeficiente de escorrentía, capacidad de campo).

Con la primicia de que la simulación sea consistente y tenga un importante sentido físico del proceso hidrológico, los parámetros que intervienen en la modelación deben ser debidamente calibrados. La calibración puede ser de dos tipos: Manual y Automática. La forma más sencilla de calibrar es manualmente pero esta esta depende en gran medida de la experiencia del modelador, sus criterios dan lugar a una guía para el alcanzar el mejor ajuste y predicción de los parámetros del modelo (Boyle et al., 2000; Duan, 2003). Al ser los modelos hidrológicos no lineales, ha sido necesario el uso y desarrollo de técnicas de calibración automática (Hogue 2000, Gupta et al., 2003).

La implementación de un modelo de calibración automática requiere de la selección de:

- a) Grupo de datos de calibración.
- b) Función objetivo específica.
- c) Algoritmo de optimización
- d) Región de parámetros en el espacio establecidos para el proceso de búsqueda.
- e) Procedimiento de validación.

La parte más importante de la calibración automática es el establecimiento de la función objetivo y del parámetro de optimización automático las cuales han sido objeto de varias

investigaciones. En lo que respecta a la función objetivo se ha utilizado ampliamente el SLS (Mínimos cuadrados simples), sin embargo estudios realizados han sugestionado que el criterio de HMLE(Error de estimación de máxima verosimilitud) da lugar a mejores estimaciones de los parámetros respecto a los obtenidos en SLS (Sorooshian y Dracup, 1978,1980;Sorooshian,1981,1982; Lemmer y Rao,1983;Walker,1984;Ibbit y Hutchinson,1984; Sorooshian y Gupta, 1985, Smith,1986). Mientras que al referirnos al algoritmo de optimización, eran ampliamente empleados como procedimientos de optimización búsquedas locales entre los cuales citamos: el método simplex (Nelder y Mead, 1965), el método de búsqueda de patrones (Hooke y Jeeves, 1916) y el método de la rotación de la dirección (Rosenbrock, 1960). Sin embargo, con el pasar de los años estos métodos se han vuelto obsoletos dado que proporcionan resultado con un grado de incertidumbre alto ya que al tratarse de un modelo local y no global la estimación óptima del parámetro depende del punto de inicio. Actualmente se sabe que la función objetivo representa la respuesta de una cuenca que contiene cientos o miles de óptimos locales anidados a gran escala (Duan et al., 1992), tratando de alcanzar de esta manera un óptimo global. Para dar lugar a esta función objetivo en mención se ha desarrollado varios algoritmos siendo el SCE-U (Shuffled complex evolution) desarrollado por la Universidad de Arizona, el algoritmo de optimización global más empleado dado la efectividad (Capaz de encontrar la región del óptimo global) y la eficiencia relativa (No requiere demasiadas evaluaciones de las funciones del mismo. (Duan et al., 1992, 1993,1994; Sorooshian et al., 1993).

2.3. MEDIDAS DE LA BONDAD DEL AJUSTE

En la calibración de modelos hidrológicos generalmente se utiliza “criterios de exactitud” con el fin de cuantificar la bondad del ajuste del modelo y de esta manera evaluar la capacidad predictiva del modelo.

En el desarrollo del presente trabajo se han empleado 4 medidas para determinar la bondad del modelo ajustado, es decir que la función objetivo estará en dependencia de estos 4 indicadores a los cuales se les asigna un mismo peso relativo correspondiente al 25 %.

Los indicadores empleados son: Indicador Nash-Sutcliffe (Estima el error cuadrático medio de la varianza normalizada observada, dando el peso más significativo a grandes errores, los cuales no necesariamente ocurren en períodos de gran cantidad de flujo), Nash-in (Transforma flujos que conllevan grandes pesos en errores durante flujos bajos), Coeficiente

de correlación de Pearson (Mide la covarianza de los valores simulados observados sin penalización por Bias, y el Bias Score (Medida simétrica entre los promedio de los valores simulados y los valores promedio observados), su elección se basó en estudios realizados por Zhang et al.,(2008). Estos indicadores son considerados como “puntuaciones de habilidad” (Wilks, 2006) los cuales miden la precisión relativa de las simulaciones respecto a una línea base.

El ajuste del modelo se evaluó maximizando la función objetivo resultante del promedio de las cuatro medidas de bondad del ajuste antes mencionadas.

2.3.1. Índice de Nash-Sutcliff

El indicador de Nash es una de las medidas de bondad más empleadas en Hidrología, viene dado por la siguiente ecuación:

$$F_1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es representada por el modelo hidrológico. Los valores de F1 comprenden rangos de $-\infty$ y 1. La modelación es perfecta cuando $F_1=1$ mientras que $F=0$ cuando los resultados de la modelación se corresponden con la media de los valores observados.

Los parámetros calibrados óptimos en función de este índice tienden a representar lo mejor posible los picos altos (caudales elevados) mientras que los bajos tiende a subestimarlos.

En la Tabla 1 se recogen los valores referenciales del índice de Nash:

Tabla 1. Valores Referenciales (Índice de Nash)

F1	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Fuente: Molnar, 2011

2.3.2. Índice de Nash-In (Logarítmico)

Empleado cuando los valores de la media modelada son demasiados grandes, es decir que toma importancia cuanto mayor es la cantidad de caudales bajos.

$$F_2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{sim,i}) - \ln(Q_{obs,i}))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{obs,i}) - \ln(\bar{Q}_{obs}))^2}$$

La valoración del ajuste se lo realiza con el mismo criterio empleado en el Índice de Nash-Sutcliff.

2.3.3. Coeficiente de Correlación de Pearson

Este indicador mide la covarianza existente sin penalización por sesgo entre los valores observados y los obtenidos por la modelación. Viene dado por la siguiente fórmula:

$$F_3 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs}) * \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}}$$

Los valores que puede adoptar están en el rango de -1 a 1, en el que valores iguales a 1 indican un ajuste perfecto de la variable modelada observada, mientras que valores que tienden a -1 indican una relación lineal perfecta pero con pendiente negativa.

2.3.4. Bias Score (Comparación de medias)

Medida simétrica entre los promedios de los valores simulados y los valores promedio observados.

$$F_3 = 1 - \left[\max \left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}, \frac{\bar{Q}_{obs}}{\bar{Q}_{sim}} \right) - 1 \right]^2$$

Puede tomar valores comprendidos entre $-\infty$ y 1, donde 1 indica un ajuste perfecto de la media modelada con la media observada.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Jalón se encuentra localizada al noreste de España, mayoritariamente en territorio aragonés, extendiéndose en menor proporción en Castilla de León (Soria) y Castilla-La Mancha (Guadalajara). Se encuentra al este del río Ebro siendo uno de sus principales afluentes ocupando una extensión de 9718 km² aproximadamente.

La cabecera de la cuenca tiene su origen en Sierra Ministra, en la paramera de Medicinaceli (Soria), vinculando a lo largo de su trayecto (223.7 km) importantes afluentes como lo son los ríos: Nájima, Deza o Henar, Manubles y Aranda por el lado oeste, mientras que por el este destacan los ríos: Blanco, Piedra, Jiloca, Perejiles, Grío y Alpartir o Mediano. Mención especial merecen los Ríos Jiloca y Jalón los cuales abarcan 2597 km² y 1545 km² respectivamente.

Los sistemas de explotación de la cuenca de Jalón son: Aranda, Jalón, Jiloca, Jiloca, Manubles y Piedra, se omite la subcuenca de Gallocanta dado que se trata de una cuenca endorreica, ver (Figura 3 y Figura 4). En la Tabla 2 se indican las áreas correspondientes a cada sistema de explotación.

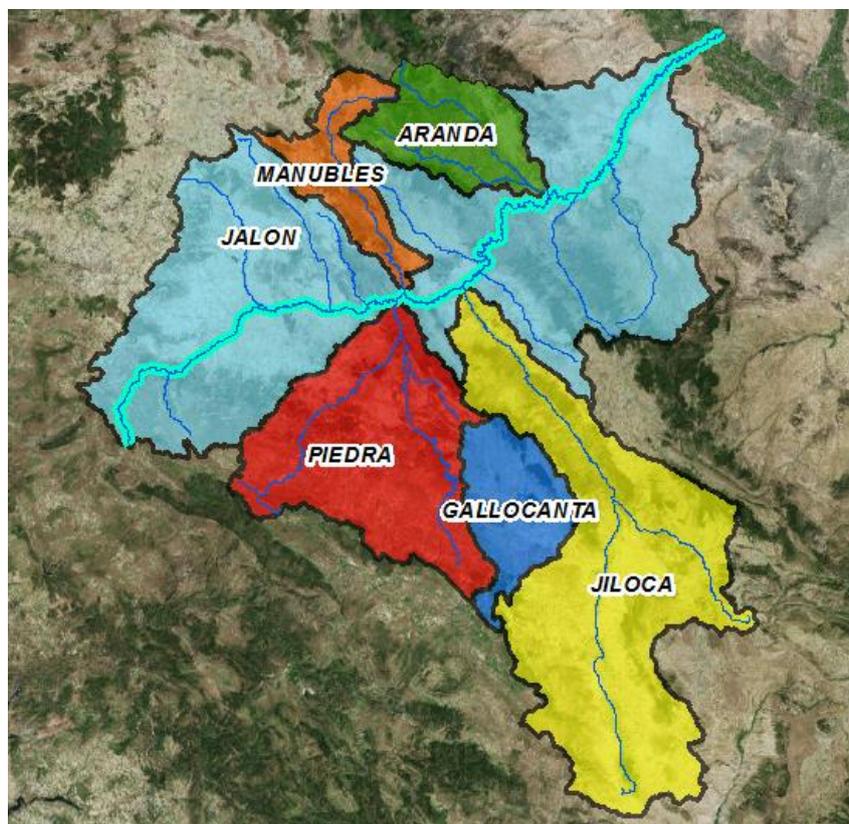


Figura 3. Sistema de explotación de la cuenca del río Jalón

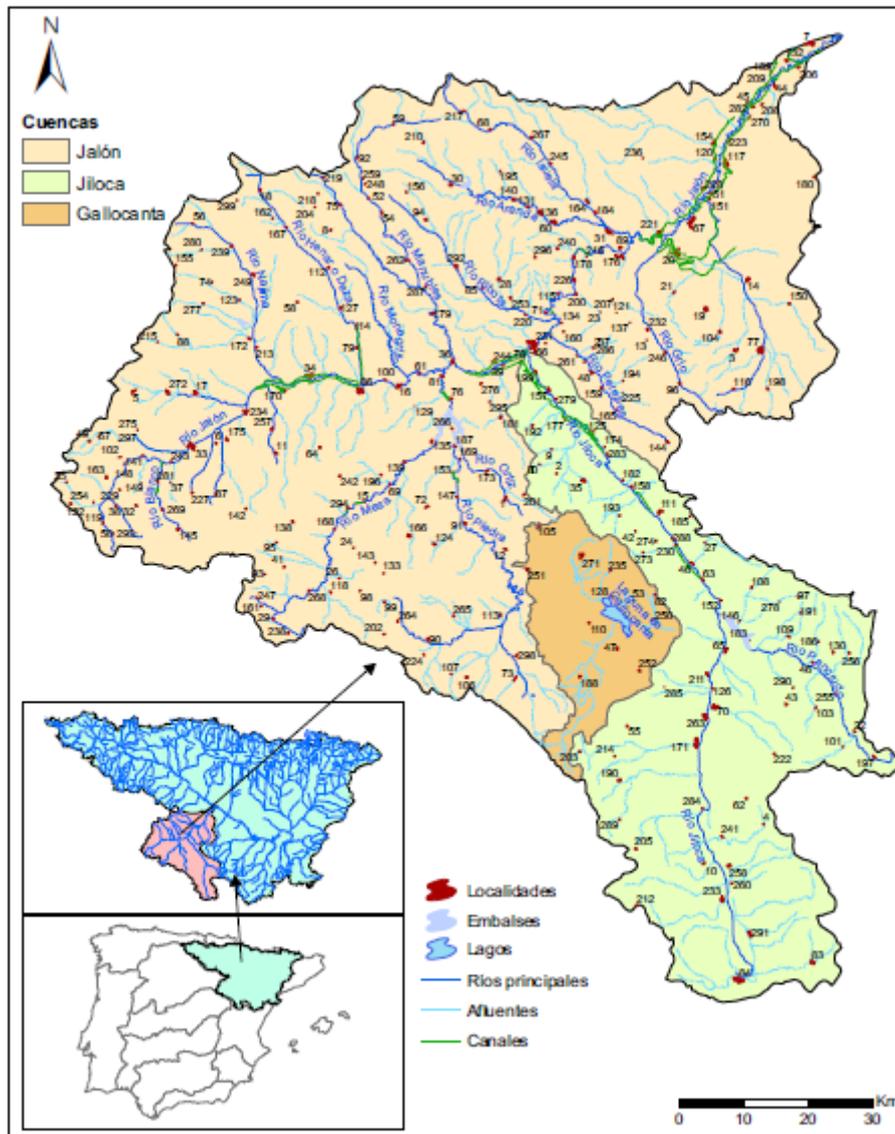


Figura 4. Localización de la cuenca del río Jalón.

Fuente: Plan Hidrológico del río Jalón (2007)

Tabla 2. Áreas de los sistemas de explotación

Sistemas de Explotación	Área (km ²)
Aranda	586.218
Jalón	4469.25
Jiloca	2597.95
Manubles	445.175
Piedra	1545.86

Respecto a la precipitación, según registros, para el período de 1920-2002 la precipitación media de la cuenca oscila los 437 mm/año, evidenciándose una marcada diferencia entre la

desembocadura (350 mm/año) y las zonas próximas al Moncayo (555 mm/año). Cabe resaltar que en los meses correspondientes a primavera y otoño tienen lugar las precipitaciones más abundantes, mientras que en verano se observan tormentas, típicas del clima del mediterráneo, las cuales merecen importancia por los problemas que ellas conllevan tales como: avenidas e inundaciones que generan las mismas. (Ver Figura 5).

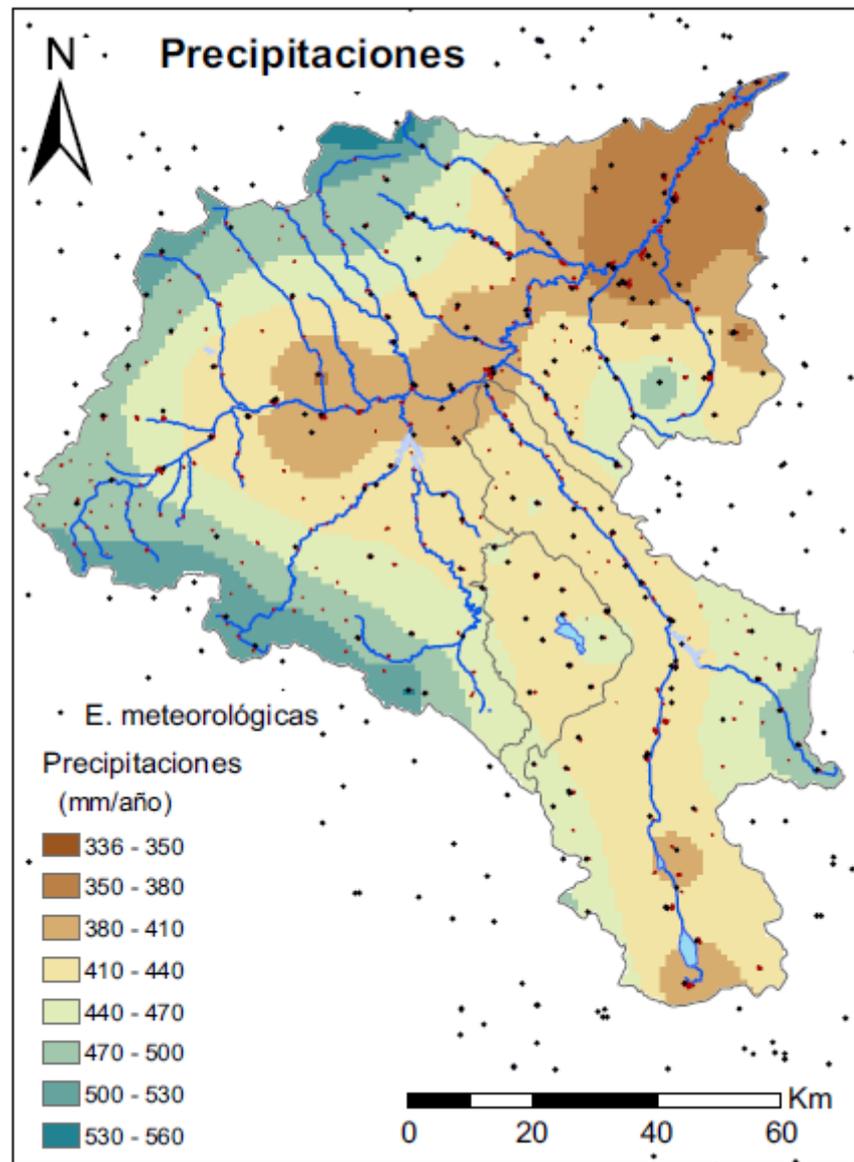


Figura 5. Precipitaciones anuales medias.

Fuente: Plan Hidrológico del río Jalón (2007)

En las zonas de cabecera (Jalón, Piedra y Jiloca) la temperatura media oscila entre valores de 7°C a 10°C, mientras que en desembocadura se registran valores de 15°C. En los meses de verano (julio y agosto) tienen lugar las temperaturas máximas y en enero las mínimas. Las isovapotranspiraciones potenciales varían entre 500 y 550 mm/año en la desembocadura, lo

cual al compararlo con la precipitación generada en la cuenca se evidencia la escasez del recurso en la cuenca. (Ver Figura 6)

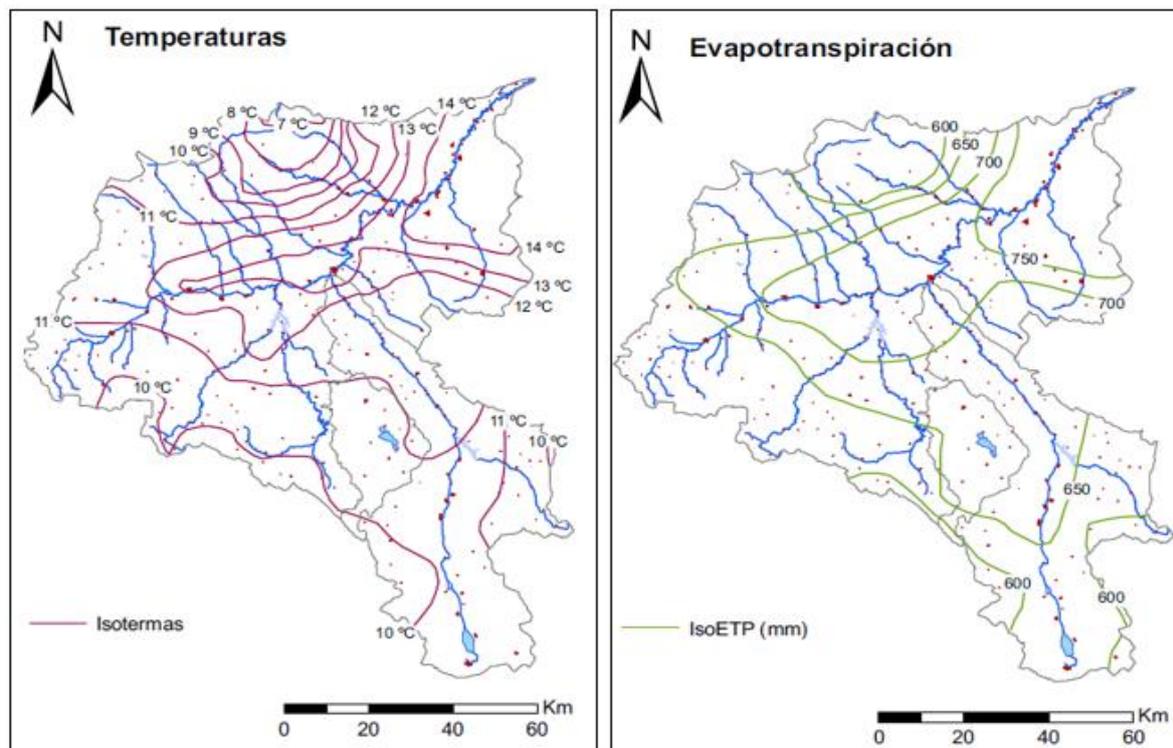


Figura 6. Temperaturas y Evapotranspiraciones Medias registradas en la Cuenca del Río Jalón.
Fuente: Plan Hidrológico del río Jalón (2007)

En cuanto a la demografía de la cuenca a lo largo del siglo XX la población ha variado considerablemente, alcanzando su máxima densidad en los años 40 (240.000) logrando estabilizarse a principios del siglo XX con una densidad población del orden de 12 hab/km², aproximadamente 121.000 habitantes.

Gran parte de la población de la cuenca se halla localizada a lo largo de Jalón medio y bajo, siendo el más representativo el municipio de Calatayud con una población de 20.000 habitantes, seguido por la cabecera del río Jiloca próximo al municipio de Teruel.

3.1. RED DE DRENAJE SUPERFICIAL

En base a las directrices de la Directiva Marco del Agua se han identificado 44 masas de agua superficial: 4 corresponden a humedales, 3 a embalses, 35 son tramos de ríos y 2 son canales (Canal del Alto Jiloca y Canal Imperial de Aragón).

El río Jalón se origina en manantiales al pie de Sierra Ministra (Soria), tiene una longitud de 225 km, 9.350 km de superficie, convirtiéndose de esta manera en el afluente más importante

del lado sureste del Ebro. Sus afluentes son: Nájima y Henar (Zona: Depresión de Ariza), Piedra, Mesa y Manubles (Zona: Paleozoico de Buberca), Jiloca, Perejiles y Ribota (Zona: Depresión Calatayud) y Aranda, Grio (Zona: Depresión del Ebro).

Registros recientes señalan que las aportaciones medias generadas en la cuenca son del orden de 444 Hm³/año (14.1 m³/s) de los cuales 108 Hm³/año corresponden al río Piedra y 172 Hm³/año al río Jiloca. La serie histórica disponible indica que el río Jalón ha experimentado dos periodos húmedos prolongados (1935-1942 y 1959-1980) registrando su máxima aportación en el año 1988/1989 y su mínima aportación en el año 1995/1996 (<200 Hm³), año en el que se llevaron a cabo conflictos por la carencia de agua en la zona.

En la Figura 7 se muestra la red de drenaje superficial y sus correspondientes subcuencas aportantes, correspondiente a la cuenca del Jalón:

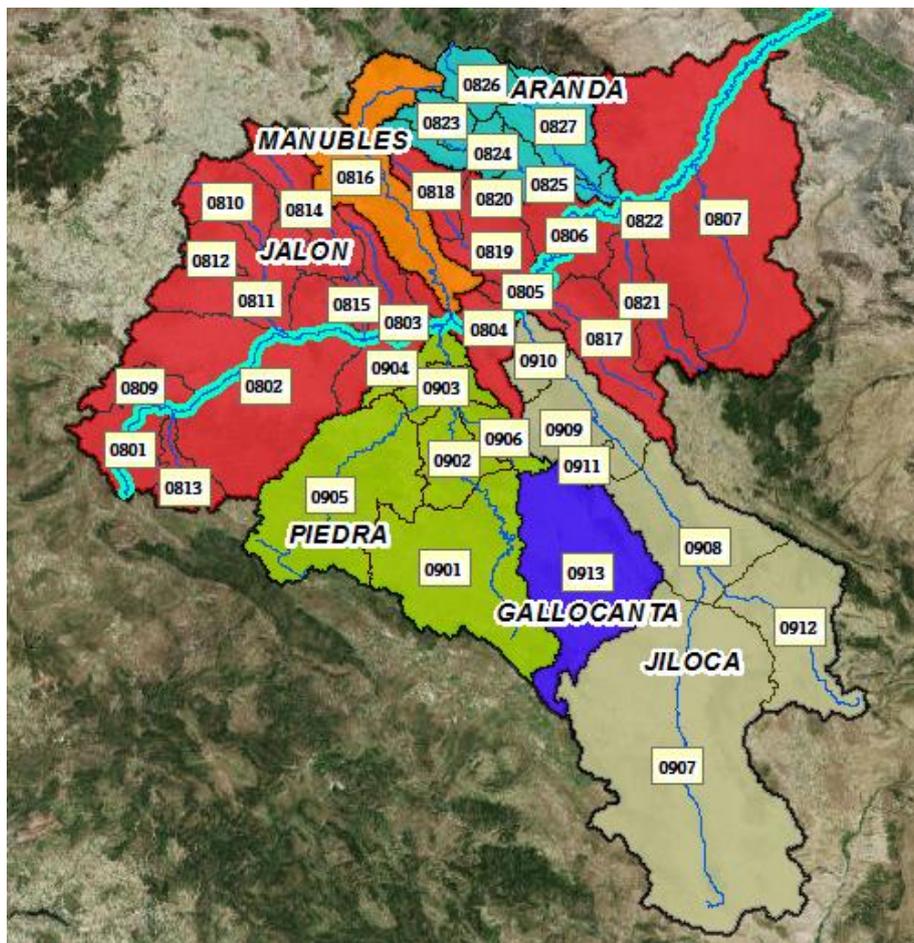


Figura 7. Red de drenaje superficial y subcuencas aportantes

Fuente: Geoportal SITEbro

3.2. MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Existen una gran cantidad de acuíferos dada las características hidrogeológicas de la zona, varios de presentan un alto grado de utilización. Entre los principales acuíferos destacan los de las Calizas del Jurásico y Cretácico y los materiales detríticos del cuaternario. Se contabilizan un total de 19 masas de agua subterránea los cuales se detallan en la Tabla 3:

Tabla 3. Masas de Agua Subterránea

Localización	Masa de Agua Subterránea
Alagón (052)	Alluvial del Ebro: Tudela
Zaragoza (058)	Aluvial del Ebro
Moncayo (072)	Somontano del Moncayo
Aranda del Moncayo (073)	Borobia
Virgen y Vicort (074)	Sierra Paleozoicas de la Virgen y Vicort
Campo de Cariñena (075)	
Alfamén (076)	Pliocuatnario de Alfamén
Alfamén (077)	Mioceno de Alfamen
Ribota (078)	Manubles
Jiloca (081)	Aluvial Jalón
Perejiles(082)	Huerva
Ateca (083)	Sierra de Miñana
Miñana	Sierra de Miñana
Alto Jalón (086)	Páramos del Alto Jalón
Gallocanta (087)	Gallocanta
Calamocha (088)	Monreal
Ojos de Monreal (089)	Cella
Pozondón (090)	Pozondón

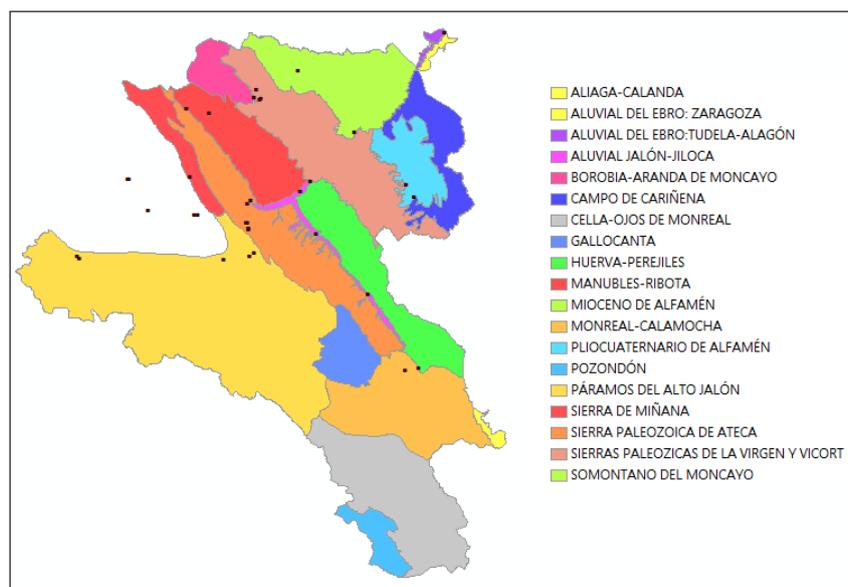


Figura 8. Masas de Agua Subterránea

Fuente: Geoportal SITEbro.

3.3. EMBALSES DE REGULACIÓN

En la actualidad en el sistema de explotación de la cuenca del Jalón se encuentran operativos 4 embalses (Maidevera, Monteagudo, Tranquera y Lechago) los cuales se distribuyen 2 en la cuenca alta y 2 en la cuenca baja del Jalón. (Ver Figura 9).

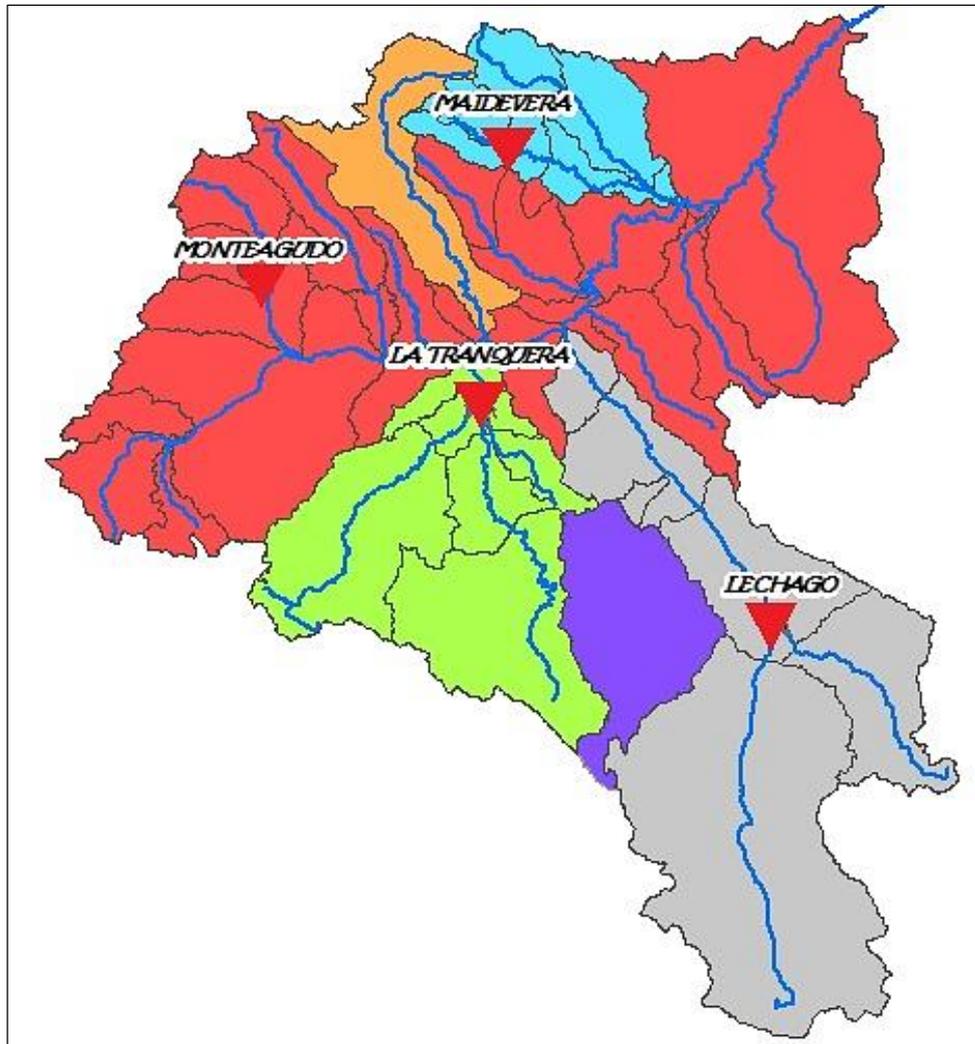


Figura 9. Embalses en funcionamiento de la cuenca del río Jalón.

Fuente: Geoportail SITEbro

Tabla 4: Embalses del sistema de explotación del río Jalón.

<i>Embalse</i>	<i>Área de la Cuenca (km²)</i>	<i>Capacidad útil (Hm³)</i>	<i>Aportación media anual (Hm³)</i>	<i>Uso</i>
<i>La Tranquera</i>	<i>1470</i>	<i>84.17</i>	<i>110</i>	<i>Regadío, abastecimiento, hidroeléctricas.</i>
<i>Monteagudo</i>	<i>199</i>	<i>9.67</i>	<i>1.44</i>	<i>Regadío.</i>
<i>Maidevera</i>	<i>77</i>	<i>18.33</i>	<i>13.60</i>	<i>Regadío, abastecimiento, recreativo.</i>
<i>Lechago</i>	<i>2957</i>	<i>18.00</i>	<i>-</i>	<i>Abastecimiento, Q ecológico, recreativos y turísticos.</i>

3.3.1. Embalse de la Tranquera

El embalse de la Tranquera, Figura 10, con una capacidad de 84.17 Hm³ se encuentra localizado en las Municipalidades de Ibdes, Carenas y Nuévalos, fue puesto en carga en los años 60 y es el encargado de almacenar las aguas procedentes de los Ríos Piedra, Mesa y Ortiz, cuenta con una capa. Se caracteriza por ser una la principal infraestructura de la cuenca del Jalón. Este embalse es de tipo monomítico de geología calcárea y situado en zona no húmeda, se llena generalmente en su máxima totalidad todos los meses de mayo vaciándose el mismo en los meses de julio a septiembre donde generalmente se requiere la mayor demanda de agua para los diferentes usos. Forma parte de del Registro de Zonas protegidas de la Confederación Hidrográfica del Ebro.



Figura 10. Embalse de la Tranquera

Fuente: Google Maps.

3.3.2. Embalse de Maidevera

El embalse de Maidevera, Figura 11, puesta en carga el año de 1983, se encuentra situado en el Ayuntamiento de Aranda en la provincia de Zaragoza, se trata de un embalse monomítico típico de zonas templados y regula principalmente las aguas del río Aranda, su capacidad máxima es de 18.33 Hm³. El recurso que se deriva de este embalse se emplea principalmente en los regadíos y abastecimiento, se destaca también el uso recreativo permitiéndose la pesca en el embalse. No forma parte de del Registro de Zonas protegidas de la Confederación Hidrográfica del Ebro.



Figura 11. Embalse de Maidevera

Fuente: Google Maps.

3.3.3. Embalse de Monteagudo

El embalse de Monteagudo, Figura 12, aloja en su interior 9.73 Hm³ de agua provenientes del río Nájima y del arroyo Regajo, fue puesto en operación en el año de 1967, llevándose a cabo modificaciones en el mismo en el año de 1982. Se trata de un embalse monomítico, de geología calcárea y zonas húmedas de cabecera y tramos altos, la capa fótica en verano se encuentra alrededor de los 1.63 metros de profundidad. Es empleado para suministrar la demanda de agua para los regadíos de la cuenca del Nájima. Forma parte de del Registro de Zonas protegidas de la Confederación Hidrográfica del Ebro.



Figura 12. Embalse de Monteagudo

Fuente: Google Maps.

3.3.4. Embalse de Lechago

El embalse de Lechago, Figura 13, se localiza en la municipalidad de Calamocha en la provincia de Teruel, regula las aguas del río Pancrudo, fue puesta en carga en el año 2013 y se encarga de la regulación de caudales en los meses de invierno del río Jiloca. Este se trata de un embalse monomítico de geología calcárea y se sitúa en una zona no húmeda y tiene una capacidad de 18.1 Hm³ los cuales sirven de garantía para suministrar los recursos necesarios a la Municipalidad de Jiloca. Forma parte de del Registro de Zonas protegidas de la Confederación Hidrográfica del Ebro.



Figura 13. Embalse de Lechago

Fuente: Google Maps.

3.4. ZONAS DE PROTECCIÓN ESPECIAL

La Directiva Marco del Agua establece la obligación contar con un “registro de zonas protegidas” en las cuales deben constar las citadas a continuación:

- Captaciones de abastecimiento de poblaciones de más de 50 habitantes o de más de 10m³/día.
- Zonas destinadas a la protección de especies acuáticas significativas desde un punto de vista económico.
- Masas de agua con declaración de uso recreativo, incluidas las declaradas como aguas de baño.
- Zonas Sensibles respecto a nutrientes.
- Zonas de protección de hábitat o especies relacionados con el medio hídrico.

En base a lo anteriormente citado, se han identificado en la cuenca del Jalón un total de 341 puntos de abastecimiento que merecen especial protección entre los cuales destacan 266 subterráneos (pozos y manantiales) y 48 superficiales, siendo la más importante la toma de abastecimiento para la localidad de Calatayud (20.000 habitantes).

A su vez se ha establecido como zona de protección, dada la importancia de fauna ciprinícola, el Arroyo de la Menteriosa hasta la zona de Contamina.

Como zona vulnerable a la contaminación por nitratos en los acuíferos se han definido cuatro zonas: Cariñena, bajo Jalón, cuenca de Gallocanta y la zona de Singra-Alto Jiloca.

El embalse de la Tranquera se considera la única zona sensible a la eutrofización.

3.5. RECURSOS Y DEMANDAS DEL SISTEMA

Las demandas del recurso de agua en lo que respecta a la cuenca son de alrededor 342 Hm³/año, en contraste con los datos resultantes de la evolución temporal de los recursos totales se concluye que las detracciones de agua afectan en forma significativa el cauce del río alterando de esta manera el régimen natural del medio.

Registros de Planes de Cuenca efectuados años anteriores, indican que la demanda fija para abastecimiento urbana es de 9.61 Hm³/año, siendo la toma de abastecimiento más importante la que se deriva del embalse de la Tranquera para abastecer de agua Calatayud, la

cual cuenta con un población aproximada de 20.000 habitantes con una demanda de 2.8 Hm³/año.

Por otro lado la demanda industrial bordea 7.77 y 8.10 Hm³/año, localizándose la mayor parte de las industrias en 3 municipios: Calatayud; Illueca y brea de Aragón.

La demanda agrícola según estimaciones corresponden a 399 Hm³/año, con las cuales se riegan aproximadamente 52.075 hectáreas de las que 28.240 ha corresponden al eje del río Jalón y 23.836 ha se encuentran localizados en sus afluentes.

4. Metodología y Herramientas

4.1. METODOLOGÍA EMPLEADA

La elaboración de modelos de precipitación-escorrentía (MPE) requiere de información necesaria e indispensable para la ejecución del mismo. La información debe caracterizarse por ser representativa de la cuenca a modelar por tal motivo, los datos disponibles atraviesan una etapa de tratamiento y depuración para posteriormente procesarla.

En primera instancia hay que indicar que el sistema de explotación del Jalón ha sido dividido según la confederación hidrográfica del Ebro en 5 sistemas (Aranda, Jalón, Jiloca, Manubles y Piedra). Gracias a la información georreferenciada disponible, la red oficial de estaciones de aforo (R.O.E.A) y a las subdivisiones en función de los principales afluentes del río Jalón, ha sido posible analizar cada subcuenca mediante el uso de modelos semidistribuidos, es decir que se desarrollaran modelos hidrológicos particulares a escala mensual para cada subcuenca analizar. La calibración y validación de los datos simulados por el modelo se los realiza en base a los datos observados en las estaciones de aforo (en desembocadura) para cada sistema en estudio. Cuando no se cuenta con estaciones de aforo pertinentes para este fin o que estos no garanticen una adecuada modelación (datos de mala calidad, registros históricos pobres) destinada para este fin, se realizará una modelación agregada con la subcuenca adyacente en donde exista estación de aforo que garantice resultados confiables.

En el siguiente diagrama, Figura 14, se especifica el procedimiento empleado para la elaboración, calibración y validación del modelo desarrollado.

Para la modelación, el primer paso consistió en obtener las series de precipitaciones, temperaturas y evapotranspiraciones a escala diaria partir de la base de datos pública de Spain02 para cada centroide asignado a las subcuencas de análisis. Estos datos meteorológicos se convirtieron en los datos de entrada al modelo HVB, descrito en el siguiente apartado, que fue el empleado en la modelación.

Para continuar con la creación del modelo fue importante analizar la gestión que se aplica en el sistema de explotación del Jalón a partir de un modelo Aquatool (Andreu, J., et al (1996) previamente desarrollado y destinado a la gestión de los recursos hídricos de la zona. En este modelo al venir especificadas las principales usos del agua (demandas agrarias, industriales, urbanas) se establecieron las principales demandas existentes en cada zona de estudio con el

fin de incluirla o no en el modelo de precipitación esorrentía(MPE), demandas que no involucren detracciones importantes ($> 0.1 \text{ Hm}^3/\text{mes}$) fueron excluidas del modelo.

Una vez establecidos las demandas a considerar en el MPE, se procedió a descargar los datos (caudales observados) de las estaciones de aforo a partir del sistema de información del anuario de aforos, en base a la comparación con los resultados que se obtienen en la simulación estos son los que determinan si el ajuste de los datos simulados representan adecuadamente la realidad de la cuenca estudiada.

Para cada estación de aforo se observa la serie histórica disponible y en base a los años en los que se tienen los registros completos se define el periodo, en el cual se realiza la calibración y validación del modelo, la elección del período dependerá de la cantidad y calidad de datos de cada estación de aforo. Es necesario indicar que se procura calibrar y validar todas las subcuencas en estudio en el mismo periodo, de este modo se tendrán mejores resultados, no habrá mayor variación en las condiciones iniciales y todos los datos se corresponderán entre sí disminuyendo de esta manera la incertidumbre del modelo.

El siguiente paso consiste en crear el modelo a través del software hidrológico RS Minerve(descrito en el apartado 4.2), se introducen los elementos necesarios para la modelación (estaciones meteorológicas(precipitación, temperatura, evapotranspiración), subcuencas, demandas en caso que apliquen, datos observados en las estaciones de aforo etc.

Una vez creado el modelo, se procede a la simulación del mismo (previamente realizamos una etapa de calentamiento con el fin de establecer las condiciones iniciales) y a paso seguido se realiza la calibración en el periodo establecido según la disponibilidad de datos de cada estación de aforo utilizada para el análisis de la respectiva subcuenca. La validez de la calibración viene dada por una función objetivo (apartado 6.1) que evalúa la bondad del modelo (estableciendo un peso relativo (0.25) para cada medida de eficiencia empleada que para este caso son: Índice de Nash, Nash-in (logarítmico), Coeficiente de Pearson, Bias score). La calibración es automática mediante la herramienta RS Expert que emplea el algoritmo SCE-UA (apartado 4.4) con el fin de determinar los valores óptimos de los parámetros a calibrar en los modelos. Determinados los parámetros se determinó si estos eran acorde al proceso hidrológico en el que debe cumplirse que la capacidad de campo (FC) sea mayor al punto de marchitez de las plantas (PWP).

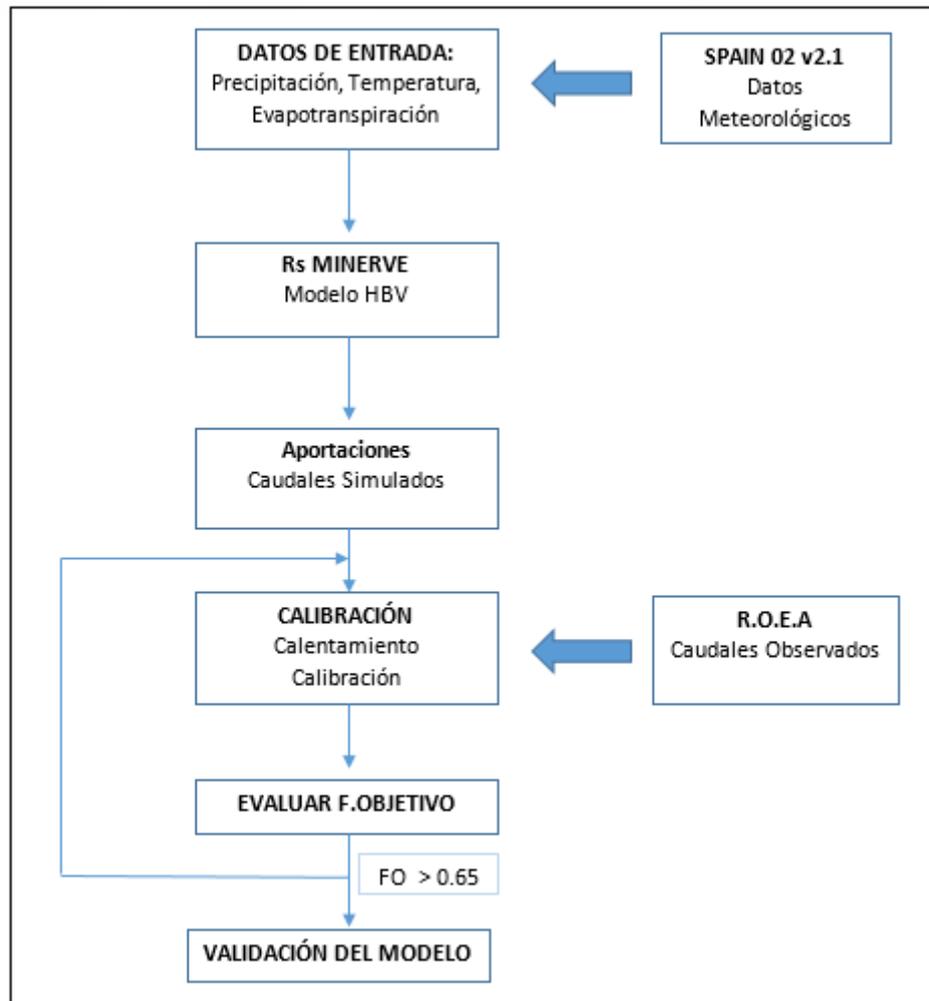


Figura 14. Metodología empleada para el desarrollo del modelo.

Calibrado el modelo y observando que el ajuste sea adecuado en esta etapa por medio de una interpretación gráfica y de los valores de la FO se procede a la validación del modelo en años posteriores a la calibración y es en esta etapa donde se verifica o se descarta el modelo desarrollado para cada subcuenca estudiada.

4.2. SOFTWARE EMPLEADO: RS MINERVE

RS MINERVE es un software para la simulación de la formación y propagación de escorrentía libre a través de la superficie. Este software modela redes hidráulicas e hidrológicas complejas en base a un esquema conceptual semidistribuido. Procesos hidrológicos particulares tales como derretimiento de la nieve, fusión de la nieve, flujo superficial y subterráneo, elementos de control hidráulico también son incluidos en el modelo. El análisis global de una red hidráulica o hidrológica es esencial en situaciones donde es necesario la toma de decisiones con el fin de gestionar y planificar de una mejor manera los recursos hídricos de una zona en

particular, la optimización de las operaciones hidroeléctricas, el diseño y regulación de aliviaderos o para el desarrollo de técnicas apropiadas para la protección frente a inundaciones. Este software presenta una interfaz amigable al moderador y a través de sus múltiples ventajas permite realizar un análisis global del sistema. Además gracias a la estructura y funcionalidad del modelo este permite ser adaptado a diferentes necesidades o problemas que se presenten.

RS MINERVE brinda al modelador diferentes modelos hidrológicos para la simulación del proceso de precipitación-escorrentía, entre los cuales se cita: GSM, SOCONT, SAC-MA, GR4J y HBV. A través de la combinación de modelos de estructura hidráulica (reservorios, turbinas, aliviaderos, etc.) es posible reproducir modelos hidroeléctricos complejos. Un modelo hidroeléctrico es capaz de estimar la altura de la red y las pérdidas de carga lineales proporcionando valores de producción de energía y del ingreso total que se determina en base al rendimiento de la energía y del precio de venta de la misma. En la Figura 15 se presenta la interfaz gráfica del software.

RS MINERVE cuenta con un módulo “Rs Expert” creado para investigaciones o estudios complejos permite la evaluación exhaustiva de resultados hidrológicos e hidráulicos de un modelo desarrollado para una zona de estudio específica. El tiempo de intervalo de simulación facilita el análisis de conjuntos grande de datos sin saturar la memoria del ordenador. El escenario de simulación además introduce la posibilidad de simular múltiples escenarios meteorológicos o varios conjuntos de parámetros y condiciones iniciales para estudiar la variabilidad y sensibilidad de los resultados del modelo. La calibración automática con diferentes algoritmos, tales como la SCE-UA, calcula el mejor conjunto de parámetros hidrológicos en función de una función objetivo definida por el usuario.

Cabe destacar que RS MINERVE se distribuye gratuitamente a los usuarios interesados en e desarrollo de estudios hidrológicos, en la actualidad se ha empleado en el desarrollo de diversos proyectos en Suiza, España, Perú, Brasil, Francia y Nepal así como en la elaboración de tesis.

Además del centro de investigación CREALP y la oficina de ingeniería HydroCosmos SA, que en la actualidad desarrollan RS MINERVE, dos universidades (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne y la Universidad Politécnica de Valencia) trabajan en conjunto para mejorar RS

Minerve y utilizarlo para apoyar los cursos de postgrado en Ingeniería Civil y Ciencias Ambientales.

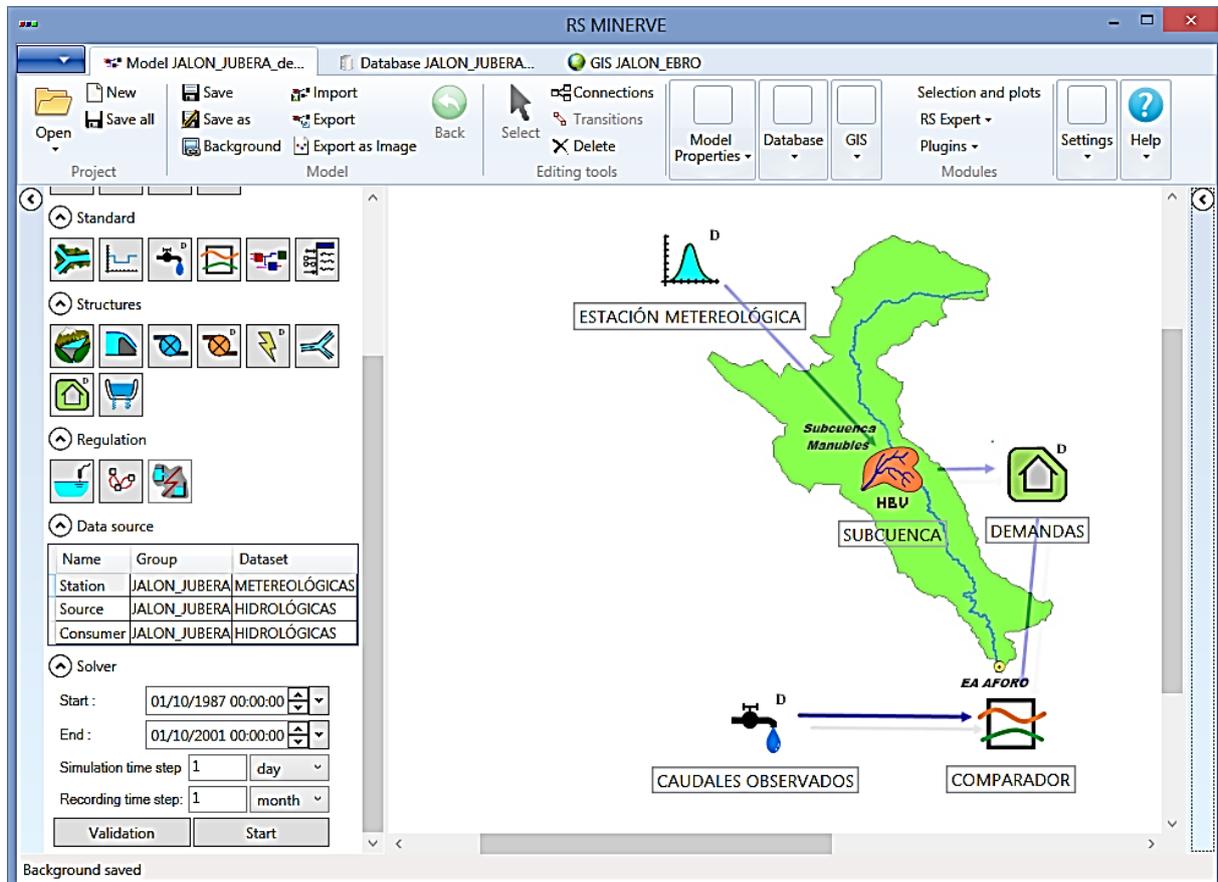


Figura 15. Interfaz gráfica del software Rs Minerve

4.3. MODELO HBV

El modelo fue desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia y tiene como objetivo estudiar y analizar el comportamiento de una cuenca en modo distribuido o semidistribuido. El modelo HBV (Bergstrom, 1976) genera como respuesta la mayor parte de la producción de escorrentía que se produce en una cuenca usa una estructura simple y se caracteriza por emplear pocos parámetros en la modelación. Este modelo consta de 3 principios fundamentales: la acumulación de nieve y el derretimiento de la nieve, la humedad del suelo, el ciclo fluvial de los ríos y la respuesta de los mismos respecto al proceso que se genera en la cuenca. Se basa en una modelación a través de tanques o reservorios en el cual cada uno presenta ciertas características específicas entre las que destacan el umbral para la producción de escorrentía, constantes que conceptualizan la velocidad con la que se propagan los procesos etc.

Estos modelos utilizan la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración potencial como parámetros de entrada a partir de los cuales se estima la producción de escorrentía a través de la cuenca.

En la Figura 16 se puede observar la conceptualización del modelo HBV en el mismo se describen los procesos que se llevan a cabo en la cuenca:

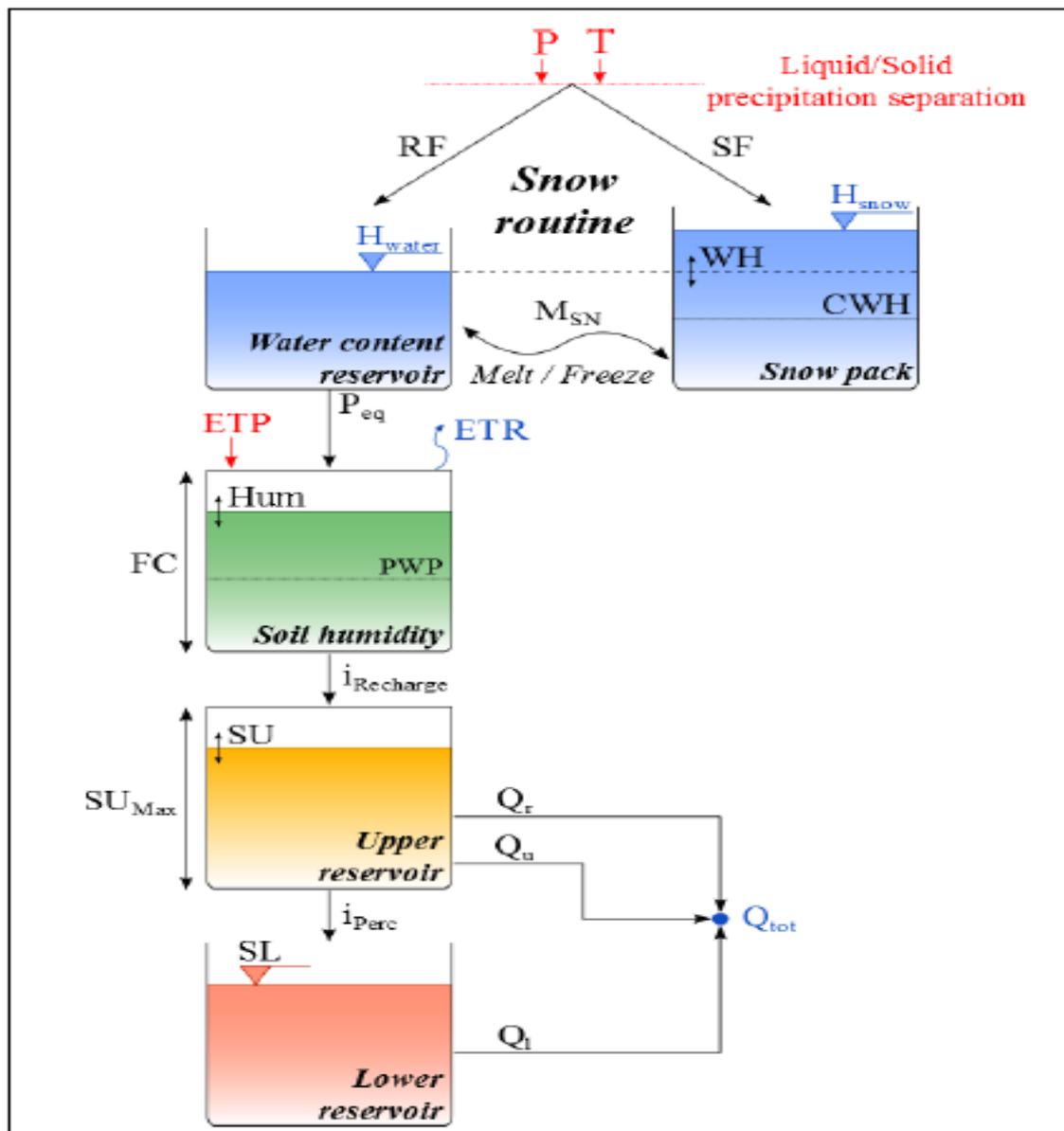


Figura 16. Conceptualización Modelo HBV

Fuente: García Hernández, J. et al., 2014. Rs MINERVE-User's manual v1.15.

4.3.1. Condiciones Iniciales y Parámetros sujetos a calibración en el modelo

En la Tabla 5 se presenta la lista de condiciones iniciales y en la Tabla 6 los parámetros sujetos a calibración empelados en el modelo HBV:

Tabla 5. Condiciones Iniciales del Modelo HBV

Parámetro	Descripción	Unidad
HsnowIni	Altura inicial de la nieve	m
WHIni	Contenido relativo de agua inicial en el paquete de nieve	-
HIni	Humedad inicial	m
SUIni	Nivel de agua inicial en depósito superior	m
SLIni	Nivel de agua inicial en depósito inferior	m

Tabla 6. Parámetros empelados por el Modelo HBV

Parámetro	Descripción	Unidad
CFMax	Factor de Fusión de la nieve.	mm/s°C
CFR	Factor de Recongelamiento.	-
CWH	Contenido relativo crítico de agua en el paquete de nieve.	-
TT	Temperatura umbral lluvia/nieve	°C
TTInt	Intervalo de temperatura, mezcla lluvia/nieve	°C
TTSM	Temperatura crítica de fusión de nieve	°C
FC	Capacidad de campo	mm
Beta	Coficiente de forma (infiltración)	-
PWP	Punto de marchitez de la vegetación	mm
SUmax	Umbral de descarga directa (tanque superior).	mm
Kr	Coficiente de descarga directa (tanque superior).	-
Ku	Coficiente de recesión (tanque superior).	-
Kperc	Coficiente de percolación.	-
KI	Coficiente de recesión (tanque inferior).	-

4.3.2. Descripción del Modelo

Según Paredes et al (2014) y en base a las ecuaciones descritas por primera vez por Bergstrom (Bergstrm, 1976) que se describen a continuación, la precipitación en el momento de entrar a formar parte del modelo en base a la temperatura presente en el medio se divide en dos partes: lluvia o nieve. Es conocido que la nieve se genera cuando la T se encuentra por debajo de $TT - \frac{TTInt}{2}$, mientras que la precipitación se presenta en forma de lluvia cuando la T se encuentra por encima de $TT + \frac{TTInt}{2}$. Cuando se tiene un punto intermedio entre los dos se producen ambos tipos de precipitación:

$$RF = \alpha * P$$

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

$$\text{Si } T < TT - \frac{TTInt}{2}$$

$$\alpha = 0$$

$$\text{Si } TT - TT - \frac{TTInt}{2} < T < TT - TT + \frac{TTInt}{2}$$

$$\alpha = \frac{T - (TT - \frac{TTInt}{2})}{TTInt}$$

$$\text{Si } T > TT + \frac{TTInt}{2}$$

$$\alpha = 1$$

Donde:

- RF: Precipitación en forma de lluvia (L/T).
- SF: Precipitación en forma de nieve (L/T).
- α : Factor de Separación.
- P: Precipitación (L/T).
- T: Temperatura (C).
- TT: Umbral de temperatura lluvia/nieve (C).
- TTInt: Intervalo de temperatura para la mezcla lluvia/nieve (C).

Es necesario indicar que la precipitación en forma de nieve, al entrar a formar parte del módulo de nieve varía su contenido en función del punto de fusión del hielo empaquetado en el módulo en estudio. La fusión de la nieve se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Si } T > TTSM$$

$$M_{sn} = CFMax * (T - TTSM)$$

$$\text{Si } T \leq TTSM$$

$$M_{sn} = CFR * CFMax * (T - TTSM)$$

$$\frac{dH_{snow}}{dt} = SF - M_{sn}$$

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

$$M_{sn} \cong -\frac{H_{water}}{dt}$$

Donde:

- Msn: Punto de Fusión de la Nieve (L/T).
- CFMax: Factor de Fusión grado/día (L/T/C).
- CFR: Factor de Re-congelamiento.
- TTSM: Temperatura crítica de Fusión de la nieve (C).
- Hsnow: Altura del paquete de nieve (L).
- Hwater: Contenido de agua (L).
- dt: Variación del tiempo (T).

A su vez la precipitación equivalente presente en el medio está en función de la cantidad de agua presente en el módulo de nieve:

$$WH = \frac{H_{water}}{H_{snow}}$$

Si Hsnow = 0.

$$P_{eq} = RF + \frac{H_{water}}{dt}$$

Si Hsnow > 0 y WH ≤ CWH.

$$P_{eq} = 0$$

Si Hsnow > 0 y WH > CWH.

$$P_{eq} = (WH - CWH) * \frac{H_{snow}}{dt}$$

$$\frac{dH_{water}}{dt} = RF + M_{sn} - P_{eq}$$

Donde:

- WH: Contenido relativo de agua en el módulo de nieve.
- CWH: Contenido relativo crítico de agua en el módulo de nieve.
- Peq: Precipitación Equivalente (L/T).

Una vez que la precipitación cae sobre una cuenca, esta se divide en dos componentes importantes: la capacidad de almacenamiento de humedad en el suelo lo que constituye el agua capilar disponible para la evapotranspiración y la escorrentía subterránea (Infiltración) la cual puede estimarse a partir del contenido de humedad al momento que tiene lugar la precipitación. Además existen 2 parámetros importantes que intervienen en el proceso como lo son la capacidad de campo del suelo (FC) el cual limita el contenido máximo de humedad en el suelo en la zona superficial y el coeficiente adimensional de forma (Beta) que modifica el grado de infiltración para el mismo grado de humedad relativa presente en el suelo.

En la siguiente ecuación se muestra el cálculo de la filtración efectiva en función del contenido de humedad del suelo:

$$i_{recarga} = \left(\frac{Hum}{FC} \right)^{Beta} * P_{eq}$$

Donde:

- $i_{recarga}$: Intensidad de recarga de los depósitos (L/T).
- Hum: Humedad del suelo (L).
- FC: Capacidad máxima de almacenamiento del suelo (L).
- Beta: Coeficiente de forma.
- P_{eq} : Precipitación equivalente (L/T).

La evapotranspiración real se obtiene a partir de la humedad del suelo y de la evapotranspiración potencial, hay que indicar que esta evapotranspiración real estará en función del punto de marchitez PWP (Humedad mínima del suelo necesario para que la planta no se marchite). Es importante indicar que en todo momento PWP tendrá un valor inferior a FC (Capacidad Máxima de almacenamiento del suelo). En las ecuaciones mostradas a continuación se refleja el cálculo de la evapotranspiración:

Si $Hum < PWP$

$$ETR = ETP * \frac{Hum}{PWP}$$

Si $Hum \geq PWP$

$$ETR = ETP$$

Donde:

- ETR: Evapotranspiración real (L/T).
- ETP: Evapotranspiración potencial (L/T).
- PWP: Punto de marchitez del suelo (L).

Una vez estimadas la infiltración y la evapotranspiración real, se estima la humedad del suelo resultante que viene dado por la ecuación.

$$\frac{dHum}{dt} = (Peq - i_{recarga}) - ETR$$

$$Hum \geq 0$$

Si Peq es elevada Hum (Humedad del Suelo) puede llegar a ser superior a FC , y en este caso se evidencia un exceso de agua el cual es considerado como escorrentía directa.

$$Qs = Hum_t - FC$$

Si $Hum(t) > FC$.

$$Hum_t = FC$$

Donde:

- Qs : Escorrentía Directa (L^3/T).

Mientras que el flujo subsuperficial (Qr) se determina mediante dos funciones de descarga, que entran a formar parte del proceso cuando el nivel de agua en el tanque superior alcanza el valor del umbral SU_{max} que a su vez se encuentra regulado por el coeficiente de almacenamiento en el depósito Kr :

Si $SU > SU_{max}$.

$$Qr = Kr * (SU - SU_{max}) * A$$

Si $SU \leq SU_{max}$.

$$Qr = 0$$

Donde:

- Qr : Flujo Subsuperficial (L^3/T).

- Kr: Coeficiente Regulador de flujo subsuperficial (1/T).
- SU: Nivel de Agua en el tanque superior (L).
- SUmáx: Umbral del tanque superior (L).
- A: Superficie de la cuenca (L²).

Una descarga lenta por otra parte viene regulada por el coeficiente Ku:

$$Q_u = K_u * S_U * A$$

Donde:

- Qu: Interflujo (L³/T).
- Ku: Coeficiente regulador de interflujo o flujo de descarga lenta (1/T).

Además en este módulo se evidencia una descarga por percolación el cual alimenta el depósito más profundo y viene definido por el coeficiente Kperc:

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

Donde:

- i_{perc}: Intensidad de percolación (L/T).
- K_{perc}: Coeficiente de percolación (1/T).

Una vez determinados los principales flujos que intervienen en el proceso, se establece un balance de humedad a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{dS_U}{dt} = i_{recarga} - (K_{perc} + K_u) * S_U - \frac{Q_r}{A}$$

$$S_U \geq 0$$

La descarga subterránea viene dado por un solo parámetro de descarga y viene dado por:

$$Q_l = K_l * S_l * A$$

Donde:

- Ql: Flujo Base (L³/T).
- Kl: Coeficiente de almacenamiento de flujo base (1/T).
- Sl: Nivel de agua en el tanque inferior (L).

En este caso el balance viene establecido como sigue:

$$\frac{dSL}{dt} = i_{perc} - Kl * SL$$

$$SL \geq 0$$

Finalmente la aportación o escorrentía total producida en la cuenca viene dada por la suma de cada uno de los flujos establecidos anteriormente:

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

4.4. ALGORITMO SCE-UA (THE SHUFFLED COMPLEX EVOLUTION UNIVERSITY OF ARIZONA).

El algoritmo de optimización de SCE-UA fue desarrollado en la Universidad de Arizona por Duan et al (1992), siendo ampliamente utilizado para la calibración de modelos hidrológicos por la eficiencia que ha tenido en un sin número de investigaciones realizadas a nivel mundial. Es empleado principalmente en modelos que se manejan un gran número de parámetros que tienden a ser no lineales. El algoritmo trabaja de tal modo que modifica y busca los parámetros óptimos a partir de diferentes soluciones con el fin de maximizar la función objetivo y ajustar el modelo lo más próximo a su comportamiento en la realidad.

Este algoritmo se basa en procedimientos determinísticos y aleatorios los cuales emplean criterios de selección natural y genéticos, en el que los individuos (puntos de búsqueda) se organizan en equipos (complex) con el fin de encontrar un óptimo global a través de procesos evolutivos (evolution) basados en la reproducción (mutación) y mezcla de equipos (shuffled).

La aplicación de los algoritmos evolutivos comprende varias etapas que se detallan a continuación:

Generación de la Muestra: Generar puntos en el espacio que representen los parámetros útiles para la representación del proceso, es necesario determinar la aptitud de cada punto.

Clasificación de los Puntos: Con el objetivo de aumentar la aptitud de los puntos generados anteriormente, se los clasifica de tal modo que el primer punto equivalga al de menor aptitud y a su vez el último punto represente el valor con mejor aptitud.

Partición en Grupos: Los puntos ya clasificados por aptitud se dividen en grupos, NGS (Número de puntos en cada grupo). Los grupos son divididos de tal forma que el primer conjunto contiene todos los puntos que ocupan las posiciones $NGS*(k-1)+1$, mientras que el segundo ocupa las posiciones $NGS*(k-1)+2$ y así sucesivamente.

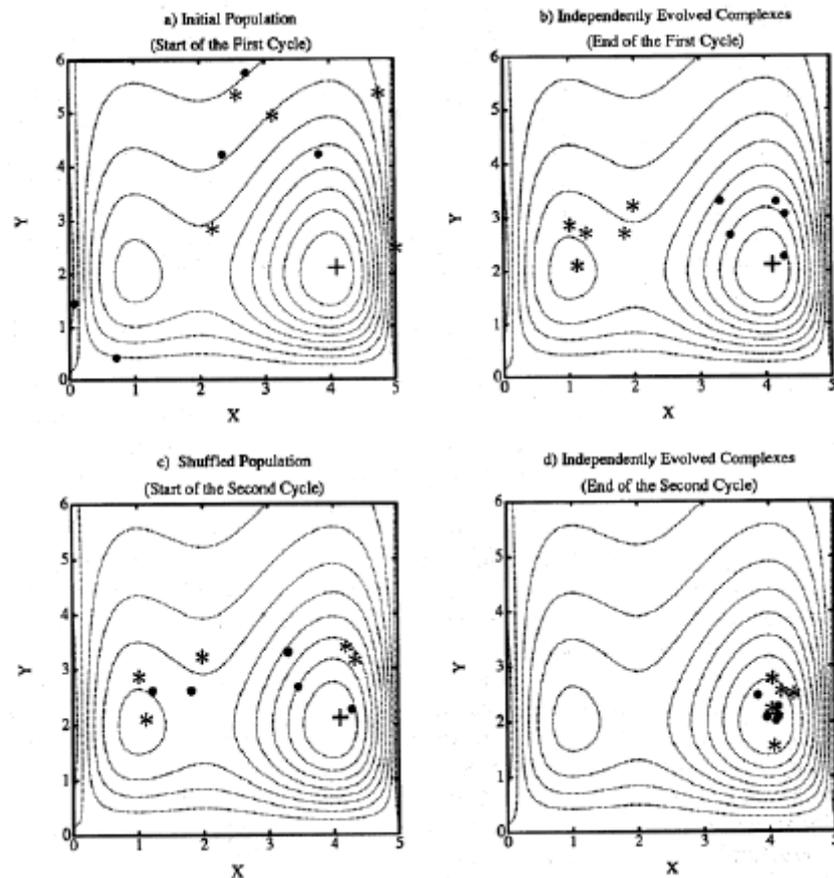


Figura 17. Evolución de los grupos.

Fuente: Duan, 1992

En la Figura 17 se observa la partición en 2 grupos representados por (.) y (*) respectivamente. Las líneas de contorno que se observa representan una función de superficie en la tiene lugar un óptimo global ubicado en las coordenadas (4,2) y un óptimo loca situado en (1,2).

Evolución de cada grupo: Los grupos evolucionan independientemente siguiendo un número de pasos de evolución permitido (NPSL) como se muestra en la Figura 18 en la que se observa cómo evolucionan los puntos en cada etapa, para al final seleccionar los puntos en base a una distribución de probabilidad pre-especificada de tal manera que los mejores puntos tengan una mayor probabilidad de ser elegidos para formar un subgrupo. El símbolo * en la gráfica representa los nuevos puntos generados.

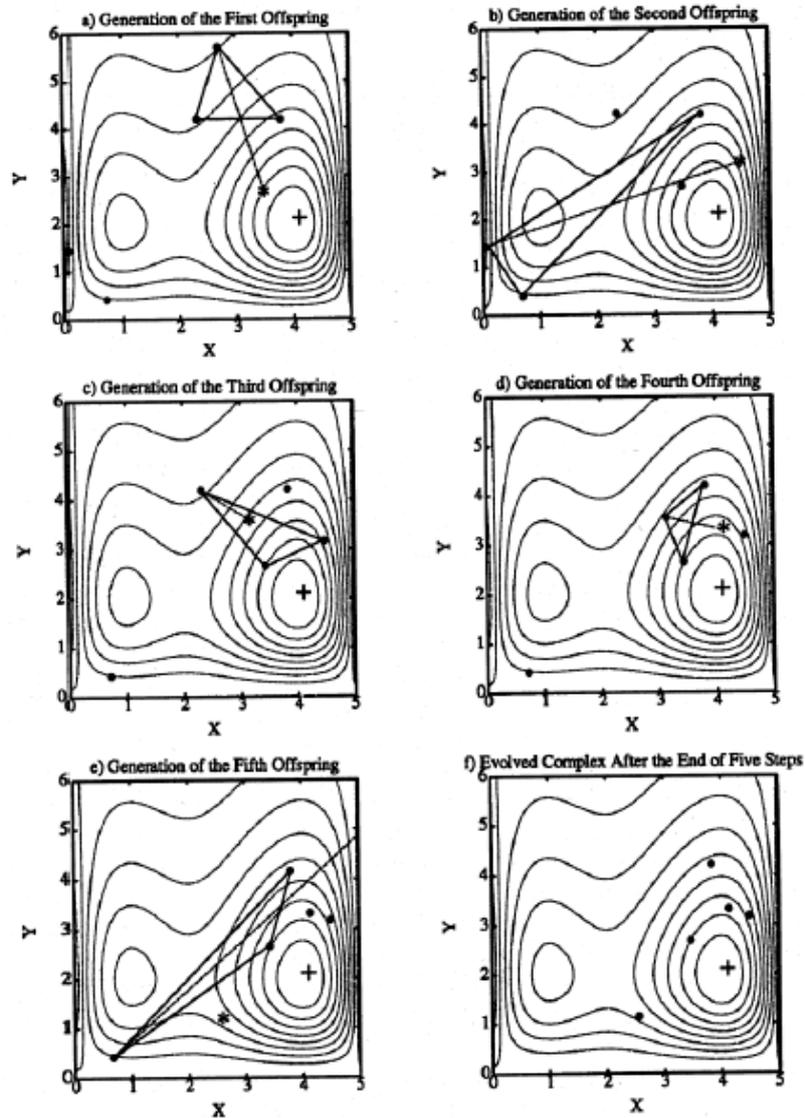


Figura 18. Etapas de Evolución que se lleva a cabo en cada grupo.

Fuente: Duan, 1992

Existen diferentes modos de evolucionar: la reflexión (Figura 18), la contracción y la mutación. En la reflexión se refleja el peor punto del sub-grupo, si el punto reflejado presenta valores más bajos que el peor punto se sustituye por el nuevo punto que se obtiene por contracción (Figura 18,c) al ser rechazado en la etapa de la reflexión por no aumentar el valor de aptitud. La mutación tiene lugar cuando se genera aleatoriamente un punto en el espacio de parámetros posibles, para sustituir el peor punto del subgrupo (Figura 18, e). La mutación también tiene lugar cuando tanto el paso de la reflexión y el paso de la contracción no mejoran el valor de aptitud. En la Figura 17, b se muestra la ubicación de 2 grupos evolucionados en forma independiente al final del primer ciclo de evolución.

Los grupos marcados con (*) se encuentran convergiendo al óptimo global local, mientras que el marcado por (.) converge hacia el óptimo global.

Mezcla de los grupos: Los puntos de los grupos se combinan dando lugar a una sola muestra de población la cual se ordena con el objetivo de mejorar el valor de la aptitud, posteriormente se vuelve a partir o mezclar la muestra de población en varios grupos en base al procedimiento establecido anteriormente. En este punto lo que se pretende es evitar que el algoritmo produzca individuos atascados e óptimos locales, dejando los óptimos globales desiertos.

Comprobación de la convergencia: Si $MINGS$ (número mínimo requerido de grupos) $<$ NGS , se retira el grupo con los puntos que ocupan el último lugar, se establece $NGS=NGS-1$ y $NPT = NGS*NPG$ y se vuelve al paso en el que se da la evolución individual de cada grupo. Cuando el valor de la aptitud no ha mejorado en porcentaje o cuando se ha superado el número máximo de iteraciones el proceso se detiene.

En la Figura 17 los dos grupos tienden a converger hacia el óptimo global, además Figura 17, d muestra los dos grupos al final del segundo ciclo de evolución.

El algoritmo contempla varios criterios de convergencia para que dé por terminado el proceso evolutivo y suministre la solución.

RS MINERVE en el proceso de calibración automática maneja entre otros el algoritmo SCE-UA para estimar los óptimos globales, y esta tesina no se escapa de su marco de aplicación dado que este algoritmo ha sido empleado en diferentes investigaciones es por tal motivo que resulta necesario comprender su funcionamiento para realizar una calibración correcta, sin embargo es necesario tener en mente que durante el proceso se pueden generar problemas de incoherencia física y conceptual de los parámetros que adopta el modelo siendo indispensable una observación sigilosa durante todo el proceso para evitar este tipo de problemas.

5. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

La elaboración de modelos de precipitación-escorrentía (MPE) requiere de información necesaria e indispensable para la ejecución del mismo. La información debe caracterizarse por ser representativa de la cuenca a modelar por tal motivo, los datos disponibles atraviesan una etapa de tratamiento y depuración para posteriormente procesarla.

La información que se empleó para la ejecución del presente proyecto se obtuvo en gran parte de la página de la Confederación Hidrográfica del Ebro. Los MPE requieren para su modelación la siguiente información:

- Modelo digital del terreno de la cuenca hidrográfica.
- Información georreferenciada: Subcuencas aportantes de la cuenca, red hidrográfica fluvial de la cuenca, localización espacial de las estaciones de aforo, embalses operacionales, usos principales del suelo, topografía y dirección del flujo etc.
- Datos meteorológicos diarios (Precipitación, Temperatura, Evapotranspiración Potencial).
- Caudales diarios o mensuales de las estaciones de aforo.
- Modelo de gestión de la cuenca.

5.1. INFORMACIÓN GEORREFERENCIADA

La información en archivos shape se obtuvo a través del Geoportal SITEbro de la Confederación hidrográfica del Ebro, la cual es de libre acceso, dicha información fue procesada en ARCGIS 10.1 (versión de prueba) que es un sistema de información geográfica bastante empleado en la actualidad debido a su gran funcionalidad. Los principales archivos shape empleados para el análisis de la cuenca hidrográfica en estudio son los que se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7. Información Georreferenciada

Archivo Shape	Fuente
Modelo Digital del Terreno (MDT)	USGS
Red Fluvial 1_-25000	SITEbro
Unidades Hidrológicas	SITEbro
Estaciones de Aforo	SITEbro
Embalses Operativos	SITEbro
Red Saih	SITEbro
Usos de Suelo (Corine_2006)	IGN

5.2. DATOS METEOROLÓGICOS

En la modelación hidrológica los datos meteorológicos, en especial la precipitación y la temperatura juegan un rol importante en vista que estos en sí constituyen los datos de entrada al modelo y son los responsables del régimen de escorrentías que se producen en una determinada cuenca. Los cambios en las variables (precipitación y temperatura) no siempre se traducen como aumentos y disminución de los recursos hídricos. En zonas secas donde la evapotranspiración es mayor a la precipitación un cambio en el régimen de precipitaciones tendrá una repercusión importante en la producción de escorrentía y en la recarga de los acuíferos, si las precipitaciones se reducen o la temperatura aumenta por ejemplo aumenta el estrés hídrico en la cuenca, mientras que un aumento de temperatura involucra a la vez un aumento de la evapotranspiración real. En zonas húmedas donde la precipitación se encuentra por encima de los valores de evapotranspiración un cambio en el régimen de precipitaciones y en la evapotranspiración dan lugar a la generación de recursos. En zonas montañosas donde la nieve representa un factor importante, un aumento de temperatura provoca la fusión de la misma generando aumentando de esta manera el volumen de aportaciones.

Para la determinación de las series de precipitaciones y temperaturas empleadas como inputs al modelo HBV en el desarrollo de este trabajo se empleó la base de datos mallada de precipitación y temperatura Spain 02 v2.1, (Herrera, S., Gutiérrez, J.M., Ancell, R., Pons M.R., Frías, M.D., y Fernández, J. (2012) desarrollado por el Departamento de Matemáticas Aplicadas, el grupo de meteorología de la Universidad de Santander en conjunto con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

5.2.1. Precipitación

Los datos de precipitación para las subcuencas del río Jalón, se obtuvieron a partir de Spain 02 v2.1, que consiste en una base de datos mallada de precipitación de 50 años de alta resolución, valido para toda la Península de España y las Islas Baleares. La malla generada se caracteriza por tener una resolución horizontal de 2° (aproximadamente 20 km) y comprende valores correspondientes al período 1950-2008, es importante señalar que en la ejecución de la investigación intervinieron alrededor de 2756 estaciones (unas 250 para temperaturas) pertenecientes a la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). Para la elaboración de la base de datos se emplearon diferentes métodos de interpolación los cuales fueron examinados a

través de una validación cruzada y posteriormente comparados con los datos observados en las estaciones meteorológicas.

Los valores de precipitación empleados por tanto son resultado de interpolaciones que se basan en el método de krigeado, (Ver Figura 19), el cual se basa en el análisis de la estructura geoestadística de variación de la precipitación, fundamentándose en el conocimiento del comportamiento de la misma en el espacio, generando como resultado un semivariograma que indica la capacidad de predicción que tiene cada punto (definido por sus coordenadas) en función de la distancia que lo separa con otro punto.

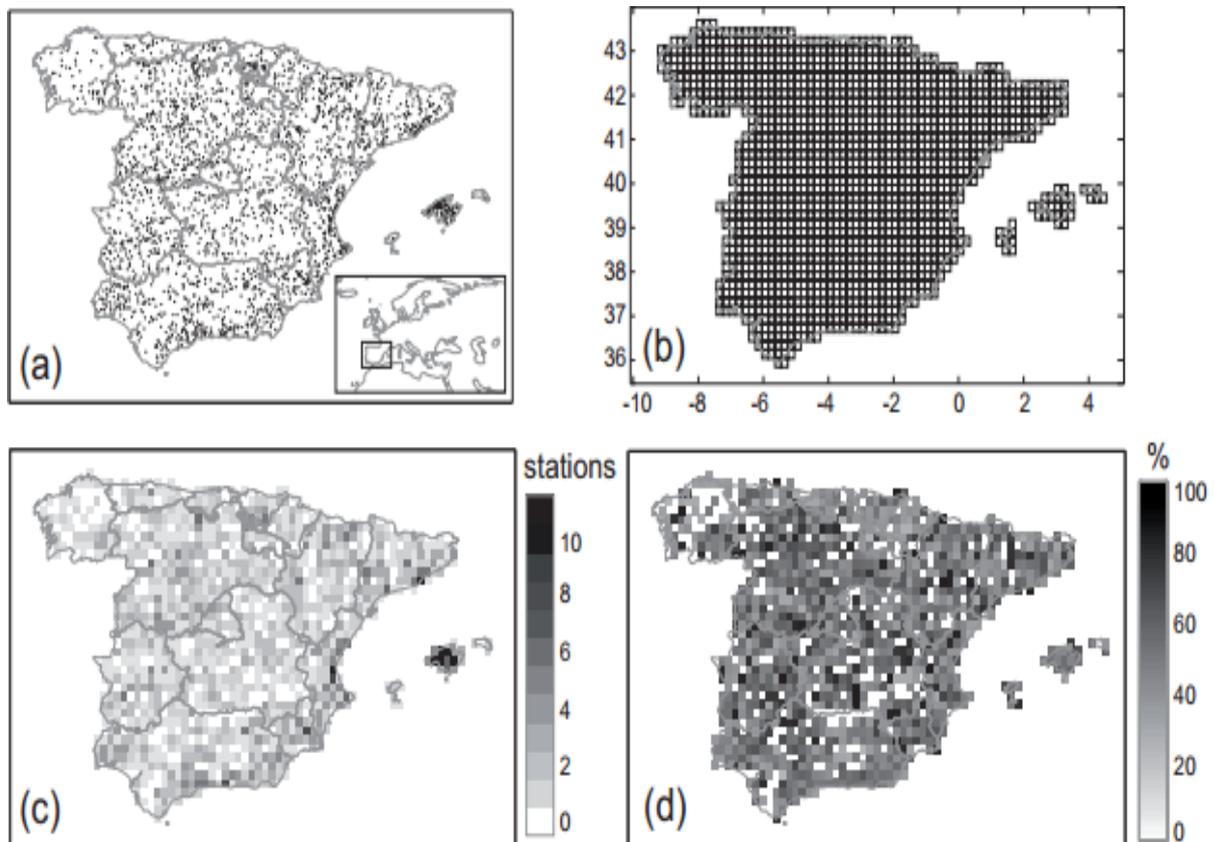


Figura 19. (a) Estaciones de Precipitación seleccionadas para construir el modelo interpolado. (b) Malla de 0.2°, aproximadamente 20 km (c) Densidad de estaciones en la malla, obtenida como resultado de los registros medios diarios por cada punto de la malla d) Cobertura Temporal obtenida como resultado de los registros correspondientes a las estaciones por cada punto de la malla.

Fuente: Herrera et al., 1992

Para la recolección y procesado de los datos necesarios para la elaboración del modelo, la cuenca se dividió en 39 subsistemas (microcuencas) a los cuales se determinó su centroide (centro de gravedad del área de drenaje) para la asignación de los datos correspondientes a la precipitación en dicho punto que vino determinado a través de sus coordenadas espaciales

(longitud y latitud), ésta asignación o carga de valores obtenidas se realiza con el apoyo de una hoja de Excel desarrollada para este cometido. La serie de datos obtenida corresponde al periodo 01/01/1950 al 31/03/2008 como ya se había dicho anteriormente. En la Figura 20, se muestra los centroides creados para las microcuencas del Jalón estudiadas en el marco de este trabajo.

Respecto a la validez de las series obtenidas, el análisis de indicadores de valores extremos muestran la capacidad de Spain02 para reproducir la intensidad y variabilidad espacial de valores extremos observados, por tal motivo ha sido utilizado en numerosas estudios e investigaciones.

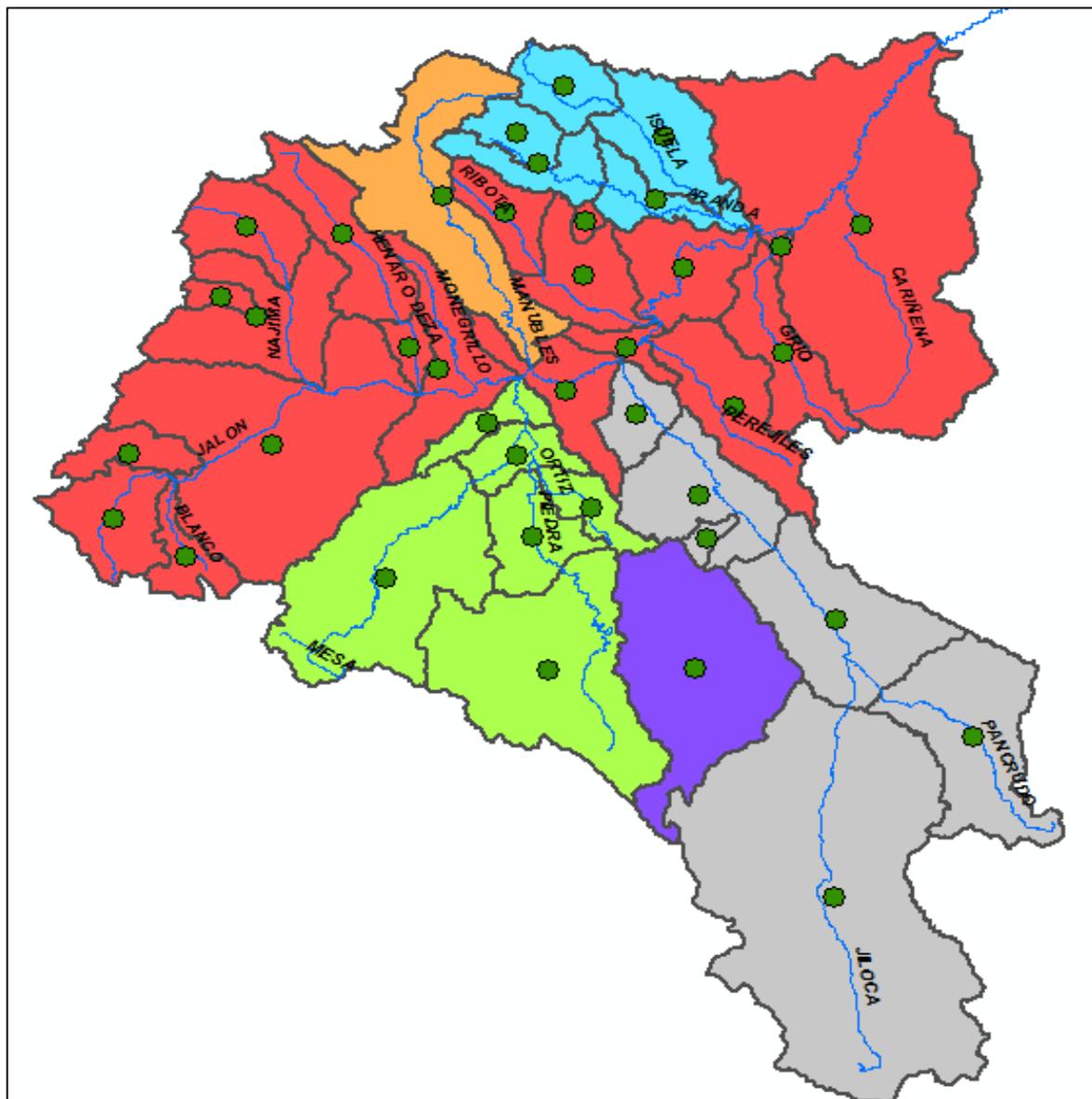


Figura 20. Centroides de las subcuencas del sistema hídrico del Jalón.

5.2.2. Temperatura

La serie de datos de temperatura al igual que la precipitación fue obtenida a través de la base de datos de Spain02 con un procedimiento similar al anteriormente mencionado. Los valores obtenidos corresponden a la temperatura máxima y mínima en cada punto de la malla.

Cabe indicar que la temperatura es un parámetro importante cuando se tiene en mente modelizar la nieve, a su vez interviene en el cálculo de la evapotranspiración potencial de la microcuenca bajo estudio según el método empleado para su cálculo.

5.2.3. Evapotranspiración

Los datos de la Evapotranspiración fueron calculados empleando el modelo de Hargreaves en base a la temperatura máxima y mínima obtenida para cada centroide de las microcuencas bajo estudio. En este punto es importante establecer el tipo de suelo o cobertura de cada microcuenca a modelar, dado que la ETP cambia de un punto a otro de acuerdo al tipo de cultivo/suelo. Por lo expuesto, el ETP es objeto de correcciones en base al tipo de cultivo evidenciado en cada subcuenca.

Para la asignación de los coeficientes de cultivo, se empleó archivos en formato shape, Corine_2006 específicamente, el cual contiene capas de los usos de suelo de toda España el cual posteriormente fue vinculado a la cuenca del Río del Jalón. (Ver Figura 21).

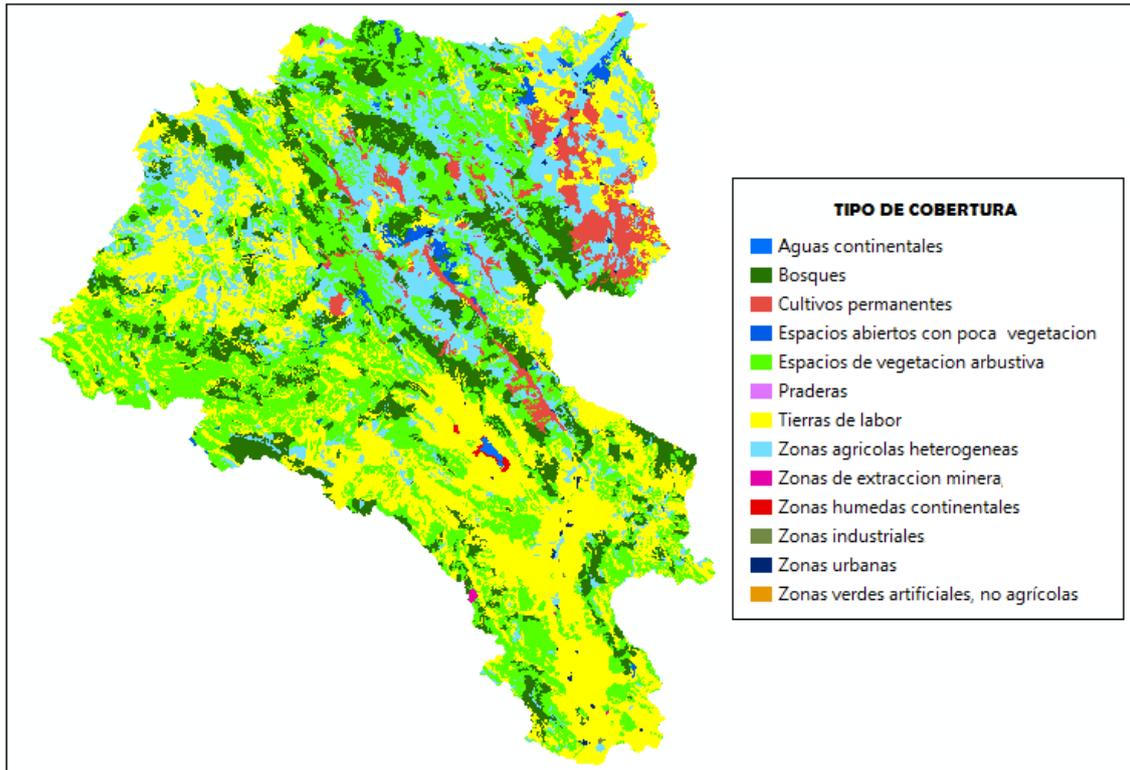


Figura 21. Usos del suelo en la cuenca del Jalón.

Finalmente la ETP para cada microcuenca se obtuvo mediante método directo, multiplicando la ETP potencial por el respectivo coeficiente de cultivo asignado.

$$ET_o = 0.0135 * k * (T + 17.78) * Ra * (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

A continuación se detalla el procedimiento efectuado para la obtención del ETP.

La ETP se determina para cada subcuenca a partir de las coordenadas de su centroide, de la cobertura vegetal y de las temperaturas observadas en este punto. Para el cálculo de la ETP se emplea en el proyecto la fórmula de Hargreaves la cual presenta la ventaja frente a otras fórmulas que esta requiere tan solo datos de temperatura y radiación solar respecto a otras formulaciones. Es necesario tener en cuenta que la ETP calculada en este punto corresponde a la evapotranspiración de referencia, la ETP real vendrá dado en función del coeficiente de cultivo establecido para cada subcuenca.

$$ET_o = (0.0135 * k * (T + 17.78) * Ra * (T_{max} - T_{min})^{0.5}) * 0.408$$

Donde:

- ET_o : Evapotranspiración potencial diaria (de referencia) (mm/día)

- T: Temperatura media diaria (C)
- T: max Temperatura máxima diaria (C)
- T: min Temperatura mínima diaria (C)
- Ra: Radiación solar extraterrestre (mm/día)
- K: Coeficiente de cultivo (-)

Se ha tomado un valor inicial de k (coeficiente de cultivo) de 0.162 recomendados por la FAO (1998), mientras que el valor de la radiación solar extraterrestre (Ra) se ha estimado mediante la siguiente fórmula:

$$Ra = \frac{24 * 60 * 0.082}{\pi} * dr * [w_s * sen(\gamma) * sen(\delta) + cos(\gamma) * cos(\delta) * sen(w_s)] [MJulio / m^2 / dia]$$

Donde:

- dr: Es la distancia relativa
- w_s : Es el ángulo horario de atardecer (rad)
- δ : Es la declinación solar(rad)
- n: Es el día Juliano (-)

Una vez determinado la ETo, se lo multiplica por un factor correspondiente al coeficiente de cultivo el cual depende de los factores determinantes de cada subcuenca tales como el tipo de cultivo, clima, evaporación del suelo, etapa de crecimiento del cultivo.

De acuerdo al documento No.56 publicado por la FAO (Food and Agricultural Organization) la evapotranspiración del cultivo (ETc) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$ETP = ETc = Kc * ETo$$

En la Tabla 8 se observa los valores de Kc empleados en función de la cobertura del suelo, cabe destacar que dado que se está construyendo un modelo semidistribuido para cada subcuenca definido por los parámetros hidrológicos(P,T) es necesario determinar un coeficiente kc representativo para cada subcuenca, este cometido es posible realizarlo con el uso de la media ponderada, en la cual se relaciona el área correspondiente de cada tipo de cobertura del suelo respecto al área total de la subcuenca, es decir que a cada tipo de cobertura le corresponderá un área dentro de toda la subcuenca y por tanto llevará asociado un valor distinto de kc.

Tabla 8. Coeficientes de corrección, kc, para cada subcuenca

Subcuenca	kc	Subcuenca	kc	Subcuenca	kc
801	0.9324	815	0.9216	901	0.9365
802	0.9300	816	0.9316	902	0.9230
803	0.9364	817	0.9244	903	0.9374
804	0.9359	818	0.9300	904	0.9401
805	0.9257	819	0.9314	905	0.9269
806	0.9433	820	0.9513	906	0.9307
807	0.9237	821	0.9438	907	0.9387
809	0.9159	822	0.9285	908	0.9402
810	0.9162	823	0.9326	909	0.9271
811	0.9228	824	0.9323	910	0.9143
812	0.9242	825	0.9355	911	0.9314
813	0.9196	826	0.9436	912	0.9289
814	0.9292	827	0.9274	913	0.9454

El Kc resultante de este modo proviene de la siguiente ecuación:

$$Kc(x) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Kc_i * Ai}{At}$$

Es importante comentar que la cobertura del suelo fue extraído a partir de la base de datos CORINE (Coordination on Information of the environment) 2006 del Instituto Geográfico Nacional, mismo que pone a disponibilidad los usos del suelo en toda la Unión Europea con el empleo de imágenes LANDSAT a una escala de 1:100.000.

5.3. ESTACIONES DE AFORO Y SEGUIMIENTO DE EMBALSES

En la cuenca hidrográfica del Jalón se cuentan con registros de 40 estaciones de aforo, contabilizándose 2 estaciones ubicadas en canales y 3 en embalses. El caudal que atraviesa la cuenca en su gran mayoría se encuentra alterado debido a los usos y demandas de agua producida en la cuenca. En la Tabla 9, se detallan las principales aportaciones de las estaciones de aforo registradas tanto en régimen natural como en régimen alterado o real.

Tabla 9. Estaciones de aforo de la cuenca del río Jalón

Estaciones de Aforo	Régimen Alterado (Hm ³ /año)	Régimen Natural (Hm ³ /año)	REGISTRO HISTÓRICO
Río Jalón			
EA 58 Jalón en Jubera	22	21	1931-2011
EA 7 Jalón en Cetina	72	65	1912-2004
EA 126 Jalón en Ateca	175	187	1952-2011
EA 266 Jalón en Calatayud	192	391	1993-2011
EA9 Jalón en Huérmada	386	396	1912-1994
EA 87 Jalón en Grisén	164	444	1934-2012
Afluentes del Río Jalón			
EA 9167 Blanco en Barrio Blanco	10.6	10.4	1970-2011
EA 807 Monteagudo en Nájim, Deriv	1.714	—	-
EA 147 Nájima en Monreal de Ariza	11.5	18	1954-2011
EA 57 Deza en Embid de Deza	7.3	8.4	2005-2010
EA 184 Manubles en Ateca	21	26	1975-2011
EA 236 Aranda en Maidevera CE	8.9	9.0	1984-2011
EA 808 Maidevera en Aranda	13.8	—	-
EA 238 Arandae Maidevera PP	9	12.9	1987-2010
EA 261 Osuela en Trasobares	13.9	17.2	1990-2011
Río Piedra			
EA 8 Piedra en Nuévalos	52	46	1912-2011
EA 812 Embalse de la Tranquera	109	—	1972-2011
EA 125 Piedra en Carenas	111	108	1953-2011
Afluentes del Río Piedra			
EA 56 Mesa en Jaraba	62		1930-2011
Río Jiloca			
EA 42 Jiloca en Calamocha	102	115	1930-2011
EA 10 Jiloca en Daroca	107	158	1912-2011
EA Jiloca en Morata de Jiloca	108	172	1930-2011
Afluentes del Río Jiloca			
EA 41 Pancrudo en Navarrete	17.2	15.0	1930-2011

Fuente: Plan Hidrológico del río Jalón (2007)

RÉGIMEN NATURAL DE CAUDALES EN LA CUENCA DEL JALÓN

Según el Plan hidrológico de la cuenca del Jalón (2007) en la cuenca se estiman valores medios del orden de 444 Hm³/año de las cuales el río Piedra y Jalón contribuyen la mayor parte del recurso, 108 Hm³/año y 172 Hm³/año respectivamente. Sin embargo la productividad biológica varía desde su cabecera hasta su de desembocadura, teniéndose de este modo un caudal específico promedio de 1.5 lt/s*Km². Es importante indicar que la evolución temporal

de las aportaciones naturales se han visto modificadas desde 1929 hasta 2002 en donde se han identificado dos períodos húmedos prolongados entre 1935-1942 y 1959-1980, al mismo tiempo cabe indicar que la máxima aportación registrada fue en el año de 1988/1989, mientras que en el año 1995/1996 en contraste con los anteriores se produjo el año con menor aportación (1995/1996).

Es necesario destacar que sobre los cauces de los ríos Piedra y Mesa existe una regulación natural importante dada la presencia de acuíferos calcáreos característicos de la cuenca, es por tal motivo que no existe mayor variación entre el caudal máximo y mínimo. No así en el río Ortiz, el cual depende directamente de las precipitaciones de la zona dado la naturaleza impermeable propia de esta zona de la cuenca.

Modelos empleados en la cuenca citan que la aportación media de la cuenca del Jalón debido a los cambios generados por el cambio climático se ha visto disminuidos en el orden del 30-50%.

RÉGIMEN ALTERADO DE CAUDALES

Los caudales que realmente circulan a través de la cuenca son aquellos que se registran en las estaciones de aforo. El caudal registrado por estas estaciones son las que corresponden a la realidad de la cuenca encontrándose alterados por los usos, regulación y/o gestión que se le da al recurso, las principales afecciones que padece la cuenca se detallan a continuación:

- Dentracciones de agua para su posterior uso en regadíos: se estima que las demandas del Jalón son de 342 Hm³/año.
- Regulación producida por los embalses de la cuenca: Provocan una disminución en los caudales circulantes (llenado de embalses) y un aumento de los caudales circulantes (meses de regadío).

6. CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración de las subcuencas como se ha indicado se de modo automático a partir de la opción de RS Expert mediante el algoritmo SCE-UA. El objetivo del algoritmo será encontrar los parámetros óptimos con el fin de maximizar la función objetivo. La calibración se lo realizará de manera individual para cada subcuenca que cuente con una estación de aforo que posibilite su registro, caso contrario se procederá agregarla a la subcuenca adyacente y de este modo contabilizar las aportaciones resultantes en conjunto, lo que se busca con la calibración individualizada es analizar de manera detallada los procesos que tiene lugar en cada subcuenca. Las calibraciones se lo realizan a partir de las series de aportaciones mensuales de cada estación de aforo la cual se detalla en el Anejo 10.1.

Con el propósito de crear un modelo más confiable se ha considerado para las calibraciones y validaciones años posteriores a 1980, con esto de cierto modo aseguramos que los datos observados sean de mayor calidad, disminuyendo así la incertidumbre al momento de la parametrización obteniéndose resultados más fiables.

Antes de iniciar el proceso de calibración, se ha considerado una etapa de calentamiento, generalmente abarcó 3 años, para todas las subcuencas a modelar. Esta constituye una etapa muy importante en la modelación en vista que en este corto periodo de tiempo establecemos las condiciones iniciales de las subcuencas (desconocidas al instante, $t=0$, por el modelo HBV), y con esto se logra que estos no tengan mayor influencia durante la etapa de calibración, logrando así que los datos simulados desde el comienzo de la simulación se ajusten adecuadamente a los datos observados.

A modo general indicar que las cuencas en su gran totalidad fueron calibrados 14 años, periodo 1987-2001 y validadas en 6 años subsiguientes a la calibración (2001-2007), a excepción de aquellas subcuencas cuyas estaciones de aforo no tenían datos registrados para estos períodos de tiempo como son los casos en particular de las dos últimas estaciones de aforo (Chodes y Grisen) previo a la desembocadura del río Jalón en el Ebro.

6.1. FUNCIÓN OBJETIVO

En la actualidad se sabe que las funciones objetivo a groso modo enfatizan los diferentes aspectos y características de un hidrograma y al mismo tiempo establecen de manera aproximada el rendimiento del conjunto de parámetros seleccionado, este efecto demuestra

que uno de los principales problemas en los modelos de precipitación-escorrentía es la presencia de deficiencias estructurales, dado que los modelos no son capaces de reproducir un hidrograma en particular empelando únicamente un conjunto de parámetros. (Yapo et al. Gupta et al., 1998; Boyle et al., 200; Wagener et al., 2001). Por tanto en diferentes ocasiones resulta necesario establecer diferentes conjuntos de parámetros (funciones objetivo) con el fin de minimizar en especial los problemas que se presentan al momento de representar los caudales altos y bajos.

En el presente trabajo para dar inicio a la calibración conociendo los diferentes aspectos y propiedades que caracterizan una función objetivo es necesario establecer una que sea capaz de reproducir adecuadamente los caudales observados, de este modo se estimará la incertidumbre de las series de caudales simuladas establecidas por el modelo empleado respecto a las observadas en las distintas estaciones de aforo empleadas para el registro de caudales de la cuenca del río Jalón. Para el modelo desarrollado en el presente trabajo la función objetivo viene definido por la siguiente ecuación:

$$F_{objetivo} = F1 + F2 + F3 + F4$$

Donde:

- F1: Índice de Nash
- F2: Índice de Nash-in
- F3: Coeficiente de Correlación de Pearson
- F4: Bias Score(Comparación de medias)

La función objetivo tiene como primicia dar un criterio analítico y objetivo la cual nos da la idea general de la calidad del ajuste del modelo, mismo que debe ser complementado con el análisis visual del modelador.

Se toma en este proyecto como límite máximo para el ajuste del modelo un valor igual a 1 (Fobjetivo=1), dando el mismo peso relativo (0.25) a cada indicador.

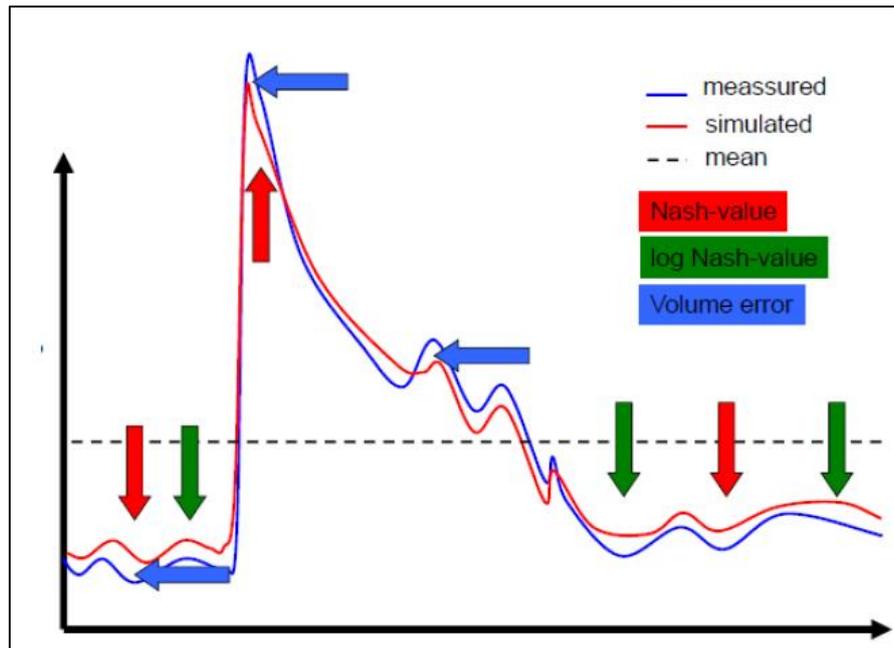


Figura 22. Calibración de un Modelo

Fuente: Finger, 2011

6.2. SISTEMA JILOCA

En este apartado se calibrarán todas las aportaciones de las subcuencas pertenecientes al sistema Jiloca. Dado que la serie de datos disponibles de precipitación y evapotranspiración comprende el período 1950-2008, no se considerará la presencia del embalse de Lechago el cual entro en operación en el año 2012. En la Figura 23 se observa las subcuencas objeto de calibración:

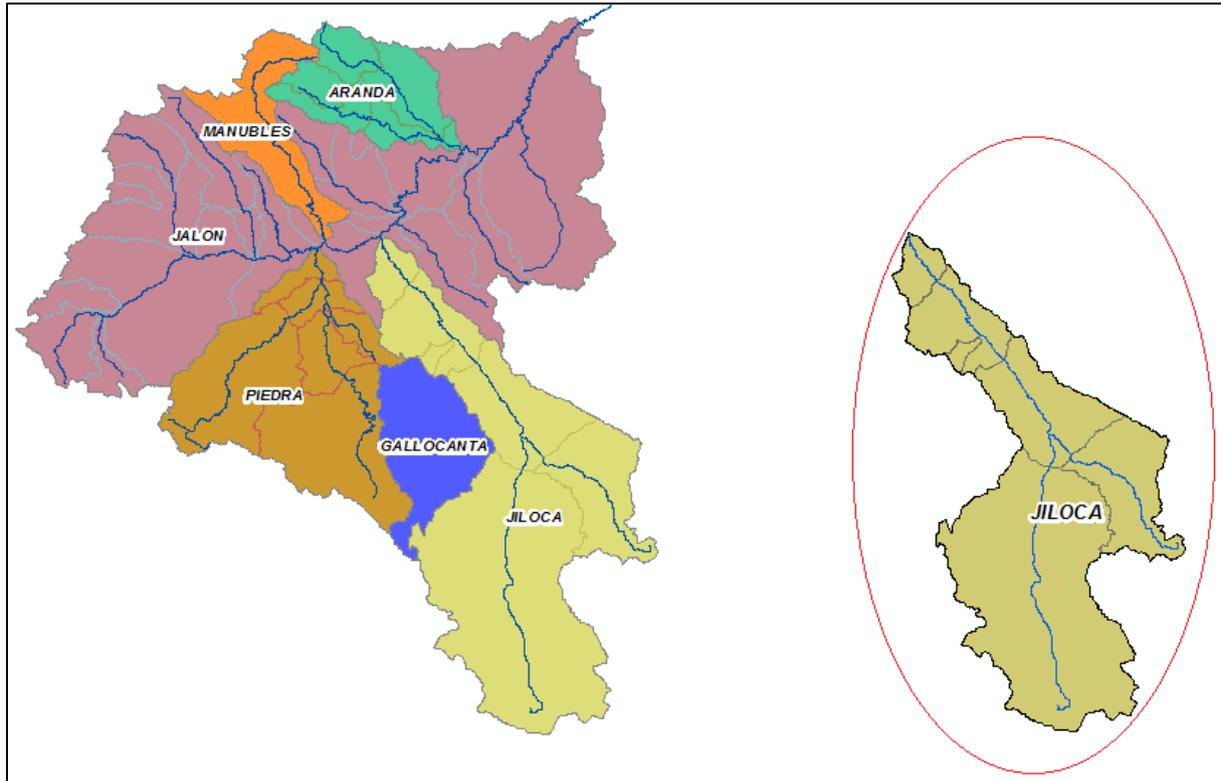


Figura 23. Subcuencas del Sistema Jiloca

6.2.1. Cabecera del Río Pancrudo: Estación de aforo Navarrete del Río (Unidad 912)

Comprende una subcuenca (unidad 912) que abarca 376.5 km² situada en la cabecera del río Pancrudo. Se encuentra situado aguas arriba del embalse Lechago, en la misma las demandas y retornos son prácticamente insignificantes, de tal modo que será considerada como una cuenca natural. La estación de aforo R.O.E.A 9041 será la empleada para la calibración.



Figura 24. Subcuenca del Río Pancrudo

El periodo de calibración y validación se lo ha realizado desde 1986-2007, mientras que el período de calentamiento comprende los años previos a este periodo. A continuación se muestra las condiciones iniciales y parámetros calibrados en el modelo:

Tabla 10. Parámetros empleados en la modelación de unidad 912

Condiciones Iniciales	Valor
HsnowIni (m)	0
WHIni (Adim)	0
HumIni (m)	0.0813
SUini (m)	0.0000
SLIni (m)	0.0175

Subcuenca 912		
Área	376.5	Km ²
Parámetro	Valor	
Beta	4.1922	Adim
FC	0.1847	m
PWP	0.1357	m
SUMax	0.0120	m
Kr	0.3506	1/d
Ku	0.1273	1/d
Kl	0.0024	1/d
Kperc	0.1974	1/d

En la Figura 25 y Figura 26 se muestra el modelo calibrado y validado para la unidad 912, mientras que los resultados de las funciones objetivas de calibración y validación se muestran en la Tabla 11.

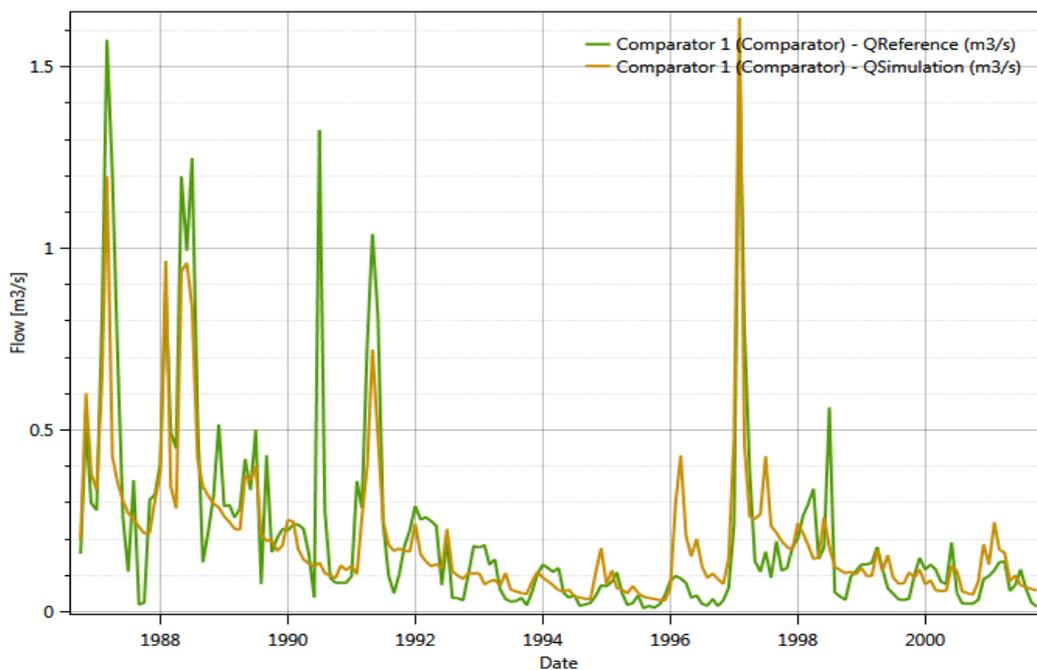


Figura 25. Aportación mensual Cabecera del río Pancrudo (Calibración)

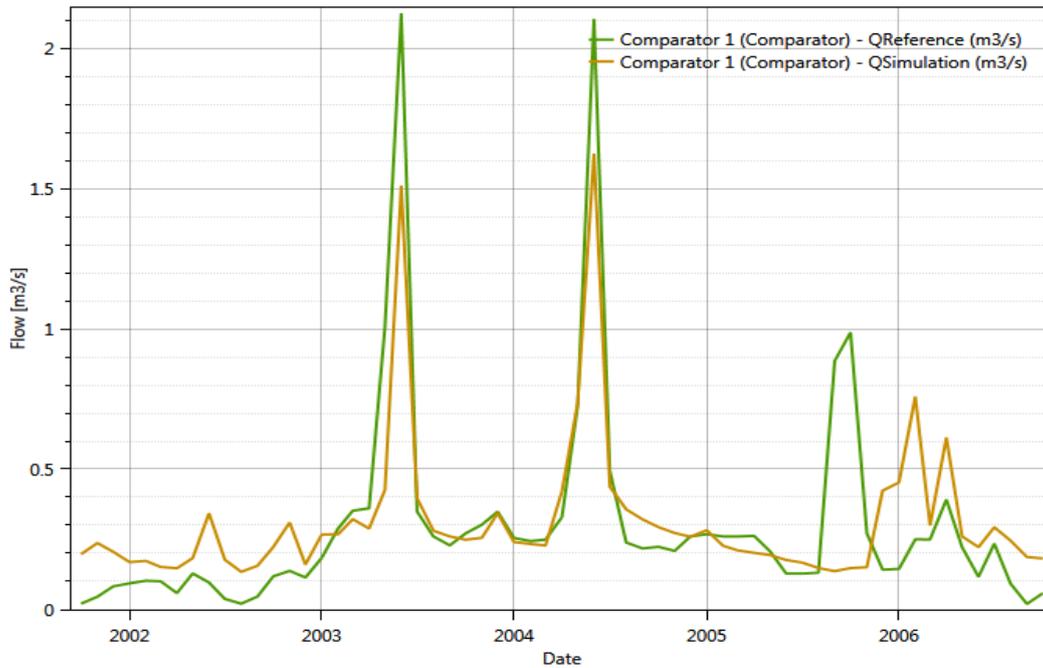


Figura 26. Aportación mensual Cabecera del río Pancrudo (Validación)

Tabla 11. Valores Función Objetivo Unidad 912

CALIBRACIÓN (1986 - 2001)		VALIDACIÓN (2001 - 2006)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.6924	Índice de Nash	0.6646
Nash-In	0.6738	Nash-In	0.3887
Coef. Pearson	0.8395	Coef. Pearson	0.8306
Bias	0.9946	Bias	0.9985
F objetivo	0.8001	F objetivo	0.7206

Como muestran los parámetros resultantes de la calibración, se mantiene el sentido físico de los parámetros en los cuales debe cumplirse que FC sea mayor a PWP, igualmente se mantiene una coherencia entre los coeficiente de flujo en las que se establece que $K_r > K_u > K_l$ y que la suma de K_u , K_l y K_{perc} sea menor a la unidad. El valor de la función objetivo en la calibración y validación con valores de 0.8001 y 0.7206 respectivamente muestran que el ajuste del modelo representa adecuadamente los procesos que tienen lugar en la cuenca. Además las gráficas resultantes del proceso de calibración y validación muestran la buena reproducción de los datos simulados alcanzando en gran medida a los picos altos, que toman importancia

al momento de prevenir fenómenos de avenidas, excepto en el año hidrológico 1990-1991 donde claramente se observa que el modelo ha sido incapaz de predecir este pico importante de caudal, afectando de este modo el valor del índice de Nash el cual se estima a partir de las diferencias existente entre estos picos (simulado respecto al observado).

Se puede indicar en base al análisis desarrollado que el aporte más significativo en esta zona proviene del caudal sub superficial (interflujo), este flujo al estar en dependencia proporcional del SU (Nivel de agua en el tanque superior) indicaría que este valor debería ser elevado sin embargo el valor casi nulo que se tiene en la escorrentía directa que también está en función de SU, da la idea que el Qu (Interflujo) está dependiendo en gran parte de coeficiente de almacenamiento de flujo interno (ku).

6.2.2. Río JILOCA: Estación de aforo Daroca (Unidad 908)

La estación de aforo con la cual se realiza la medición del caudal circulante y su correspondiente calibración responde a la R.O.E.A 9010. Localizada agua abajo de la confluencia del río Pancrudo con el río Jiloca, comprende una cuenca de explotación de 340 km², los cuales en su mayoría son empleados para satisfacer demandas de tipo industrial que no involucran grandes detracciones de agua. En base al plan hidrológico se dice que en este punto se presentan incumplimientos muy habituales, donde en años secos generalmente no se cumple con el 60 % de los días.



Figura 27. Subcuenca del Río Jiloca (Estación de Aforo Daroca)

El período de calibración y validación comprende el período 1986-2007 manteniendo los años hidrológicos precedentes de la EA R.O.E.A 9012. En la Tabla 12 se observa las condiciones iniciales y los parámetros empleados en el modelo:

Tabla 12. Parámetros empleados en la modelación de unidad 908

Condiciones Iniciales	Valor
HsnowIni (m)	0
WHIni (Adim)	0
HumIni (m)	0.0527
SUini (m)	0.0000
SLIni (m)	0.0000

Subcuenca 908		
Área	340	Km ²
Parámetro	Valor	
Beta	3.8754	Adim
FC	0.5493	m
PWP	0.0642	m
SUMax	0.0087	m
Kr	0.3033	1/d
Ku	0.1161	1/d
Kl	0.0437	1/d
Kperc	0.2330	1/d

En la Figura 28 y Figura 29 se muestra el modelo calibrado y validado para la unidad 908, mientras que en la Tabla 13 se recoge los valores de la función objetivo (FO) para los periodos de calibración/validación.

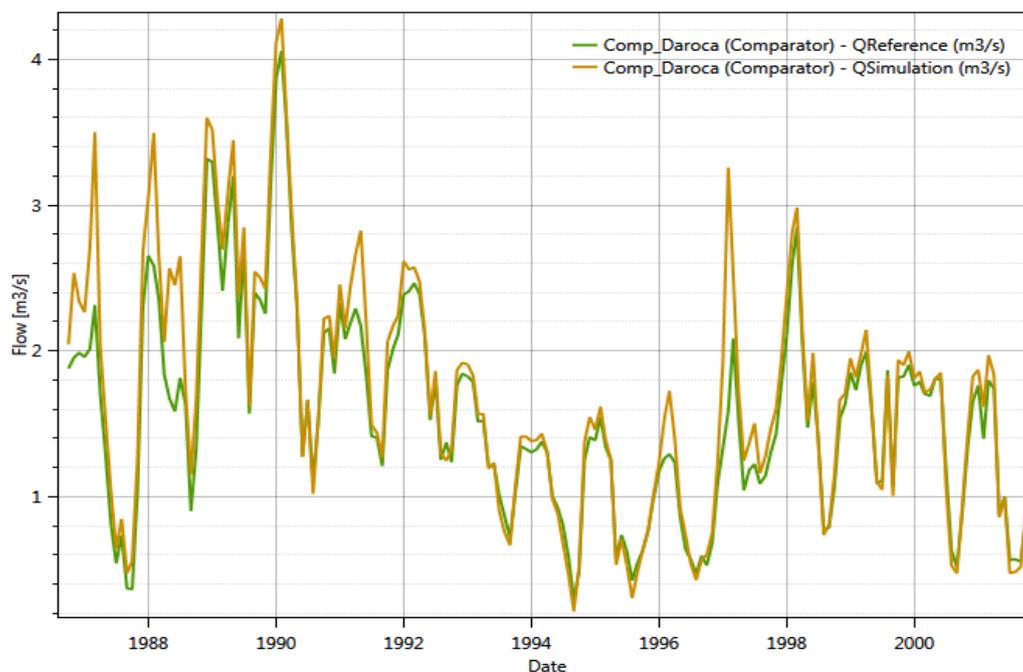


Figura 28. Aportación mensual Río Jiloca: Daroca (Calibración)

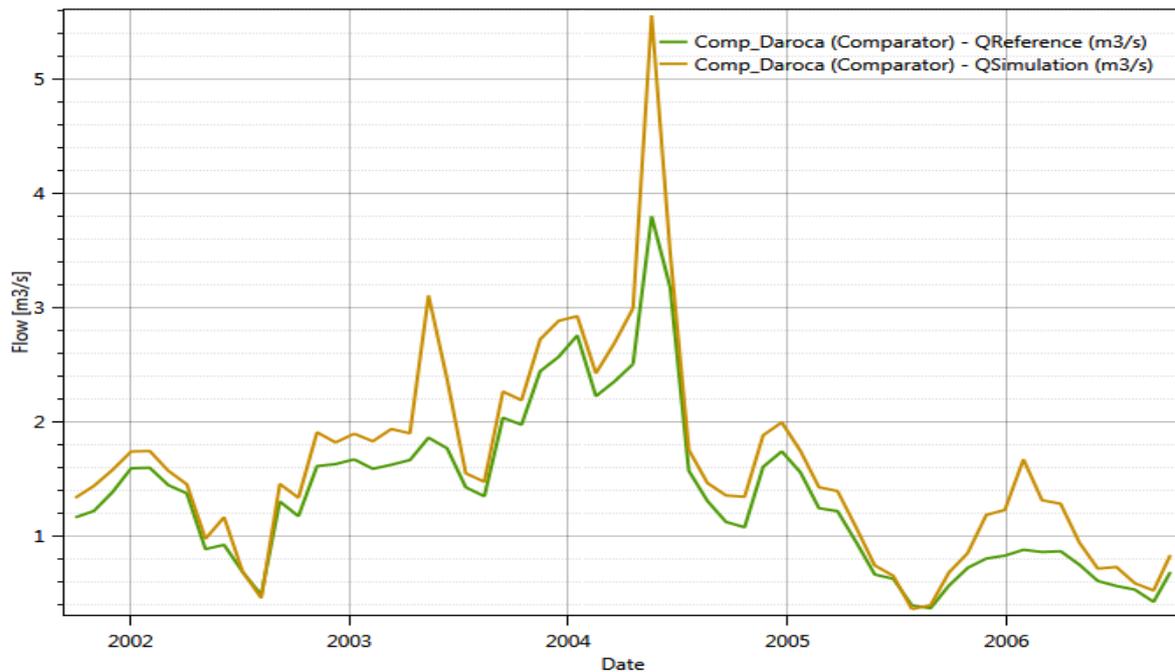


Figura 29. Aportación mensual del río Jiloca: Daroca (Validación)

Tabla 13. Valores Función Objetivo Unidad 908

CALIBRACIÓN (1986 - 2001)		VALIDACIÓN (2001 - 2006)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.8582	Índice de Nash	0.7317
Nash-In	0.9242	Nash-In	0.8576
Coef. Pearson	0.9662	Coef. Pearson	0.9666
Bias	0.9918	Bias	0.9657
F objetivo	0.9351	F objetivo	0.8804

Para la calibración en este punto las aportaciones provenientes de la cabecera del río Jiloca se tomaron a partir de la estación de aforo R.O.E.A 9012 dado que por diferentes aspectos (no contar con las demandas reales detraídas y dado la variabilidad espacial de la cuenca al abarcar una gran superficie, no fue posible estimar correctamente la precipitación y evapotranspiración del medio para la modelación,) no se logró calibrar la unidad 907 de 1500 km², por tanto al tener fijas éstas aportaciones, y siendo anteriormente calibrada las aportaciones de la cabecera del río Pancrudo se procedió a calibrar la unidad 908. Los parámetros resultantes muestran la coherencia de la calibración evidenciándose que el valor

de FC está por encima de PWP y que los coeficiente cumplen con los criterios: $K_r > K_u > K_l$ y que la suma de K_u , K_l y K_{perc} es menor a la unidad. El valor resultante de los indicadores al igual que las gráficas en función del caudal aforado por la estación señalan que tanto el periodo de calibración como la validación en este punto, 0.85 y 0.73 respectivamente, se considera buena siendo demostrando la eficiencia del modelo.

En esta cuenca el respectivo análisis de la simulación indica que el caudal proveniente de la confluencia del río Jiloca (cabecera) y del río Pancrudo (cabecera) constituyen prácticamente todo el caudal que se reporta en la estación de aforo Daroca, respecto a la subcuenca que se ha sido calibrada unidad 908 se observa que el caudal proveniente de la escorrentía directa es prácticamente nulo, el caudal proveniente del flujo base (QI) ligeramente predomina sobre el interflujo (Qu). El valor de QI relativamente alto en este punto depende en especial del nivel de agua en el tanque inferior SL y del coeficiente de almacenamiento del flujo base mientras que en el caso de Qu este viene se determina en gran medida por el valor del coeficiente de almacenamiento de flujo interno (k_u) dado que al ser el caudal de escorrentía directa (Qr) nulo indica que el nivel de agua del tanque superior es prácticamente despreciable.

6.2.3. Río JILOCA: Estación de aforo Morata (Unidad 909,911)

Las unidades involucradas en la calibración de la estación en mención (R.O.E.A 9055) son la 909 y 911 siendo localizada aguas abajo de la estación de aforo R.O.E.A 9010. En este punto del río se concentran las aportaciones de la mayor parte del sistema Jiloca, cuyo cauce más adelante desemboca en el río Jalón el principal sistema de explotación en estudio, comprendiendo una extensión de 2502 km². Las demandas principales que atiende son de tipo agrario e industrial y a la vez es empleado para el abastecimiento de las municipalidades de Daroca, Murero y Morata de Jiloca. En este punto según el plan hidrológico los incumplimientos son menores que la estación Daroca dado que aquí se presentan probablemente los retornos provenientes del riego.



Figura 30. Subcuenca del Río Jiloca (Estación de Aforo Morata)

El período de calibración y validación comprende el período 1986-2007 manteniendo los años hidrológicos precedentes de la EA R.O.E.A 9010 lo que nos indicará una concordancia entre las series simuladas por el modelo. En la Tabla 14 se detallan las condiciones iniciales y los parámetros empleados en la modelación:

Tabla 14. Parámetros empleados en la modelación de las unidades 909,911

Condiciones Iniciales	Valor
HsnowIni (m)	0
WHIni (Adim)	0
HumIni (m)	0.0174
SUini (m)	0.0001
SLIni (m)	0.0001

Subcuenca 909,911		
Área	300	Km ²
Parámetro	Valor	
Beta	1.9933	Adim
FC	0.4411	m
PWP	0.3070	m
SUMax	0.0155	m
Kr	0.2700	1/d
Ku	0.2275	1/d
Kl	0.1269	1/d
Kperc	0.4047	1/d

En la Figura 31 y Figura 32 se muestra el modelo calibrado y validado para la subcuencas aportantes en la estación Daroca. En la Tabla 15 por otro lado se observa los valores de la FO para los periodos de calibración/validación.

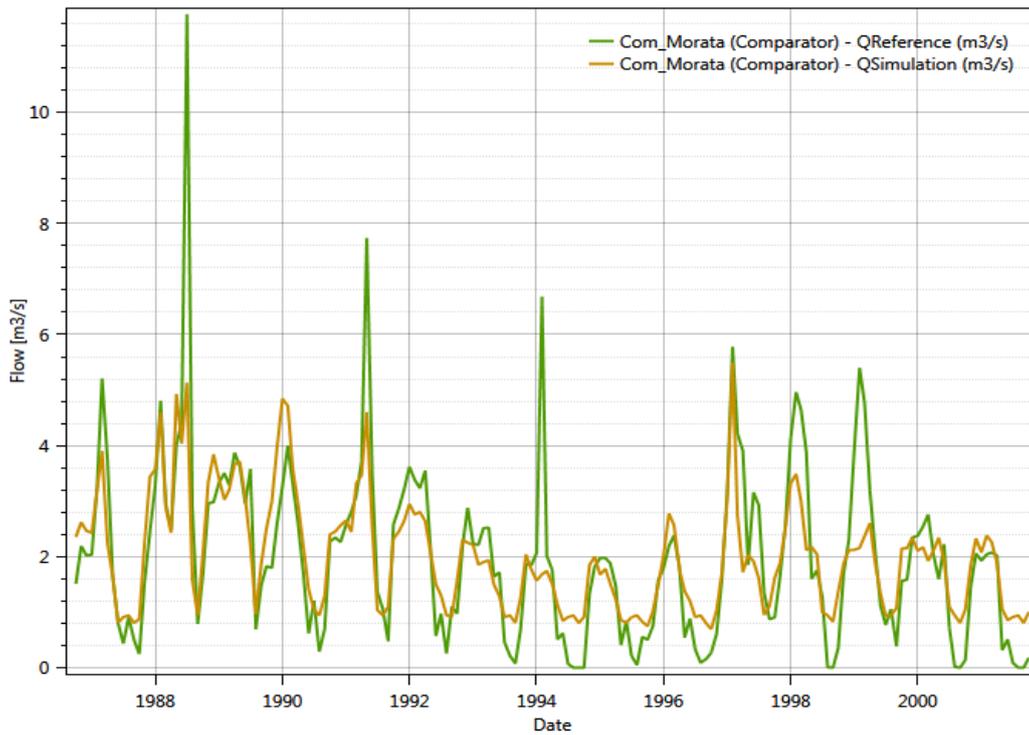


Figura 31. Aportación mensual Río Jiloca: Morata (Calibración)

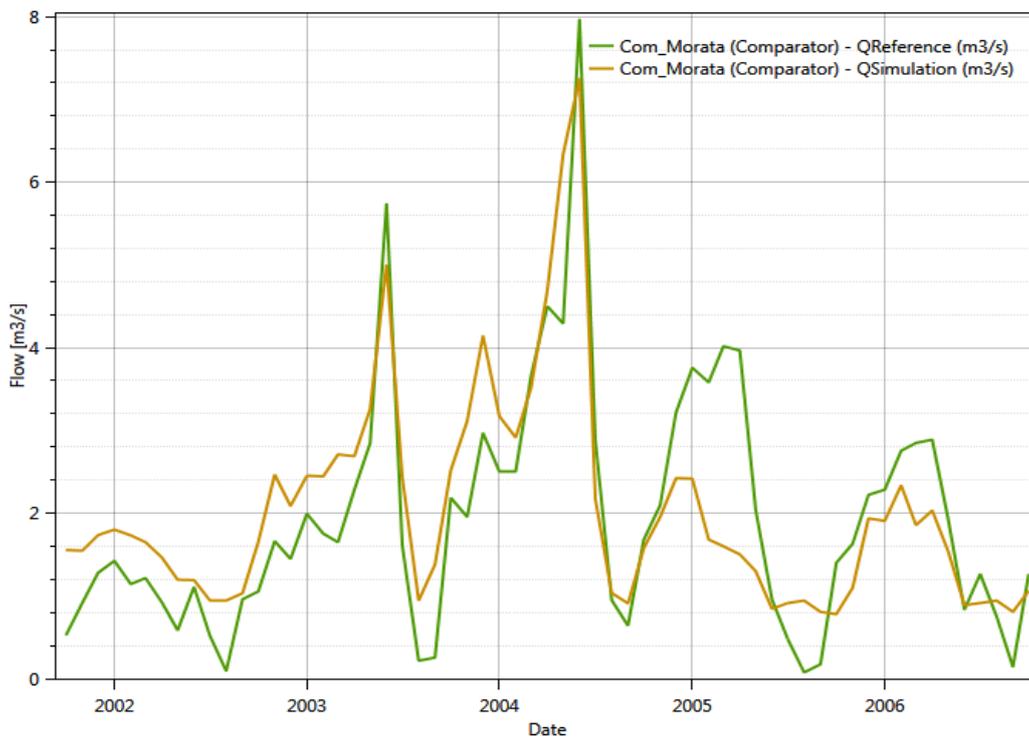


Figura 32. Aportación mensual del río Jiloca: Morata (Validación)

Tabla 15. Valores Función Objetivo EA DAROCA

CALIBRACIÓN (1986 - 2001)		VALIDACIÓN (2001 - 2006)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.6292	Índice de Nash	0.6702
Nash-In	0.1215	Nash-In	0.5068
Coef. Pearson	0.8126	Coef. Pearson	0.8232
Bias	0.9999	Bias	0.9976
F objetivo	0.6408	F objetivo	0.7495

Los resultados obtenidos de la calibración muestran que mientras más aguas abajo nos encontremos en este caso del río Jiloca el modelo será más sensible dado que al aumentar las detracciones de agua en el sector se tiene mayor incertidumbre al no contar con el sistema de gestión real de la cuenca, es por esto que respecto a la estación precedente R.O.E.A 9010 se ve claramente como el valor de la función objetivo ha disminuido en forma considerable, sin embargo el modelo se lo puede calificar como aceptable dado que la reproducción del modelo respecto a los datos aforados por la estación como lo muestran las figuras de calibración y validación no se alejan de la realidad de la cuenca, alcanzando en gran medida los picos altos que representan caudales importantes a tener en cuenta en la gestión, el problema que se presentó fue al momento de modelar los caudales bajos evidenciándose lo comentado en los valores de Nash-in (0.12 y 0.50) el cual da una idea de cuán efectivamente el modelo está reproduciendo los caudales observados de carácter bajo. En lo que respecta a los valores de los parámetros en los cuales hay que enfatizar al momento de su calibración, se tienen datos acordes a los esperados donde como lo dicho puntos atrás debe cumplirse que $FC > PWP$ y $Kr > Ku > Kl$ y que la suma de Ku, Kl y $Kperc$ sea menor a la unidad.

EL estudio realizado sobre las subcuencas (unidad 909 y 911) puso en evidencia una vez más el predominio del flujo base (Ql) y del flujo sub superficial (Qu) como principales aportantes en la cuenca del río Jiloca, los análisis a través del sistema indicaron que el flujo de caudal por escorrentía directa prácticamente es inexistente, con ello se puede pensar que la capacidad de recarga de las masas de agua subterránea en el sector son de consideración y que existen varias zonas donde la permeabilidad es elevada, es por tal motivo que gran parte de las demandas son suministradas a través de este importante recurso.

6.3. SISTEMA PIEDRA

En este apartado se calibrarán todas las aportaciones de las subcuencas pertenecientes al sistema Piedra donde destacan los ríos: Piedra, Mesa y Ortiz cuyos aportes constituyen los volúmenes de entrada al embalse de la Tranquera puesto en funcionamiento en el año 1962 con el fin de gestionar los regadíos del bajo y medio Jalón, abastecer principalmente a la localidad de Calatayud, y al mismo tiempo cumplir el rol de controlar las avenidas generadas en el río Piedra.

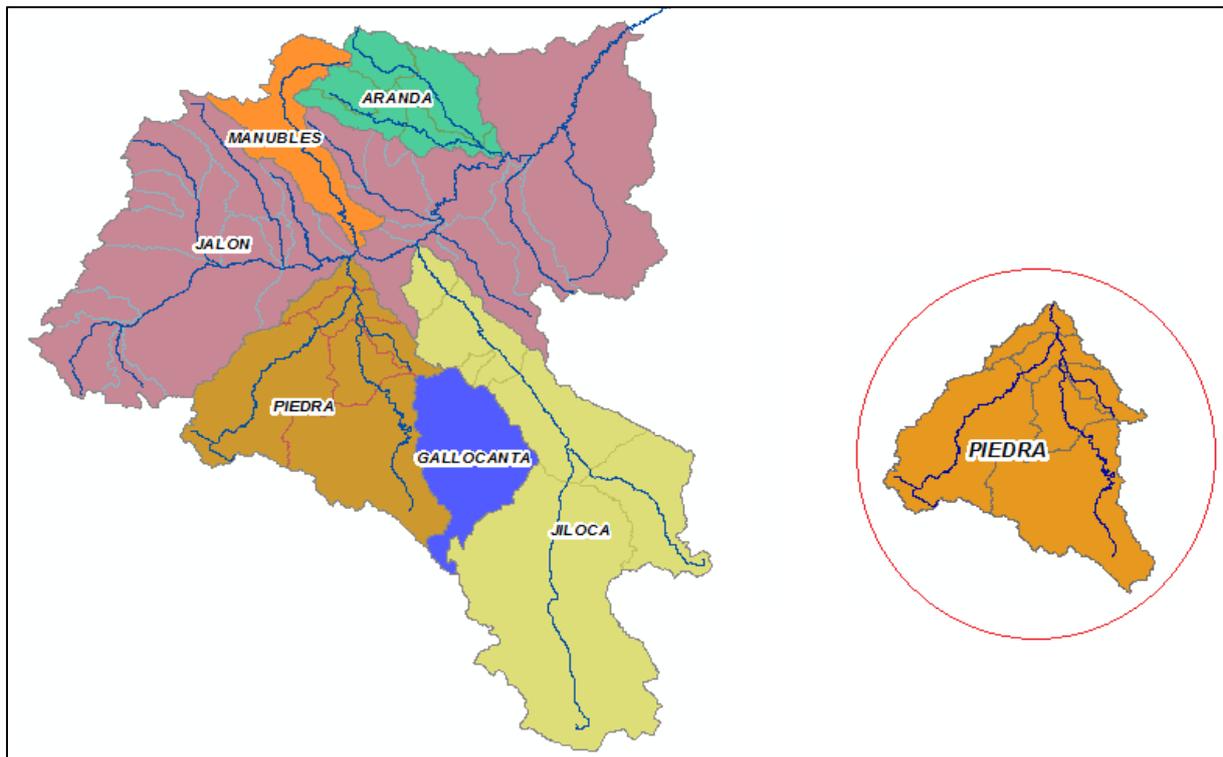


Figura 33. Subcuencas del Sistema Piedra

6.3.1. Cabecera del Río MESA: Estación de aforo Jaraba (Unidad 905)

La estación Jaraba (R.O.E.A 9056) será la empleada para la calibración del río Mesa el cual posee un caudal muy constante debido a la regulación que ejercen las calizas en la cabecera del río. Este sistema de explotación se encuentra sometido a extracciones significativas de agua principalmente empleadas para regadío y aprovechamiento hidroeléctrico. La cuenca objeto de estudio abarca una superficie de 537 km² y su régimen es considerado de tipo natural.



Figura 34. Subcuenca del Río Mesa

El periodo de calibración y validación se lo ha realizado en el período de 1986-2007, para esta subcuenca se han considerado tanto las demandas agrarias, industriales como los retornos del riego. A continuación se muestra las condiciones iniciales y parámetros que fueron utilizados en la creación del modelo:

Tabla 16. Parámetros empleados en la modelación de unidad 905

Condiciones Iniciales	Valor	Subcuenca 905	
HsnowIni (m)	0	Área	537 Km ²
WHIni (Adim)	0	Parámetro	Valor
HumIni (m)	0.0493	Beta	1.0932 Adim
SUini (m)	0.0018	FC	0.3418 m
SLini (m)	0.0690	PWP	0.1947 m
		SUMax	0.0111 m
		Kr	0.2161 1/d
		Ku	0.0103 1/d
		Kl	0.0038 1/d
		Kperc	0.0707 1/d

A continuación se muestra los caudales reproducidos por el modelo en la etapa de calibración (Figura 35) y validación (Figura 36), la sensibilidad del modelo se lo estima a partir del valor de la función objetivo que se detalla en la Tabla 17.

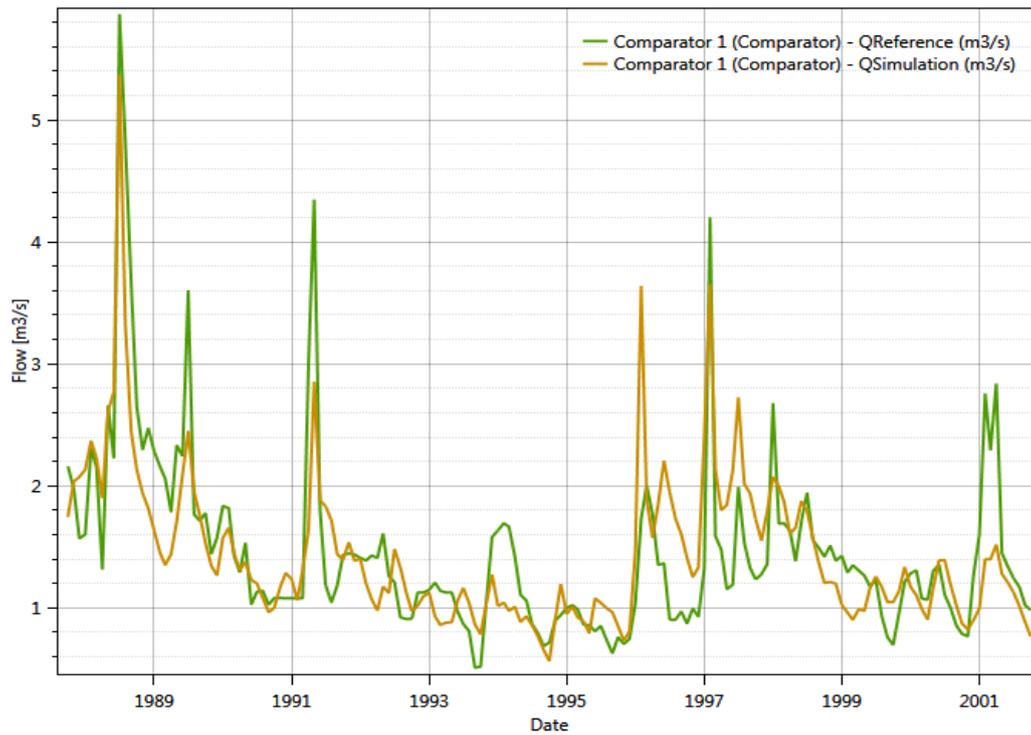


Figura 35. Aportación mensual cabecera del río Mesa (Calibración)

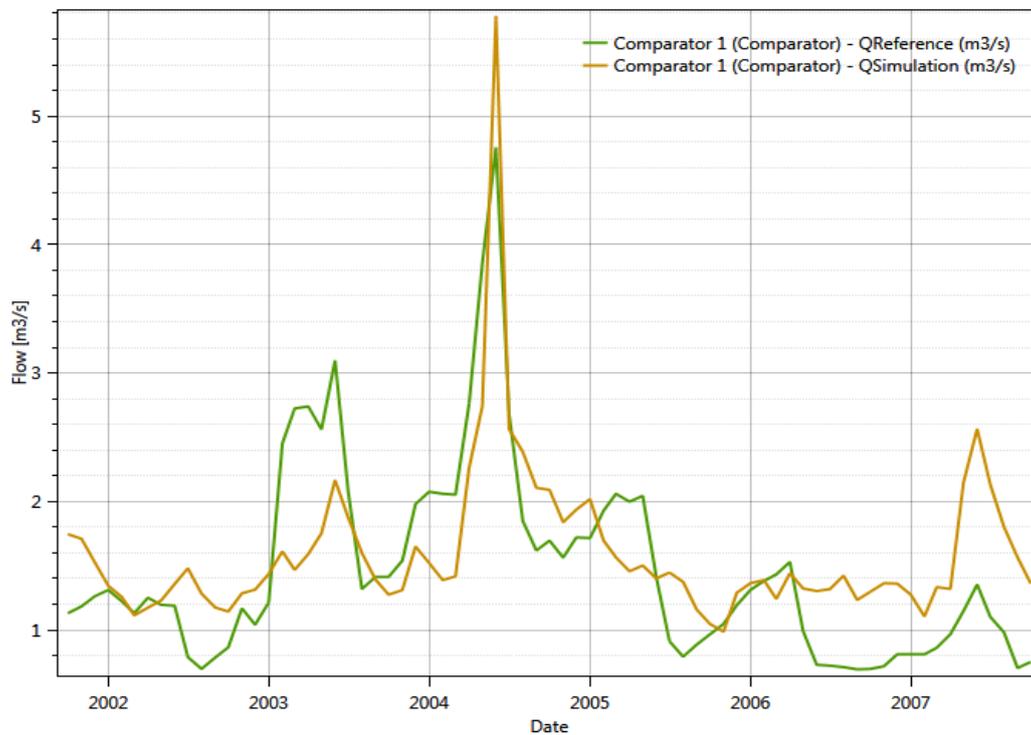


Figura 36. Aportación mensual cabecera del río Mesa (Validación)

Tabla 17. Valores Función Objetivo Unidad 905

CALIBRACIÓN (1987 - 2001)		VALIDACIÓN (2001 - 2006)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.6275	Índice de Nash	0.5219
Nash-In	0.5949	Nash-In	0.3694
Coef. Pearson	0.7939	Coef. Pearson	0.7441
Bias	0.999	Bias	0.9927
F objetivo	0.7539	F objetivo	0.6570

En vista a que las demandas agrarias del sector son importantes del orden de 6 Hm³/año, a pesar que en un inicio la subcuenca se considera de carácter natural la alteración del régimen en este punto es evidente, y dado que no trabajamos con un modelo de gestión propiamente dicho (Simges) los datos conllevan cierta incertidumbre que ocasionan que la reproducción del modelo no sea la más adecuada sobre todo al momento de validar el modelo (FO=0.65) donde se ve que los datos simulados no se ajustan adecuadamente a los datos donde el caudal es mínimo a su vez en ciertos puntos los picos altos al no adaptarse correctamente producen ciertos errores susceptibles que generan como se observa en la Tabla 17 que los valores de la función objetivo (calibración y validación) no correspondan a valores óptimos al momento de reproducir los caudales aportantes de entrada al embalse de la Tranquera. En cuanto a la concordancia de los parámetros físicos se verifica que cumplen con las especificaciones anteriormente establecidas.

En esta subcuenca (unidad 905) ya se evidencia un aporte de escorrentía directa (Qr), incluso superior al del interflujo (Qu), en ciertos períodos de tiempo Qr es relativamente bajo sin embargo en otros puntos de la serie se observan picos de caudal considerables, el aporte más importante en la cuenca se deriva del flujo base (Ql). La presencia de Qr indica que el los valores de Su (nivel de agua en el tanque superior) se encuentran por encima de la capacidad del tanque lo que da paso a la generación y propagación de la escorrentía a través de la superficie.

6.3.2. Cabecera del Río PIEDRA: Estación de aforo Nuévalos (Unidad 901,902)

El río Piedra presenta un caudal muy constante al igual que el Mesa dado la regulación que ejercen las calizas localizadas en su cabecera, según el Plan Hidrológico tiene un cumplimiento del 100% en lo que tiene que ver con el caudal ecológico. Para aforar el caudal circulante se cuenta con la estación Nuévalos (R.O.E.A 9008) los cuales recoge el agua de las unidades 901 y 902 abarcando una superficie de 732 km². No ha sido posible una calibración por separado de las subcuencas debido a la inexistencia de una estación de aforo que registre únicamente las aportaciones resultantes de la unidad 901.



Figura 37. Subcuencas del Río Piedra

El periodo comprendido entre 1984-2000 ha sido empleado para objeto de calibración/validación, para estas 2 subcuencas (unidades 901 y 902) se han considerado tanto las demandas agrarias, industriales (3.2 Hm³) como los retornos del riego (0.89 Hm³). En la Tabla 18 que se muestra a continuación se detalla las condiciones iniciales y los parámetros que fueron empleados en el desarrollo del modelo:

Tabla 18. Parámetros empleados en la modelación de unidad (901,902)

Condiciones Iniciales	Valor	Subcuenca 901,902	
HsnowIni (m)	0	Área	732.9 Km ²
WHIni (Adim)	0	Parámetro	Valor
HumIni (m)	0.0000	Beta	2.7004 Adim
SUini (m)	0.0000	FC	0.1340 m
SLIni (m)	0.0969	PWP	0.1333 m
		SUMax	0.0128 m
		Kr	0.2559 1/d
		Ku	0.0103 1/d
		Kl	0.0014 1/d
		Kperc	0.0865 1/d

Las aportaciones resultantes de las subcuencas (unidad 901 y 902) se observan en la Figura 38 y Figura 39 correspondientes a la etapa de calibración y validación respectivamente. Los valores resultantes de la FO se detallan en la *Tabla 19* .

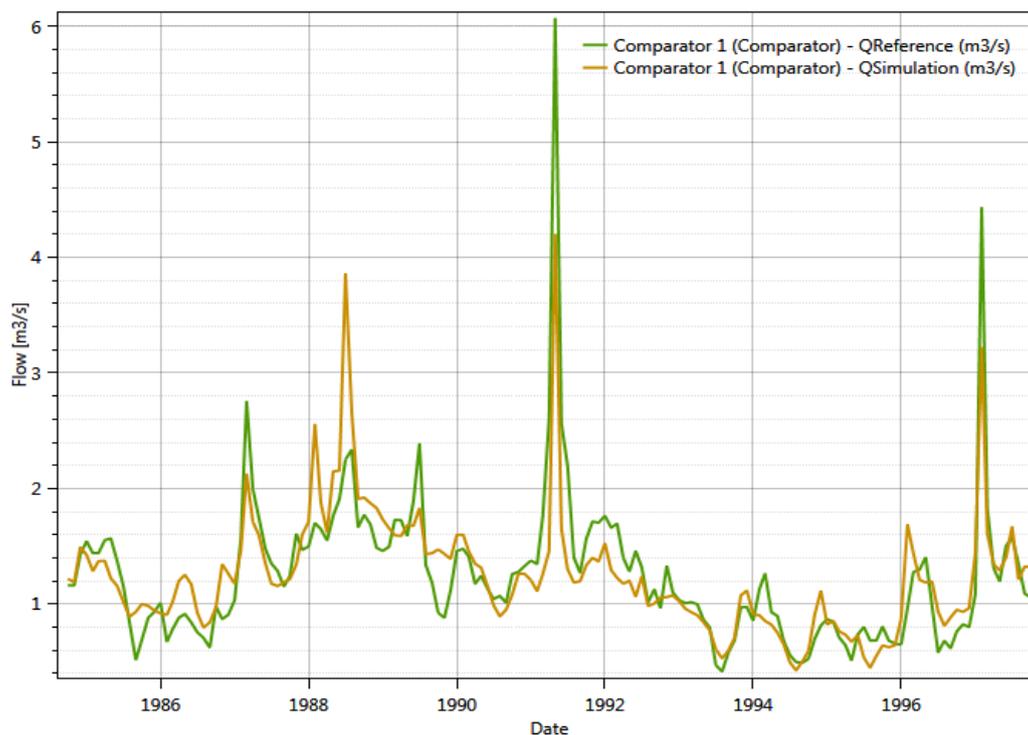


Figura 38. Aportación mensual cabecera del río Piedra (Calibración)

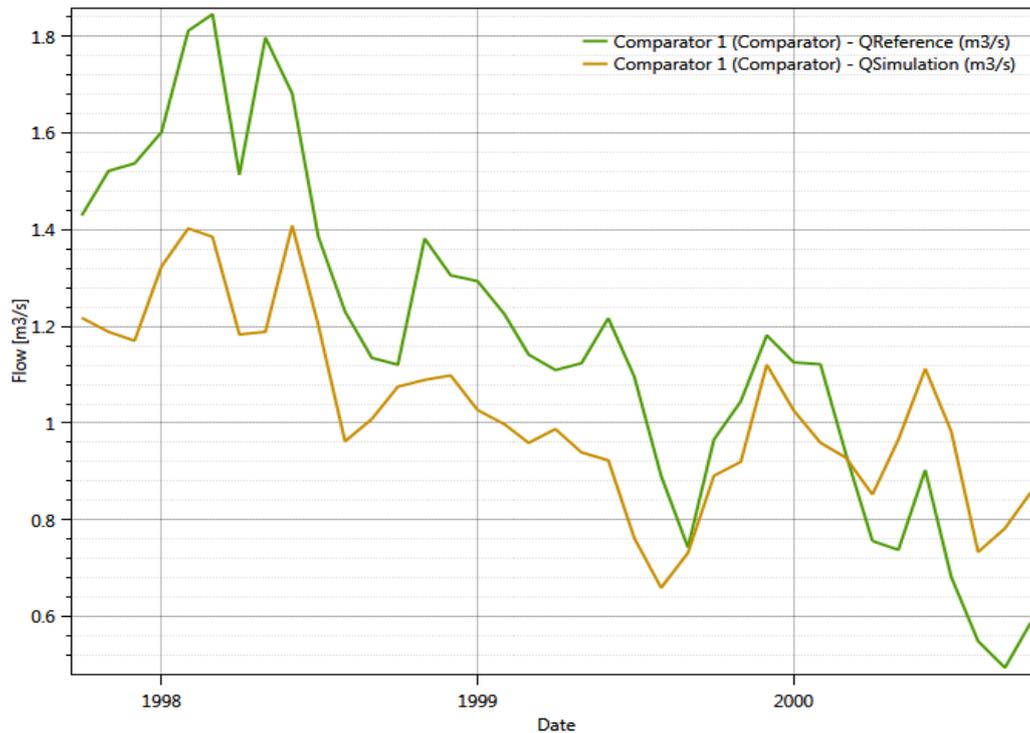


Figura 39. Aportación mensual cabecera del río Piedra:(Validación)

Tabla 19. Valores Función Objetivo Unidad 901,902

CALIBRACIÓN (1984 - 1997)		VALIDACIÓN (1997 - 2000)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.7170	Índice de Nash	0.4607
Nash-In	0.7527	Nash-In	0.5039
Coef. Pearson	0.8474	Coef. Pearson	0.8349
Bias	0.9999	Bias	0.9827
F objetivo	0.8293	F objetivo	0.7005

En cuanto a la calibración del modelo se obtienen valores de la función objetivo que pueden ser calificados como buenos, la FO se encuentra por encima de 0.8 indicando el buen ajuste de los datos simulados con los simulados, esto se corrobora con la Figura 38 donde se ve que la reproducción del modelo en contraste con la realidad no varía significativamente, sin embargo al momento de validarlo se presentan problemas al momento de alcanzar los picos altos, los datos simulados toman la forma correcta de la fluctuación de caudales sin alcanzar los picos en mención, disminuyendo de esta manera el valor de la FO, en este caso el error o incertidumbre mostrado por el modelo se lo podría atribuir a los datos de precipitación y evapotranspiración obtenidos a partir de Spain 02. A partir del año 1997 se puede apreciar

inconsistencias de los datos observados respecto a los simulados, en el lapso 1997-2000 el caudal simulado no alcanza los valores esperados y esto se puede atribuir a un déficit de precipitación esto quiere decir que hubo un probable descenso de lluvias respecto a los años precedentes o a su vez se puede decir que los valores correspondientes a la evapotranspiración real fue muy elevada. Fenómeno contrario se observa en el período 2000-2007 donde se presentaron caudales simulados muy por encima de los observados, variando de esta manera considerablemente las características que se presentaba la cuenca en el período en el cual se realizó la calibración, en este caso podría suceder lo contrario al caso anterior, es decir valores altos de precipitación o valores relativamente bajos de evapotranspiración, por esta razón para la validación se han tomado únicamente los 3 últimos años a partir de los cuales se empezaron a observar estas diferencias marcadas con el fin de mostrar cómo puede afectar al modelo la incertidumbre de los datos de entrada o un cambio en los usos del suelo. En cuanto a los parámetros (FCP, PWP y coeficientes) obtenidos en el modelo se cumple con los criterios establecidos siendo así idóneos para la modelación.

Como el caso de la subcuenca del río Mesa en estas subcuencas (901 y 902) el caudal base (QI) resulta ser el más representativo, encontrándose muy por encima del interflujo y de la escorrentía directa generada en la cuenca. Respecto a la Qr se observan 3 picos considerables (1988, 1991 y 1997) manteniéndose el resto del periodo en valores bajos a lo largo de la serie hidrológica.

6.3.3. Cabecera del Río ORTIZ: Estación de aforo Tranquera (Unidad 906)

El río Ortiz se asienta sobre un sustrato que se caracteriza por su gran permeabilidad lo que genera que su régimen de caudales sea irregular y que existan períodos donde los caudales registrados son muy bajos. Estos caudales son controlados por la estación de aforo R.O.E.A 9129 la cual a su vez será la empleada para la calibración de los caudales circulantes por la unidad 906 que tiene una superficie de 87 km². Las principales demandas que atiende este sistema son de tipo industrial y agrario.



Figura 40. Subcuenca del Río Ortiz

Las condiciones iniciales determinadas para la subcuenca del río Ortiz y los parámetros característicos necesarios para la modelación se lo detalla en la Tabla 20, para la simulación la calibración y validación se lo ha realizado en el período 1987-2007, en esta se han considerado tanto las demandas agrarias como urbanas (0.58 Hm³) .

Tabla 20. Parámetros empleados en la modelación de unidad (906)

Condiciones Iniciales	Valor	Subcuenca 906	
HsnowIni (m)	0	Área	87 Km ²
WHIni (Adim)	0	Parámetro	Valor
HumIni (m)	0.0776	Beta	1.0143 Adim
SUini (m)	0.0005	FC	0.3202 m
SLIni (m)	0.0126	PWP	0.1149 m
		SUMax	0.0011 m
		Kr	0.2539 1/d
		Ku	0.0101 1/d
		Kl	0.0043 1/d
		Kperc	0.3926 1/d

El valor de la FO en sus dos etapas de modelación (calibración y validación) se verifica en la Tabla 21. La Figura 41 y Figura 42 muestra la reproducción de los datos simulados frente a los observados, calibración y validación respectivamente.

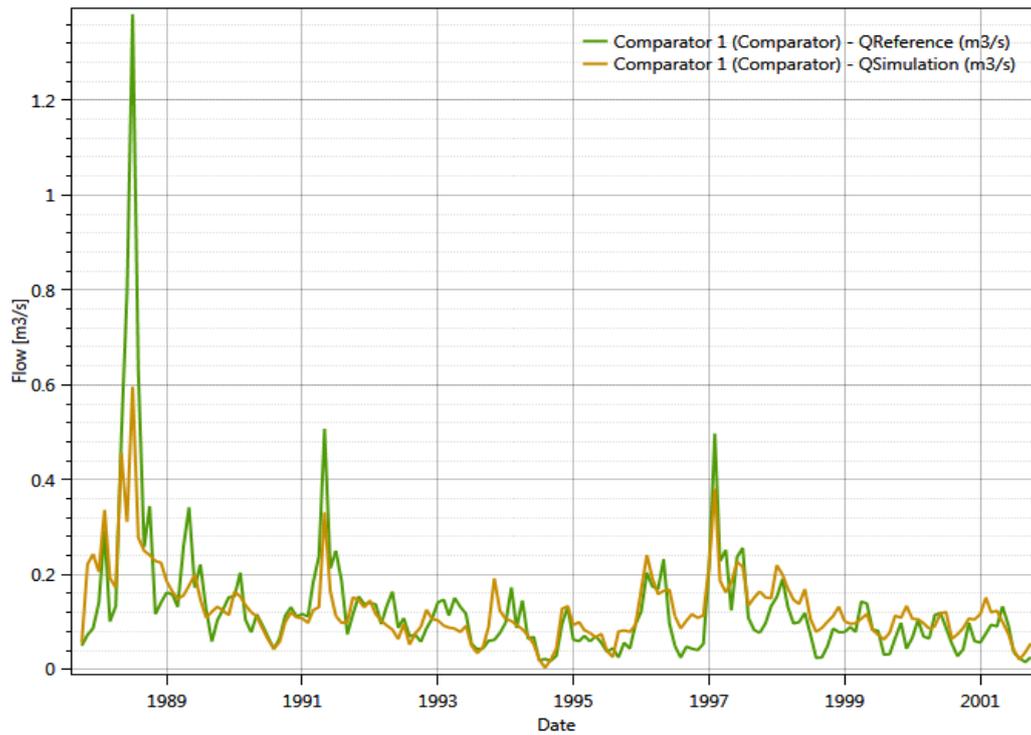


Figura 41. Aportación mensual cabecera del río Ortiz (Calibración)

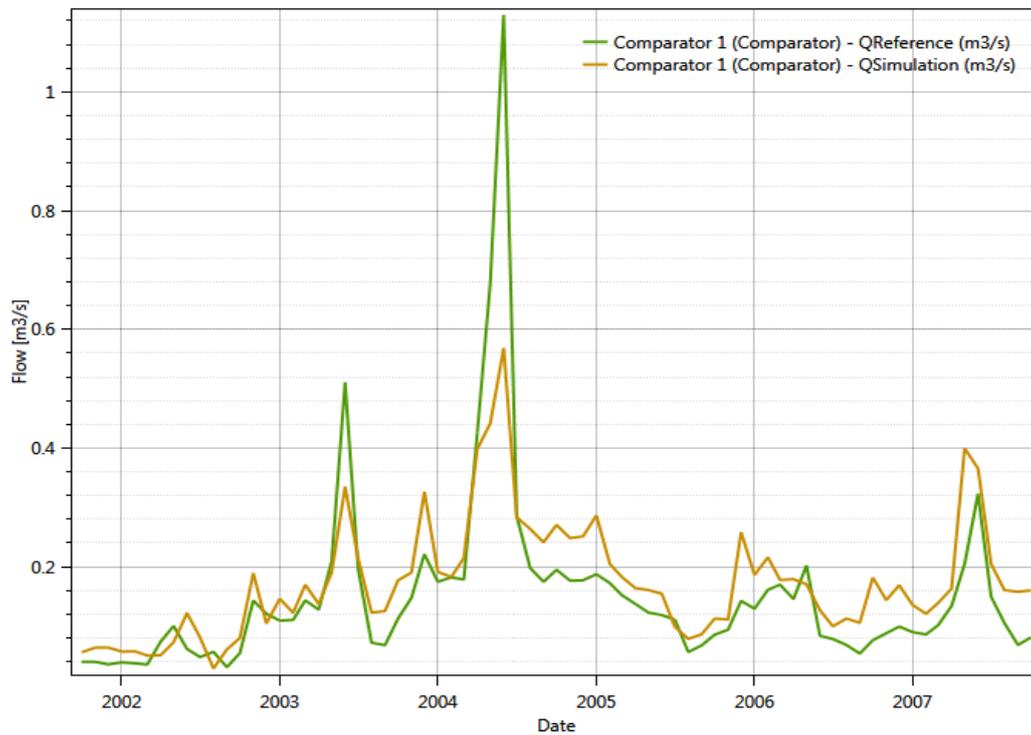


Figura 42. Aportación mensual cabecera del río Ortiz:(Validación)

Tabla 21. Valores Función Objetivo Unidad 906

CALIBRACIÓN (1987 - 2001)		VALIDACIÓN (2001 - 2007)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.5853	Índice de Nash	0.6598
Nash-In	0.6056	Nash-In	0.6969
Coef. Pearson	0.8163	Coef. Pearson	0.8528
Bias	0.9999	Bias	0.9775
F objetivo	0.7518	F objetivo	0.7968

En este punto, que corresponde a otro control de caudales de entrada al embalse la Tranquera los datos calibrados dan lugar a valores de la función objetivo que pueden considerarse buenos, sin embargo se evidencia en la etapa de calibración que el modelo no se ajusta adecuadamente a los picos altos sobre todo en el año 1988, donde probablemente se generaron en la cuenca caudales no acostumbrados causando que la reproducción en este punto no sea lo más adecuado afectando considerablemente el valor del índice de Nash, se observan una diferencia del orden de 1 Hm³. Un fenómeno parecido se ocurre en la etapa de validación, el modelo simulado reproduce adecuadamente los datos observados en lo que se refiere a la forma sin embargo no alcanza los picos altos en varios períodos, en el año hidrológico 2004-2005 se observa la mayor diferencia (0.9 Hm³ aproximadamente). En cuanto a los valores de los parámetros del modelo (FC, PWP, coeficientes) estos cumplen con las especificaciones que deben darse para mantener la coherencia física de los procesos hidrológicos.

El flujo dominante, típico del sistema Piedra, corresponde al flujo base (Ql), evidenciándose a la vez varios picos de consideración que son resultantes de la escorrentía directa (Qr) que se genera, lo que indica que el nivel de agua en el tanque superior (SU) superaron la capacidad máxima del tanque. Respecto al interflujo (Qu) se observan aportaciones 0.02 m³/s siendo el menos representativo de la cuenca, lo que indica que los niveles de agua del tanque inferior (SL) alcanzan valores más altos en comparación de los valores observados en el tanque superior (SU).

6.4. SISTEMA MANUBLES

Este sistema comprende únicamente la unidad 816, en esta se concentra la aportación del río Manubles el cual desemboca aguas abajo en el río Jalón. (Figura 43)

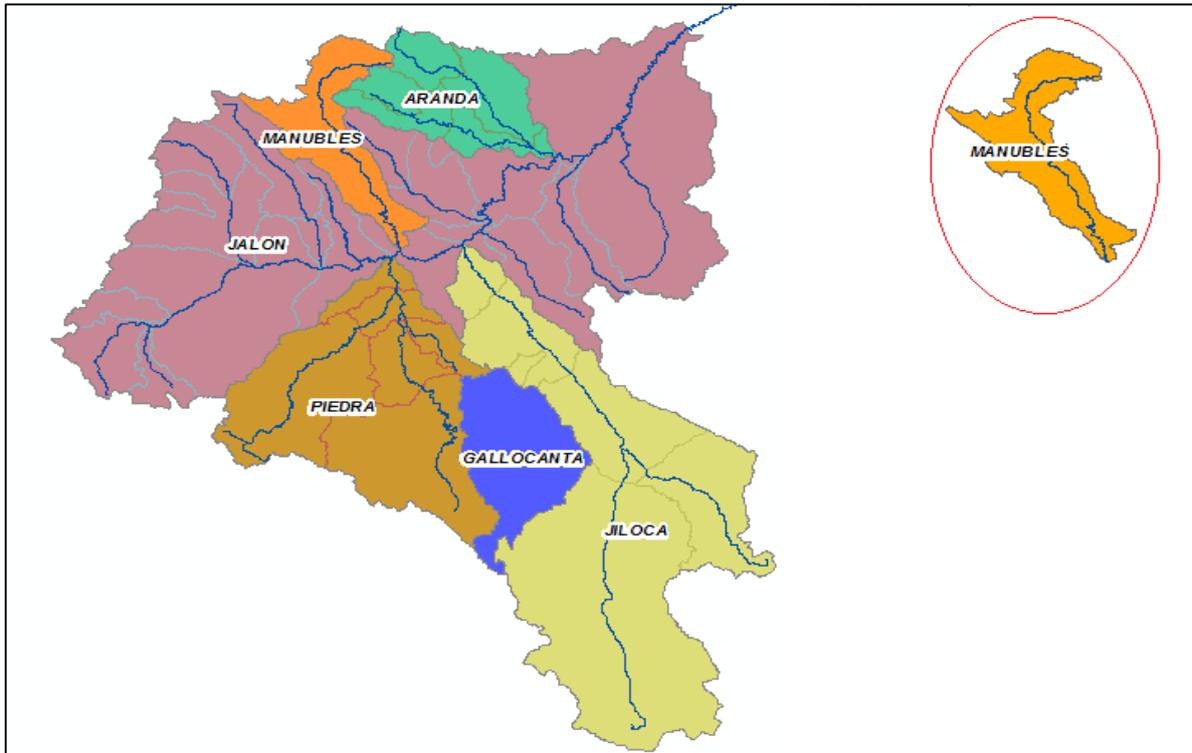


Figura 43. Subcuencas del Sistema Manubles

6.4.1. Cabecera del Río MANUBLES: Estación de aforo Ateca (Unidad 816)

El río Manubles constituye uno de los principales afluentes por el margen izquierdo del río Jalón, en ciertos puntos de su trayecto tiene lugar avenidas de gran importancia en casos de tormenta. Para el control de las aportaciones de la unidad 816 con una superficie de 446 km² se tienen 3 estaciones de aforo sin embargo para la calibración de las mismas en el presente estudio se empleará únicamente la R.O.E.A 9184 dado que las dos restantes no tienen los datos suficientes, su construcción data del 2004. Las demandas agrarias en este sector son las que principalmente se atienden en este sistema.

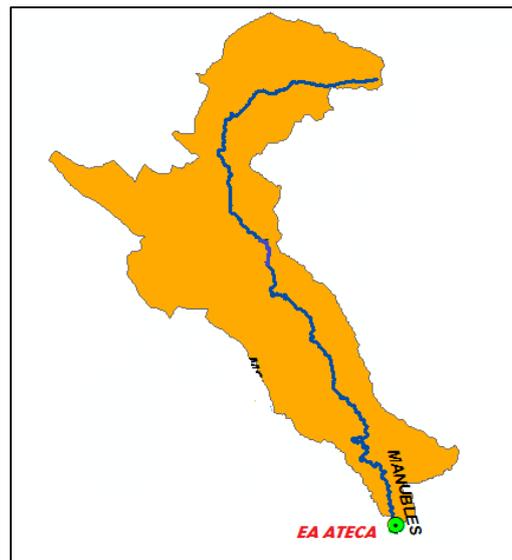


Figura 44. Subcuenca del Río Manubles

La calibración y validación del modelo desarrollado se lo ha realizado en el período 1989-2007, en él se han considerado las demandas de origen urbano y agrario siendo del orden de 12.01 Hm³. En la Tabla 22 se detallan las condiciones iniciales y parámetros empleados en la modelación.

Tabla 22. Parámetros empleados en la modelación de unidad 816

Condiciones Iniciales	Valor	Subcuenca 816	
HsnowIni (m)	0	Área	445.2 Km ²
WHIni (Adim)	0	Parámetro	Valor
HumIni (m)	0.0000	Beta	1.2757 Adim
SUini (m)	0.0001	FC	0.2655 m
SLIni (m)	0.0018	PWP	0.1159 m
		SUMax	0.0325 m
		Kr	0.3291 1/d
		Ku	0.1277 1/d
		Kl	0.0110 1/d
		Kperc	0.0996 1/d

En la Figura 45 y la Figura 46 muestran la reproducción de los datos del modelo en la etapa de calibración y validación respectivamente, mientras que los valores de la FO se detallan en la Tabla 23.

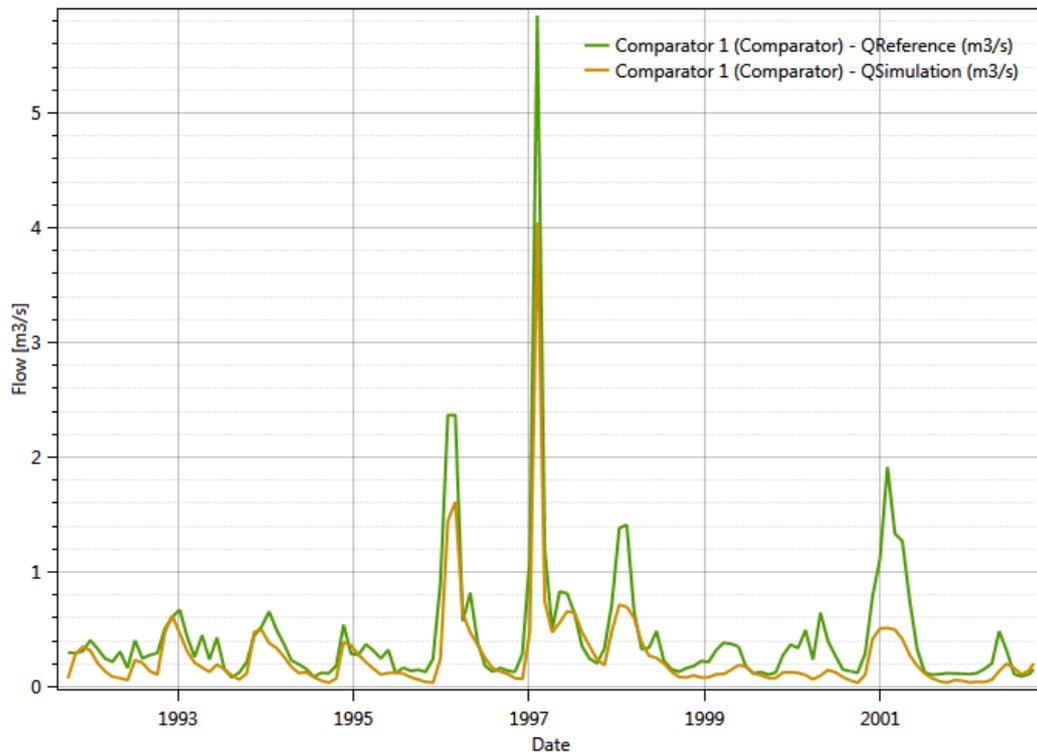


Figura 45. Aportación mensual cabecera del río Manubles (Calibración)

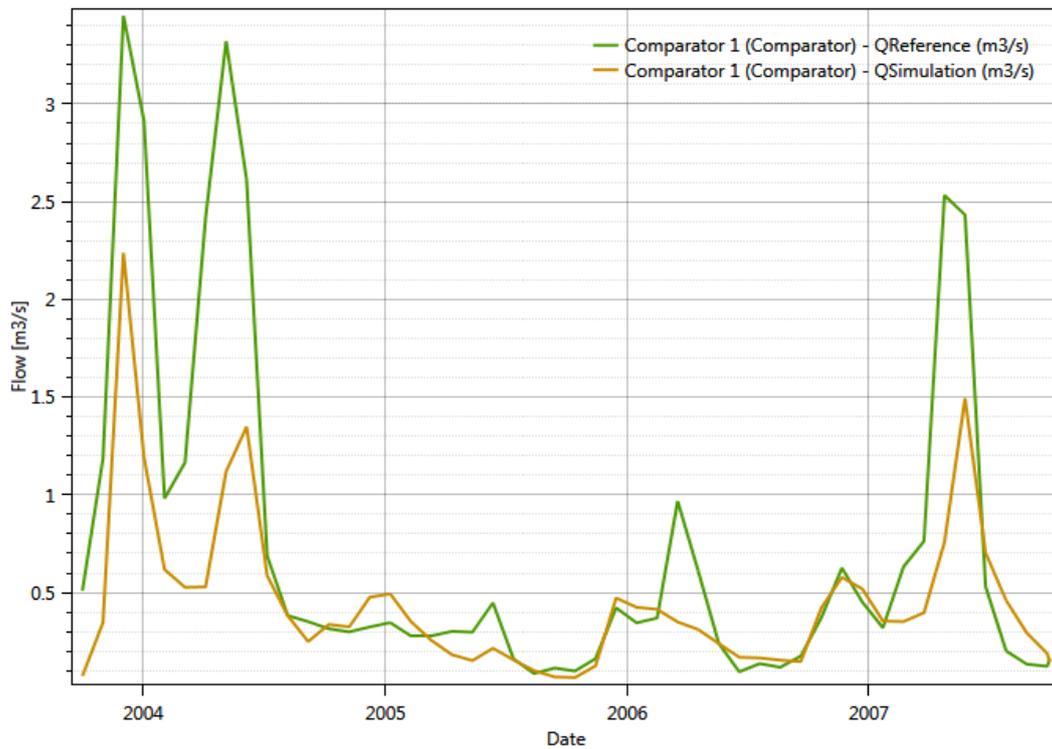


Figura 46. Aportación mensual cabecera del río Manubles (Validación)

Tabla 23. Valores Función Objetivo Unidad 816

CALIBRACIÓN (1989 - 2000)		VALIDACIÓN (2000 - 2006)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.6863	Índice de Nash	0.4673
Nash-In	0.6439	Nash-In	0.2109
Coef. Pearson	0.8383	Coef. Pearson	0.7684
Bias	0.9916	Bias	0.9486
F objetivo	0.7900	F objetivo	0.5988

En base a los resultados y mediante un análisis del modelo tanto en la etapa de calibración como de validación se visualiza que los datos simulados tienden a representar bien los caudales observados sin embargo existen problemas al momento de reproducir los picos altos que generalmente se producen por la presencia en ciertos puntos de avenidas, lo que ocasiona que la incertidumbre del modelo aumente y los valores del índice de Nash disminuyan, en el año hidrológico 1997-1998 vemos que la diferencia entre los picos representados es del orden de 1.5 Hm^3 , este efecto también se observa claramente en la etapa de validación, en los años 2004-2005 y 2007-2008 se presentan caudales que no son comunes respecto a las modelaciones precedentes, la diferencia existente entre los datos simulados y observados genera la disminución de los valores de la FO. Respecto a los parámetros (FCP, PWP y coeficientes) cumplen con las restricciones antes impuestas.

En este sistema el flujo por escorrentía directa (Qr) prácticamente no tiene lugar, siendo los aportes dominantes de la cuenca el flujo base (Ql) y el interflujo (Qu), los valores más representativo son del orden de $3 \text{ m}^3/\text{s}$ lo que indica que los niveles de agua (SL) en el tanque inferior son elevados (24 m aproximadamente), mientras que el nivel en el tanque superior (SU) en contraste con el SL es relativamente bajo (5m) dependiendo por tanto el flujo subsuperficial en gran parte del coeficiente de almacenamiento interno (Ku).

6.5. SISTEMA ARANDA

En este apartado se calibrarán todas las aportaciones de las subcuencas pertenecientes al sistema Aranda donde destacan los ríos: Isuela y Aranda. Este sistema a su vez viene caracterizado por la presencia del embalse de Maidevera que es el encargado de regular las aportaciones provenientes del Aranda. El principal objetivo de esta infraestructura de

regulación es suministrar el agua necesaria para los regadíos de la cuenca del Aranda sirviendo de apoyo al mismo tiempo al bajo Jalón cuando es necesario.

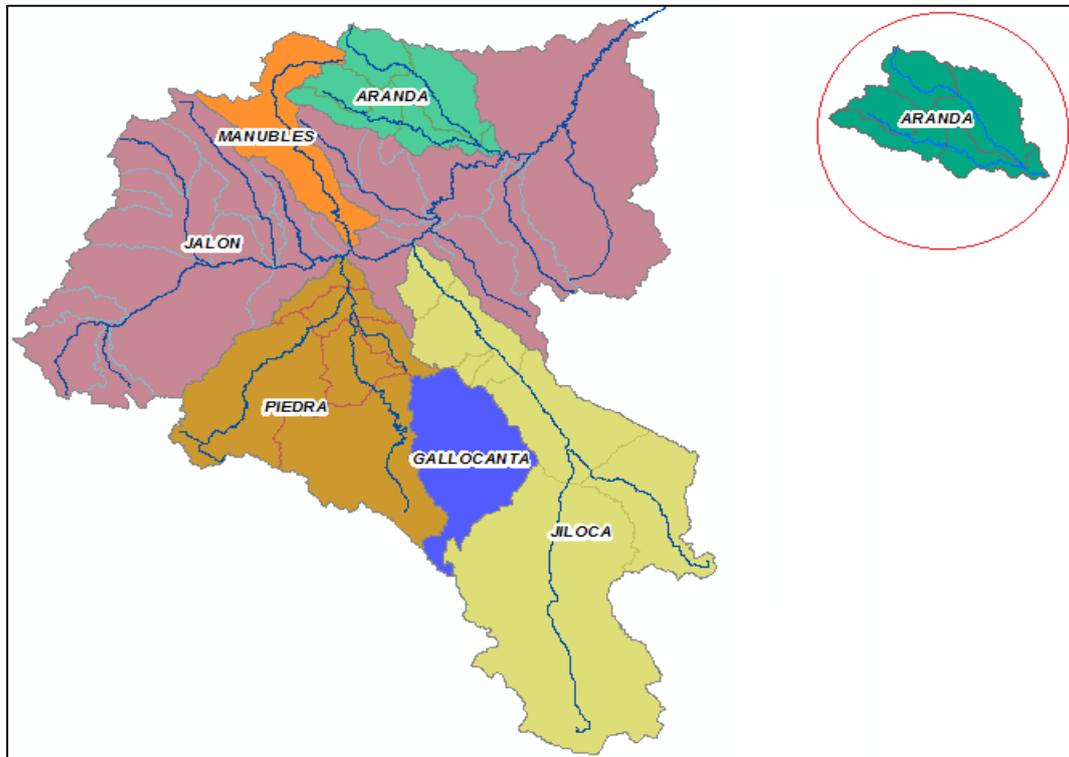


Figura 47. Subcuencas del Sistema Aranda

6.5.1. Cabecera del Río ISUELAS: Estación de aforo Trasobares (Unidad 826)

La cuenca de explotación de este río comprende una superficie relativamente pequeña (123 km²), la cual no se ve expuesta a grandes presiones, únicamente se evidencia la presencia de algún azud. Para el registro de los caudales circulantes se cuenta con la estación de aforo R.O.E.A 92.61. Al tratarse de un caudal que no es de tanta envergadura a partir de este punto las cuencas restantes adoptarán los valores de los parámetros de las cuencas adyacentes, de este modo los caudales registrados en estas cuenca serán evidenciados posteriormente en la calibración del sistema en conjunto correspondiente a la estación de aforo Grisen que es donde el caudal aportado por la cuenca del Jalón es registrado.

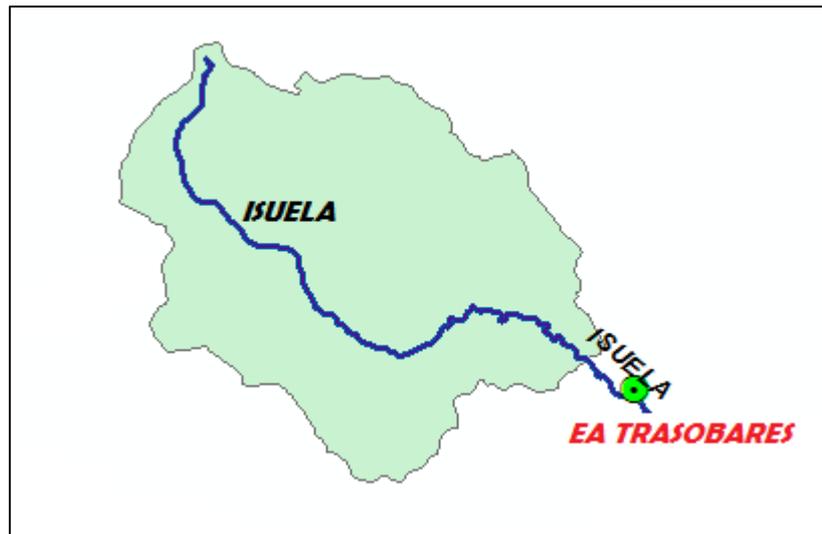


Figura 48. Subcuenca del Río Isuela

El periodo de calibración y validación se lo ha realizado en el periodo 1991-2007, para esta subcuenca las demandas no ha sido significativas por tal razón se ha considerado que las aportaciones se encuentran en régimen natural. A continuación se muestra las condiciones iniciales y parámetros calibrados en el modelo:

Tabla 24. Parámetros empleados en la modelación de unidad 826

Condiciones Iniciales	Valor	Subcuenca	826	
HsnowIni (m)	0	Área	123	Km ²
WHIni (Adim)	0	Parámetro	Valor	
HumIni (m)	0.0598	Beta	2.1791	Adim
SUini (m)	0.0001	FC	0.0714	m
SLIni (m)	0.0028	PWP	0.0494	m
		SUMax	0.0445	m
		Kr	0.2270	1/d
		Ku	0.0142	1/d
		Kl	0.0174	1/d
		Kperc	0.0003	1/d

En la Figura 49 y Figura 50 se muestran la reproducción de los datos del modelo de simulación en las etapas de calibración y validación, los valores de la función objetivo se detallan en la *Tabla 25*.

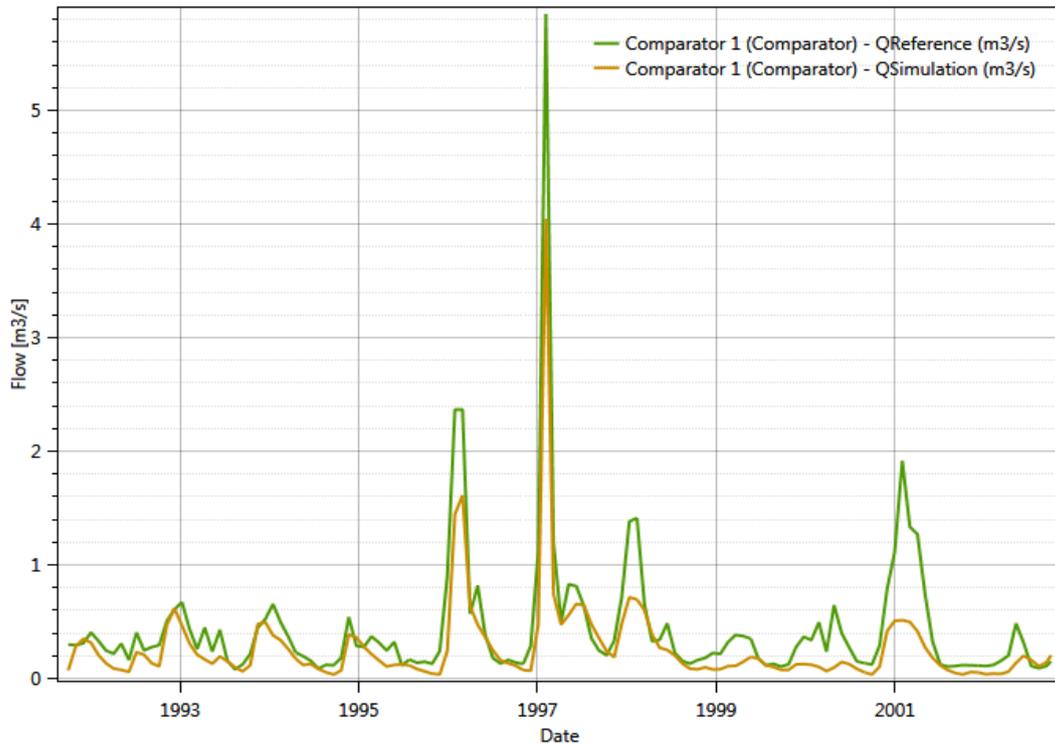


Figura 49. Aportación mensual cabecera del río Isuela (Calibración)

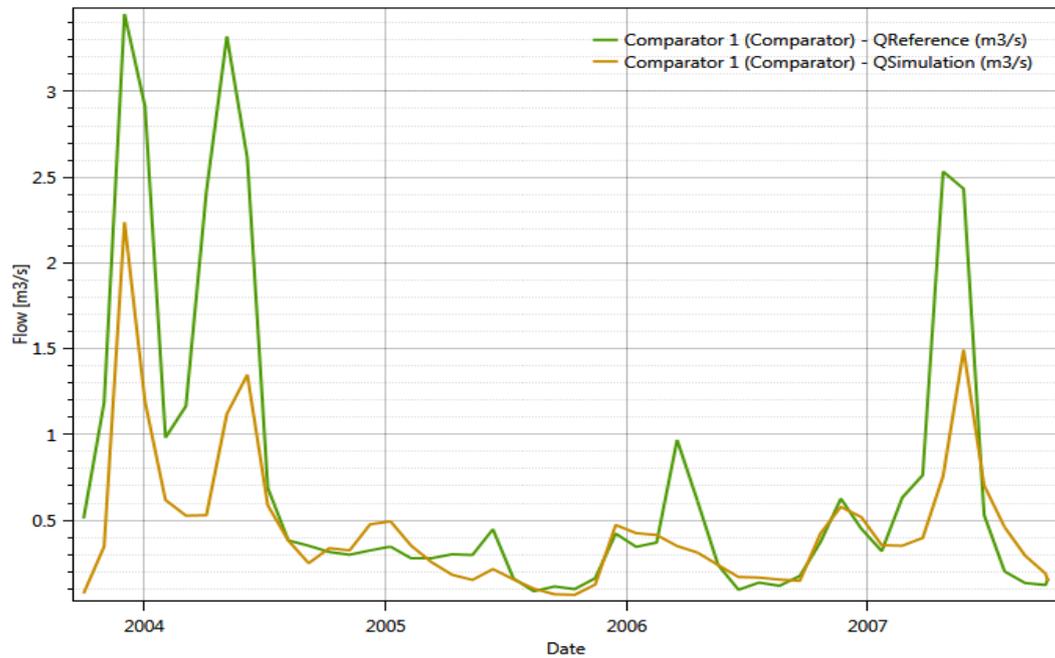


Figura 50. Aportación mensual cabecera del río Isuelas (Validación)

Tabla 25. Valores Función Objetivo Unidad 826

CALIBRACIÓN (1991 - 2002)		VALIDACIÓN (2002 - 2007)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.7353	Índice de Nash	0.4699
Nash-In	0.3013	Nash-In	0.6995
Coef. Pearson	0.9465	Coef. Pearson	0.8615
Bias	0.5902	Bias	0.5832
F objetivo	0.6433	F objetivo	0.6535

Una vez analizado los parámetros resultantes de la calibración, estos muestran una vez más que se cumple con la coherencia física del modelo donde FC debe ser mayor que PWP sin embargo en estos no se evidencia una diferencia marcada, siendo este aspecto lo que habría que considerar en la sensibilidad de los datos simulados por el modelo. A pesar de este inconveniente a modo general se puede indicar los resultados de esta subcuenca en particular no ejercen mayor influencia en la calibración en conjunto del sistema dado que estos aportan cantidades insignificantes de caudal respecto a los volúmenes generados en toda la cuenca del Jalón.

Las gráficas de calibración y validación muestran que los datos simulados reproducen el caudal observado de manera aproximada en la mayoría del período analizado, exceptuando en la calibración ciertos puntos donde se aprecia que la máxima diferencia entre el caudal simulado y observado es del orden de 1.4 Hm³, casos similares se evidencian en el periodo de validación el año hidrológico 2004 y 2007 donde el comportamiento del caudal observado no es el habitual a los concebidos anteriormente, observándose una diferencia máxima en los caudales medidos de 2 Hm³ aproximadamente.

El correspondiente análisis indicó que existe un predominio de flujo sub superficial (Qu) a lo largo de la cuenca, de igual manera se aprecia que no existe mayor aporte de escorrentía directa (Qr) excepto en el año hidrológico 1996 y 1997 donde se evidencia un pico de caudal elevado del orden de 2,9 Hm³.

6.5.2. Cabecera del Río Aranda: Estación de aforo Maidevera C.E (Unidad 823)

Las aportaciones del río Aranda tienen la característica de ser reguladas por el embalse Maidevera el cual se encarga principalmente de suministrar el agua necesaria para el regadío

de la zona. Para el control y registro de caudales que entran al embalse se cuenta con la estación de aforo R.O.E.A 9236 la cual considera una cuenca aportante de 39 km².



Figura 51. Subcuenca del Río Aranda

Como en el caso de la subcuenca del río Isuela el periodo de calibración y validación se lo ha realizado en el lapso 1991-2007, la subcuenca del Aranda al ser de cabecera no presenta demandas significativas por tal razón se ha considerado que las aportaciones se encuentran en régimen natural y constituyen las entradas al embalse de Maidevera. A continuación se muestra las condiciones iniciales y parámetros calibrados en el modelo:

Tabla 26. Parámetros empleados en la modelación de unidad 823

Condiciones Iniciales	Valor
HsnowIni (m)	0
WHIni (Adim)	0
HumIni (m)	0.0598
SUini (m)	0.0001
SLIni (m)	0.0028

Subcuenca 823		
Área	77.6	Km ²
Parámetro	Valor	
Beta	1.0000	Adim
FC	0.2035	m
PWP	0.1679	m
SUMax	0.0831	m
Kr	0.2133	1/d
Ku	0.0618	1/d
Kl	0.0085	1/d
Kperc	0.2244	1/d

La Tabla 27 detalla los valores de la FO que se alcanzó en la modelación, mientras que la Figura 52 y Figura 53 muestra las gráficas de calibración y validación para la subcuenca del Aranda.

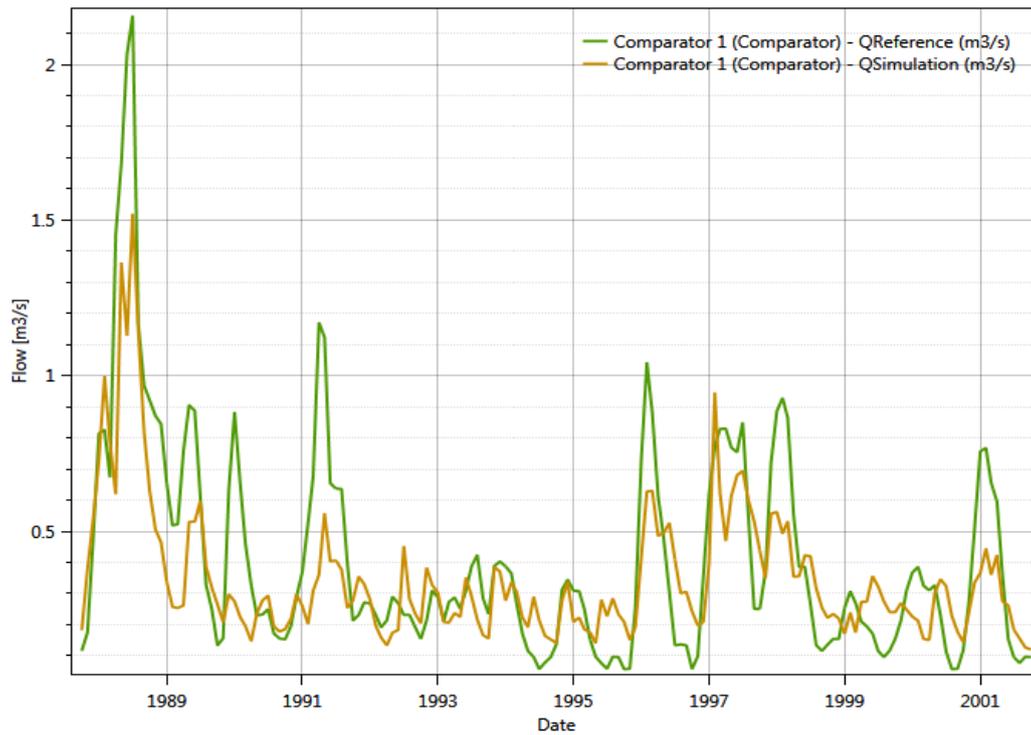


Figura 52. Aportación mensual entrada Embalse Maidevera (Calibración)

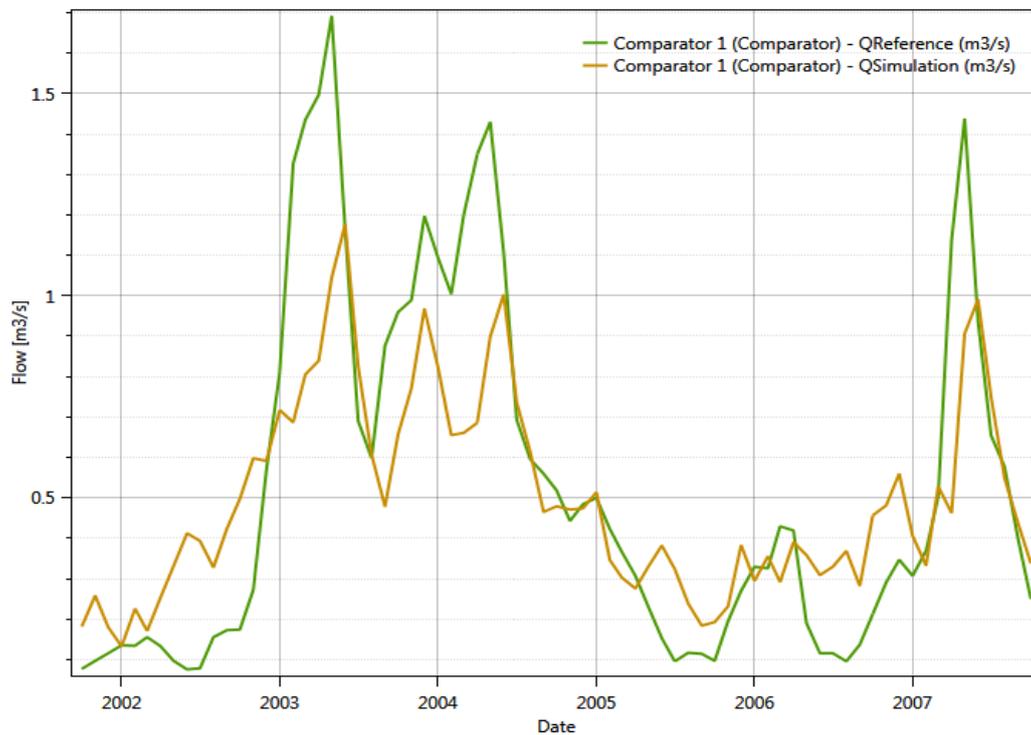


Figura 53. Aportación mensual entrada Embalse Maidevera (Validación)

Tabla 27. Valores Función Objetivo Unidad 823

CALIBRACIÓN (1991 - 2002)		VALIDACIÓN (2002 - 2007)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.6008	Índice de Nash	0.6315
Nash-In	0.5652	Nash-In	0.6206
Coef. Pearson	0.8204	Coef. Pearson	0.8548
Bias	0.9675	Bias	0.9963
F objetivo	0.7385	F objetivo	0.7758

Al analizar la Figura 52 se establece que el modelo a pesar que se ajusta adecuadamente a los datos observados existe cierta dificultad al tratar de reproducir los picos altos y los caudales bajos registrados, por tal razón el índice de Nash no adopta valores óptimos tanto en la calibración como en la validación se observan diferencias que están en el rango de los 0.6 Hm^3 , en estas figuras también se muestra la subestimación de los caudales bajos, reflejándose lo dicho en los valores de la FO correspondientes al Nash-in. A pesar de lo anterior dicho el valor global de la FO en los dos casos (calibración/validación) se encuentra por el rango que pueden ser considerados aceptables. Los parámetros FC y PWP establecidos en el modelo se comportan en base a lo esperado sin encontrarse incoherencias en la modelación.

En el análisis del proceso se observó que el mayor aporte viene dado por el flujo base (QI), con lo que se puede señalar que las capas de esta zona son altamente permeables. Dada la gran permeabilidad y valores bajos de los niveles (SU) se evidencia caudales de interflujo (Qu) poco significativos en contraste con el flujo que se deriva de la capa subterránea, por último se puede decir que en la subcuenca no se evidencia aportes resultantes de escorrentía directa a través de la superficie (Qr).

6.6. SISTEMA JALÓN

En este apartado se calibrarán todas las aportaciones de las subcuencas pertenecientes al sistema Jalón el cual tiene su destino final en la desembocadura de la cuenca que lleva su mismo nombre. En este sistema se tiene por el lado izquierdo una regulación en Monreal Ariza a través del embalse de Monteagudo, de igual manera se contemplan las aportaciones del sistema Piedra que vienen dadas por las sueltas del embalse de la Tranquera, las aportaciones del sistema Jiloca, Manubles y Aranda (regulado en cierto punto por las sueltas que produce

el embalse de Monteagudo. Todos estos sistemas en conjunto componen la cuenca hidrográfica del río Jalón, el cual ha sido el objeto de estudio en la presente tesina.

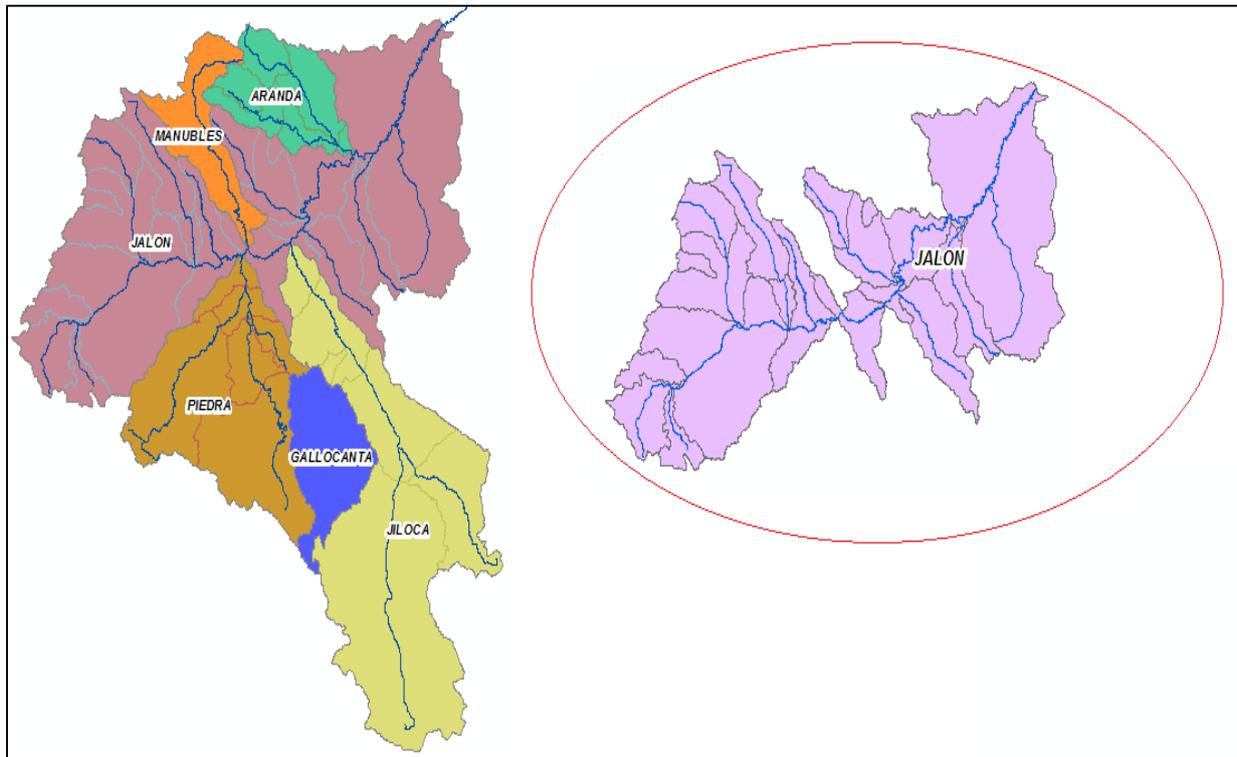


Figura 54. Subcuencas del Sistema Jalón

6.6.1. Cabecera del Río BLANCO: Estación de aforo Barrio Blanco (Unidad 813)

El río blanco se extiende a lo largo de una superficie de 73 km², constituye aguas arriba uno de los principales afluentes al río Jalón, se encuentra sometidos a presiones principalmente asociadas a la extracción de agua, presencia de azudes e hidroeléctricas, el caudal circulante viene determinado por la estación de aforo R.O.E.A 9167. Según el plan hidrológico esta estación muestra que el río cumple casi en su totalidad los caudales ecológicos requeridos en la zona (30 l/s).

El periodo de calibración y validación se lo ha realizado en el periodo 1996-2007, al tratarse de una cuenca de cabecera se la ha considerado que se encuentra en régimen natural donde prácticamente no se evidencian detracciones de agua importantes. No se ha podido realizar la simulación en el período que generalmente se llevaba a cabo (1987-2007) por la ausencia de datos, se tienen registros continuos a partir del año 1993 los cuales fueron empleados para la etapa de calentamiento.



Figura 55. Subcuenca del río Blanco.

A continuación se muestra las condiciones iniciales y parámetros calibrados en el modelo:

Tabla 28. Parámetros empleados en la modelación de unidad 813

Condiciones Iniciales	Valor
HsnowIni (m)	0
WHIni (Adim)	0
HumIni (m)	0.1217
SUini (m)	0.0020
SLIni (m)	0.0330

Subcuenca 813		
Área	73	Km ²
Parámetro	Valor	
Beta	4.0649	Adim
FC	0.1158	m
PWP	0.0972	m
SUMax	0.0676	m
Kr	0.3423	1/d
Ku	0.0122	1/d
Kl	0.0052	1/d
Kperc	0.6393	1/d

En la Figura 56 y Figura 57 se representa los caudales simulados en la etapa de calibración y validación. Además en la Tabla 29 se presenta los valores obtenidos para la función objetivo que determinan la bondad del ajuste realizado.

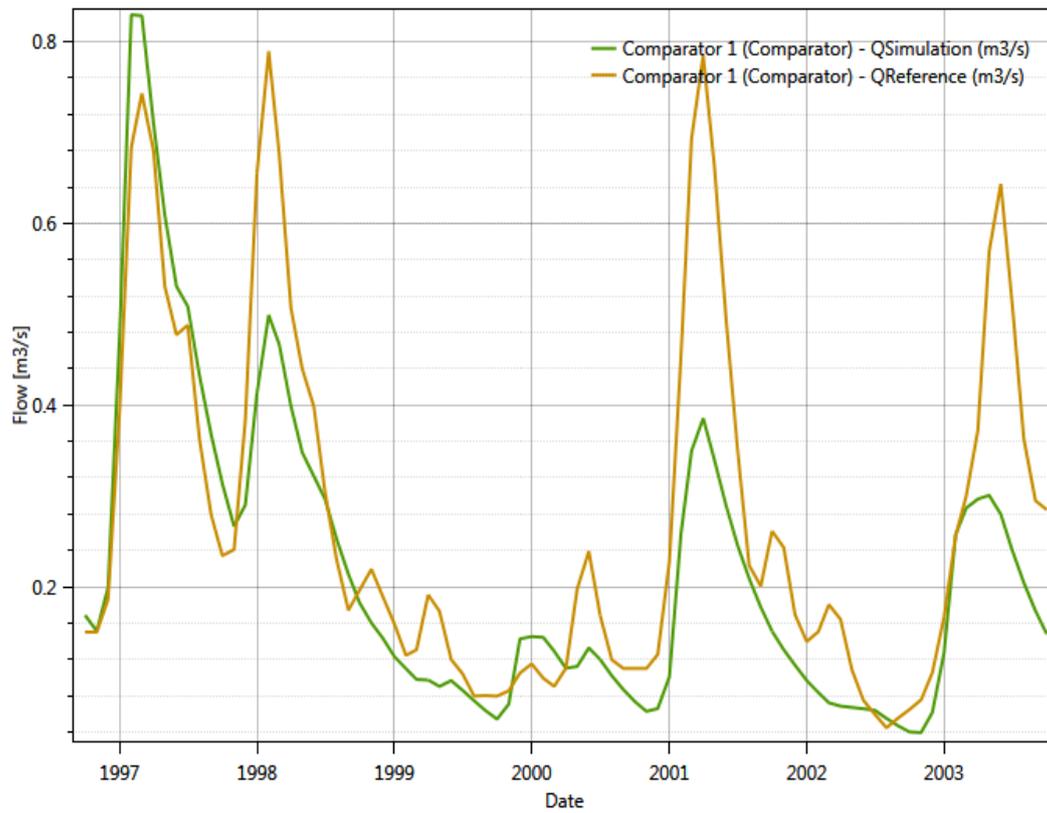


Figura 56. Aportación mensual cabecera del río Blanco (Calibración)

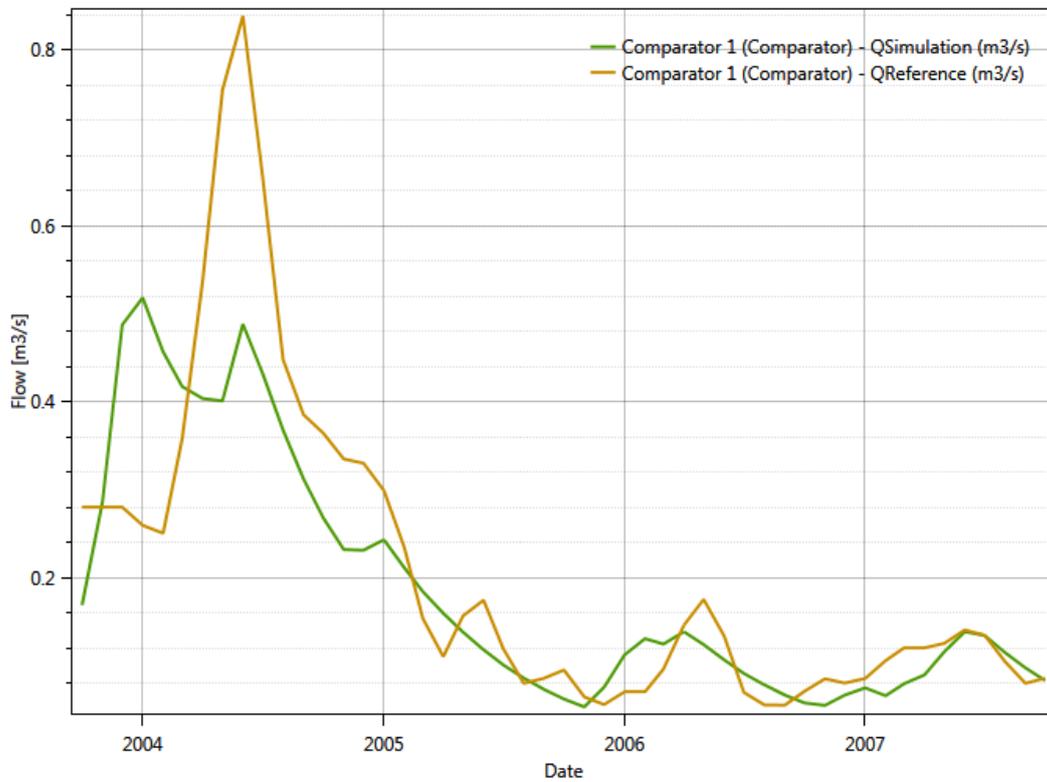


Figura 57. Aportación mensual cabecera del río Blanco (Validación)

Tabla 29. Valores Función Objetivo Unidad 813

CALIBRACIÓN (1996 - 2003)		VALIDACIÓN (2003 - 2007)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.6368	Índice de Nash	0.6510
Nash-In	0.7060	Nash-In	0.8185
Coef. Pearson	0.8490	Coef. Pearson	0.8180
Bias	0.9293	Bias	0.9860
F objetivo	0.7803	F objetivo	0.8184

A vista de los resultados mostrados en la Tabla 29 y a partir de las gráficas de calibración y validación se dice que el modelo establecido para esta subcuenca no se aleja de la realidad, muestra dificultad al momento de alcanzar aquellos puntos donde se evidencian picos altos (0.4 Hm³ diferencia más importante entre el caudal simulado y observado), sin embargo en general se puede decir que este resulta ser una buena aproximación frente a la representación de los caudales de las estaciones de aforo registrados en la cuenca. Al tratarse de una cuenca en régimen de caudales natural es de esperarse que los resultados de la simulación tengan una incertidumbre baja, caso contrario se puede decir que los datos introducidos en el modelo (precipitación y evapotranspiración) no son del todo fiables. En lo que respecta a los parámetros encontrados durante la calibración estos cumplen con los criterios anteriormente nombrados, el único inconveniente respecto a estos valores es la aproximación del valor de PWP a FC sin embargo se lo puede dar como válido.

El flujo base (Ql) proveniente de la capa más profunda (subterránea) es la dominante en la unidad 813, el caudal más representativo correspondiente al Ql es del orden de 0.82 m³/s, lo que da una idea de la gran permeabilidad de la zona. El caudal de interflujo no alcanza valores de gran consideración, el valor más alto corresponde a 0.05 m³/s. Los niveles de agua en la capa o tanque superior nunca superan los límites máximos de almacenamiento y por tal razón no hay presencia de escorrentía directa (Qr).

6.6.2. Cabecera del Río Jalón: Estación de aforo Jubera (Unidad 801)

El río Jalón tiene una longitud de 223.7 km y nace en Sierra Ministra, para el control de las aportaciones en cabecera cuenta con la EA R.O.E.A 9058 que se encuentra ubicada antes de la confluencia del río Blanco. La subcuenca objeto de calibración se trata de la 801 que tiene

una superficie de 196 km². Esta zona se encuentra sometida a presiones que derivan principalmente de la agricultura, así como la presencia de azudes que no involucran disminuciones significativas de caudal. De acuerdo al plan hidrológico en este punto se cumple casi en su totalidad el caudal ecológico mínimo requerido (50l/s) todos los días del año.



Figura 58. Subcuenca de la cabecera del río Jalón. (Estación de Aforo Jubera)

Al igual que el caso del río Blanco corresponde a una zona de cabecera donde se espera no existan mayores detracciones de agua, sin embargo destacan ciertas demandas agrícolas (0.12 Hm³) para satisfacer la demanda requerida por los cultivos del sector. El periodo de calibración y validación se lo ha realizado en el período 1981-2007. En la Tabla 30 se detallan las condiciones iniciales y parámetros empleadas en la simulación.

En la Figura 59 y Figura 60 se muestra los datos obtenidos por la simulación en contraste con los datos observados (calibración y modelación), los resultados de la FO se detallan en la Tabla 31.

Tabla 30. Parámetros empleados en la modelación de unidad 801

Condiciones Iniciales	Valor
HsnowIni (m)	0
WHIni (Adim)	0
HumIni (m)	0.0163
SUini (m)	0.0000
SLIni (m)	0.0515

Subcuenca 801		
Área	196	Km ²
Parámetro	Valor	
Beta	3.0269	Adim
FC	0.1502	m
PWP	0.1170	m
SUMax	0.0396	m
Kr	0.2153	1/d
Ku	0.0794	1/d
Kl	0.0030	1/d
Kperc	0.4741	1/d

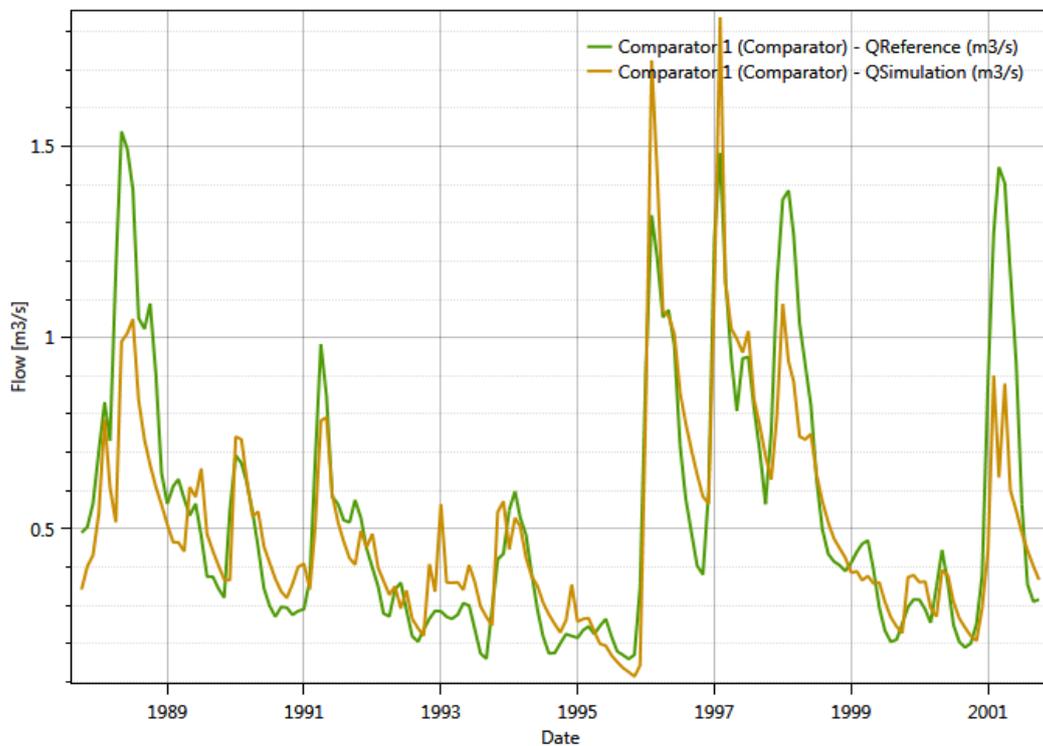


Figura 59. Aportación mensual cabecera del río Jalón (Calibración)

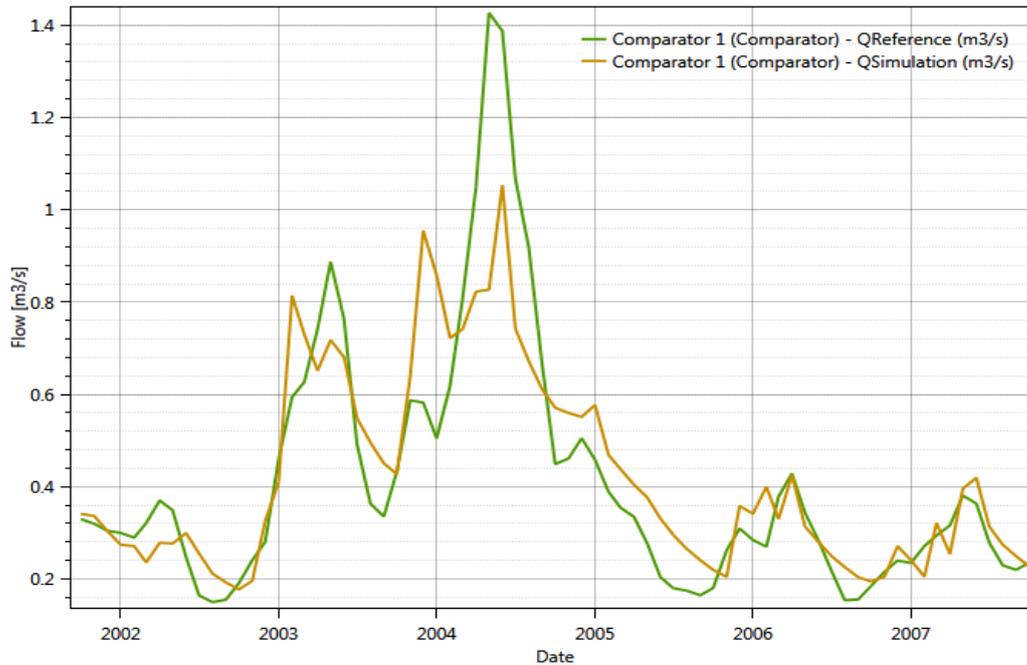


Figura 60. Aportación mensual cabecera del río Jalón (Validación)

Tabla 31. Valores Función Objetivo Unidad 801

CALIBRACIÓN (1987 - 2001)		VALIDACIÓN (2001 - 2007)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.7315	Índice de Nash	0.7469
Nash-In	0.8027	Nash-In	0.8116
Coef. Pearson	0.8603	Coef. Pearson	0.8684
Bias	0.9970	Bias	0.9993
F objetivo	0.8479	F objetivo	0.8565

Los resultados de la simulación muestran que los ajustes tanto en la calibración como en la validación se consideran buenas, teniendo como resultados de la función objetivo de 0.8479 y 0.8565 respectivamente. Esto se puede corroborar con las gráficas mostradas en la cual se observa la buena representación de los caudales simulados en relación con los observados, existen ciertos puntos donde el ajuste de los picos altos es buena viéndose reflejado a la vez en el indicador del índice de Nash el cual en los dos casos está por encima de 0.7. Respecto a los parámetros no existe inconvenientes en la representación del proceso hidrológico. La capacidad de campo se encuentra por encima del punto de marchitez del suelo y los coeficientes de flujo que caracterizan el proceso cumplen con los criterios ya descritos.

Esta zona al estar adyacente a la subcuenca del río blanco también se caracteriza por su alta permeabilidad, es por tal que se observa que el caudal dominante en la cuenca corresponde al flujo base o subterráneo QI, sin embargo en esta zona no se desprecia el interflujo (Qu), existiendo varios puntos donde dan lugar a picos de caudal de consideración (1.3 Hm^3 el más representativo). El flujo de caudal por escorrentía directa es inexistente dado que los niveles de agua en la capa superior (SU) nunca sobrepasan su capacidad máxima (SUMax).

6.6.3. Río Nájima: Estación de aforo Monreal Ariza (Unidad 810, 811,812)

El río Nájima se trata de un río que nace en los Bliccos provincia de Soria, su trayecto no abarca una gran longitud y este desemboca por la parte superior en el río Jalón. Según el plan hidrológico el caudal ecológico no se respeta en la mayoría de los años es decir que presenta elevados incumplimiento. Esta zona se ve influenciada por la infraestructura de regulación (Embalse Monteagudo), encontrándose de este modo en un régimen alterado, la que disminuye considerablemente los caudales aguas abajo. Las demandas en este punto son de tipo agrario principalmente y se tiene como función suministrar el agua necesaria para satisfacer los regadíos de la cuenca del Nájima. Para la medición del caudal en desembocadura se utiliza la estación R.O.E.A 9147, involucrando 3 subunidades (810, 811 y 812) que tienen una longitud de 152,286 y 32 km^2 respectivamente.



Figura 61. Subcuencas del Río Nájima.

La calibración y validación del modelo se lo ha realizado en el período 1990 – 2007 y en la simulación se han tomado en cuenta las demandas agrarias y urbanas que tienen lugar en la

cuenca siendo del orden de 6 Hm³. A continuación se muestra las condiciones iniciales y parámetros calibrados en el modelo:

Tabla 32: Parámetros empleados en la modelación de unidad 810, 811, 812

Condiciones Iniciales	Valor	Subcuenca 810,811,812	
Hsnowlni (m)	0	Área	465 Km ²
WHlni (Adim)	0	Parámetro	Valor
Humlni (m)	0.0885	Beta	2.6113 Adim
SUini (m)	0.0000	FC	0.5125 m
SLlni (m)	0.0003	PWP	0.4668 m
		SUMax	0.0506 m
		Kr	0.2512 1/d
		Ku	0.0290 1/d
		Kl	0.0202 1/d
		Kperc	0.4342 1/d

La Figura 62 y Figura 63 corresponden a la reproducción de los datos del modelo de simulación para la etapa de calibración y validación, además en la Tabla 33 se detalla los valores que alcanza la función objetivo.

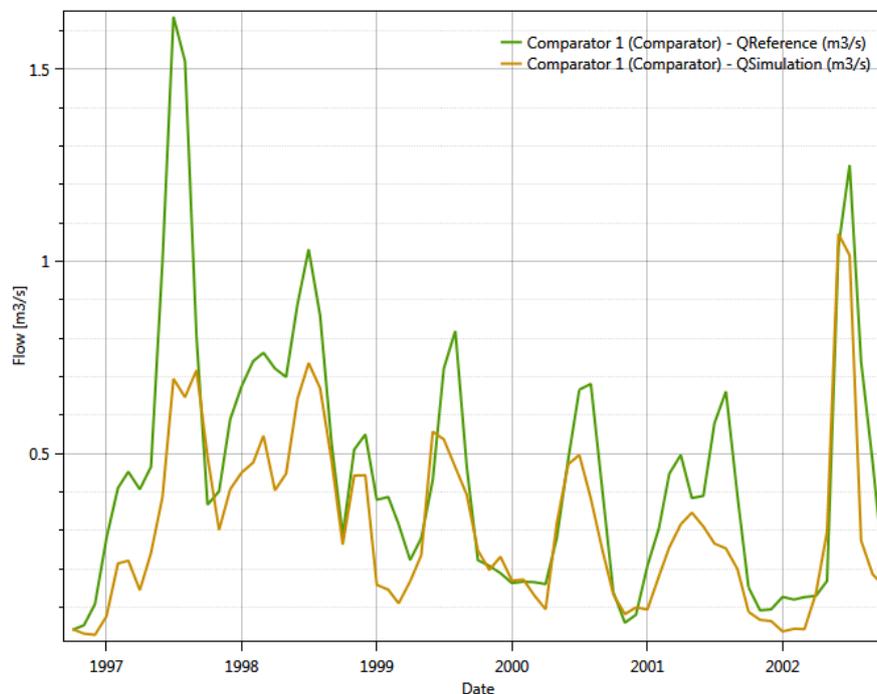


Figura 62. Aportación del río Jalón: Estación Monreal Ariza (Calibración)

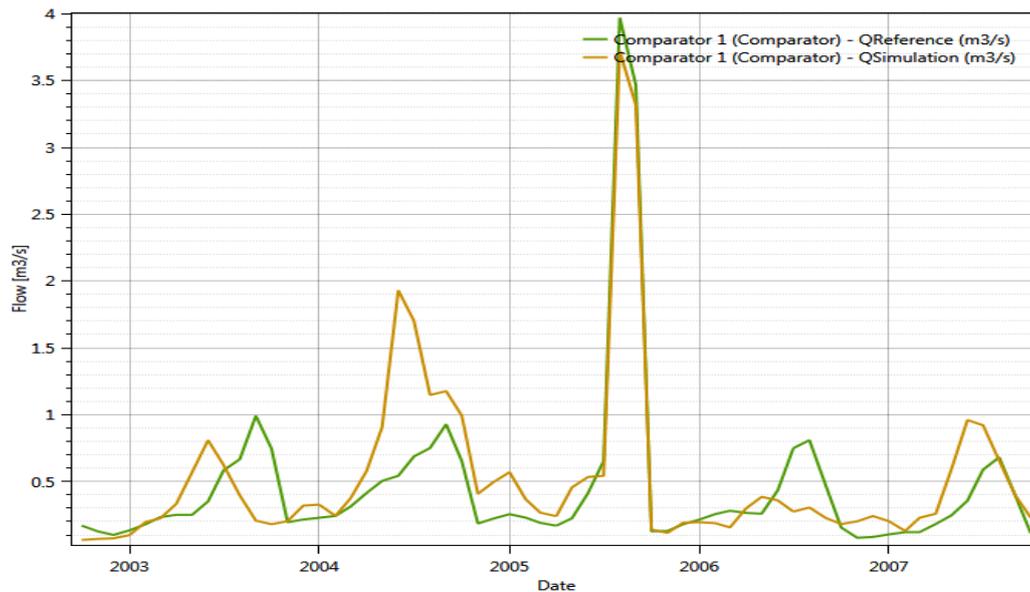


Figura 63. Aportación del río Jalón: Estación Monreal Ariza (Validación)

Tabla 33. Valores Función Objetivo Unidad 810, 811,812

CALIBRACIÓN (1990 - 2002)		VALIDACIÓN (2002 - 2007)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.5267	Índice de Nash	0.7424
Nash-In	0.5226	Nash-In	0.5321
Coef. Pearson	0.8188	Coef. Pearson	0.8821
Bias	0.8115	Bias	0.9669
F objetivo	0.6699	F objetivo	0.7816

Resulta necesario indicar que esta cuenca tuvo dificultades para su calibración, en un principio se intentó calibrar los caudales observados a partir de las sueltas del embalse de Monteagudo, y a partir de las aportaciones producidas en las subcuencas que formaban parte de las subcuencas aportantes al embalse antes nombrado. La subcuenca aportante en la R.O.E.A 9147 según el SAIH (Anuario de Aforos) abarcaban una superficie de 466 km², 300km correspondían a las unidades que constituían las entradas al embalse mientras que 166 km² pertenecían a las aportaciones de las unidades restantes. Al abordar la calibración de esta manera se presentaron inconvenientes que a ciencia cierta se desconoce el motivo por el cual la calibración fue fallida pero al parecer los problemas fueron causados por los datos de las series de precipitaciones y evapotranspiraciones, al igual que el establecimiento de la zona aportante al embalse tuvo cierta incertidumbre dado que según los archivos shape de la

unidades de división hidrográfica descargados del SIAH estos provenían tan solo de una subunidad(812), sin embargo esta solo abarcaba 32 km² por lo que el área restante (268 km) provenía de las otras subunidades(810 y 811) siendo difícil estimar el área aportante, dado que mediante ortofotos de la zona en estudio se observó la presencia de un canal ubicado aguas arriba del embalse en la zona de cabecera (unidad 810) que desembocaba en el embalse objeto de estudio. Por tal motivo se calibró la cuenca en conjunto considerando los volúmenes de entrada al embalse como una demanda constante y a la vez considerando las sueltas producidas por el embalse. Ejecutado este cometido se obtuvieron resultados que a pesar que no sean los mejores, se los puede considerar válidos, en la etapa de calibración el problema se encontró al momento de alcanzar los picos altos, razón por la cual el valor del índice de Nash (0.52) se encuentra en valores que demuestran la poca eficiencia del modelo al reproducir estos picos. En la validación se observa como notablemente mejora la función objetivo (0.78) al alcanzar el pico más alto de la serie encontrado entre el año 2005-2006. En lo que respecta a los parámetros observamos que se cumplen las restricciones impuestas anteriormente mencionadas, sin embargo se observa que los mejores parámetros de optimización muestran que el PWP se aproxima a FC lo cual podría afectar a la sensibilidad del modelo.

Las subcuenca del río Nájima a pesar de la estructura de regulación (embalse de Monteagudo) presente en el medio se ve influenciada principalmente por el flujo subterráneo (QI), siendo el más representativo el que se presenta en el año hidrológico 1997-1998. No hay presencia de escorrentía directa, es decir que los niveles de agua en la capa superior (SU) no sobrepasa los límites establecidos por el modelo y a la vez estos valores bajos de SU indican que el interflujo (Qu) no será el que predomine en el medio siendo los datos que reproduce el modelo poco significativos.

6.6.4. Cabecera del Río HENAR: Estación de aforo Embid de Ariza (Unidad 814)

El río Henar originariamente nace en la municipalidad de Gómara pero es en el municipio Deza donde comienza a recibir aportaciones de gran consideración proveniente de manantiales. La estación R.O.E.A 9057 es con la que se registra los caudales de una superficie de 207 km² que aguas abajo desembocan en el río Jalón. De acuerdo al plan hidrológico generalmente se cumple a diario los caudales ecológicos que demanda el cauce (40l/s).En este subsistema se

observan principalmente azudes que pueden secar el río en verano, los recursos provenientes de esta zona son empleados principalmente para regadío.



Figura 64. Subcuencas del Río Henar.

La calibración y validación del modelo se lo realiza en el período 1987-2007, considerando en la simulación las demandas que involucran detracciones de agua importantes entre las que destacan las de origen urbano e industrial que aproximadamente demandan 3 Hm³/año. La Tabla 34 detalla las condiciones iniciales y parámetros empleadas en el modelo:

Tabla 34. Parámetros empleados en la modelación de unidad 814

Condiciones Iniciales	Valor
HsnowIni (m)	0
WHIni (Adim)	0
HumIni (m)	0.0121
SUini (m)	0.0000
SLIni (m)	0.0064

Subcuenca 814		
Área	207	Km ²
Parámetro	Valor	
Beta	1.4002	Adim
FC	0.5871	m
PWP	0.2034	m
SUMax	0.0615	m
Kr	0.3198	1/d
Ku	0.1411	1/d
Kl	0.0042	1/d
Kperc	0.5389	1/d

Los valores alcanzados de la FO en la calibración y validación se detallan en la Tabla 35, y en la Figura 65 y Figura 66 se muestran los datos que reproduce el modelo de simulación en contraste con los datos observados.

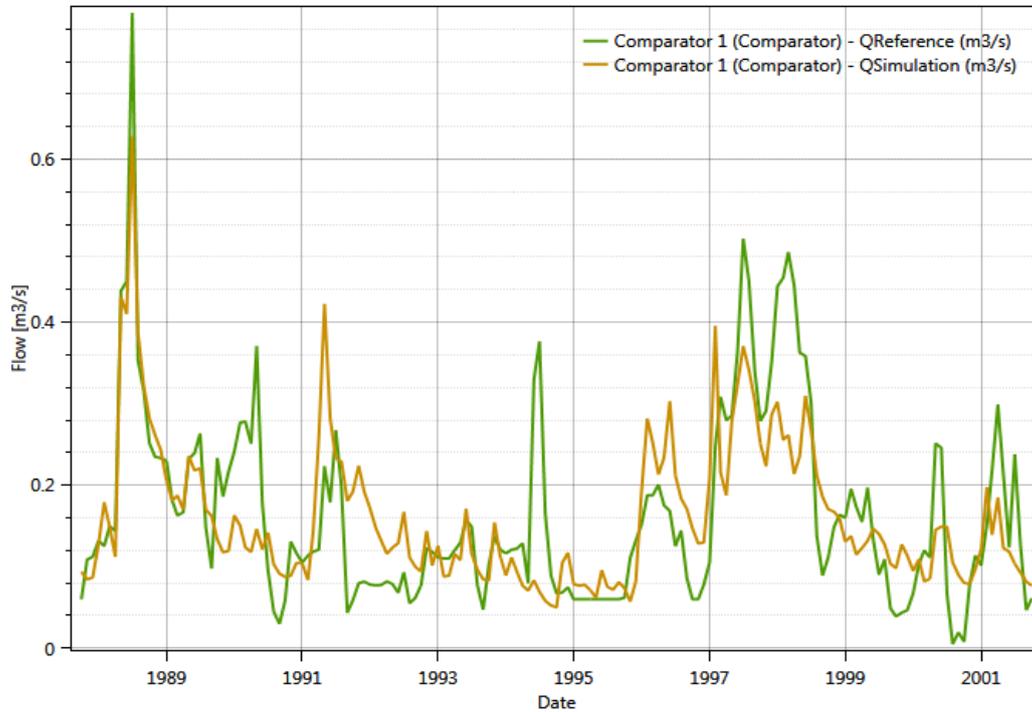


Figura 65. Aportación del río Henar: Estación Embid de Ariza (Calibración)

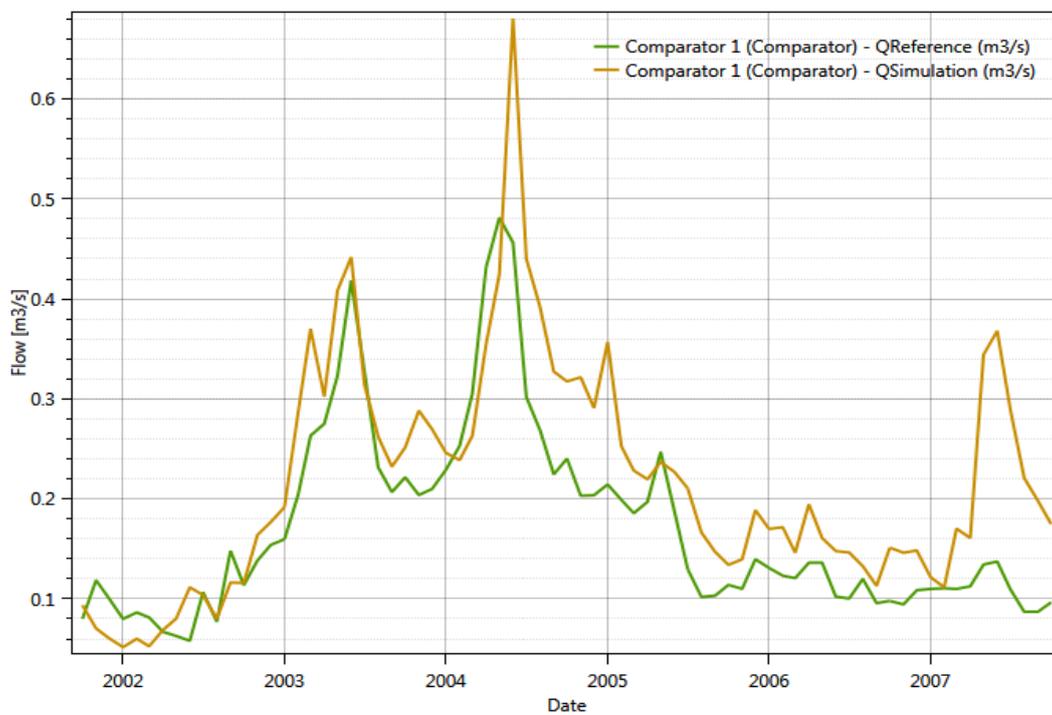


Figura 66. Aportación del río Henar: Estación Embid de Ariza (Validación)

Tabla 35. Valores Función Objetivo Unidad 814

CALIBRACIÓN (1987 - 2001)		VALIDACIÓN (20021 - 2007)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.5505	Índice de Nash	0.3525
Nash-In	0.4355	Nash-In	0.4425
Coef. Pearson	0.7429	Coef. Pearson	0.8468
Bias	0.9993	Bias	0.4471
F objetivo	0.6821	F objetivo	0.6432

Los resultados de la Tabla 35 y de las Figura 65 y Figura 66 evidentemente muestran que el modelo no se ajusta adecuadamente tanto en los periodos de calibración como en los de validación. El inconveniente se da por la incertidumbre de los datos de precipitación y evapotranspiración, al tratarse de una subcuenca relativamente grande (207 km²) la variedad espacial juega un papel importante en esta zona, dado que los datos son obtenidos a partir de un centroide que puede o no ser característico de la cuenca. Los datos simulados se ajustan en forma a los simulados sin embargo existen zonas sobre todo en la validación donde se observa que los datos simulados se encuentran en su totalidad por encima de los observados, indicando de esta forma que la precipitación en la zona está siendo elevada o a su vez que la evapotranspiración toma valores bajos, aumentando de esta manera considerablemente la humedad del suelo y disminuyendo la capacidad de infiltración causando que la escorrentía total del medio (caudales simulados) sobrepasen de manera sustancial los caudales observados. Es de notar que a excepción del año hidrológico 1988-1989 el modelo no está estimando correctamente los picos altos y de igual manera se están subestimando los caudales bajos, problemas que repercuten los valores de la FO (Índice de Nash y Nash-in). La función objetivo global se encuentra entre los rangos considerados aceptables sin embargo estos son relativamente bajos lo cual no conlleva a un buen ajuste del modelo considerándolo a este muy sensible antes los cambios en los parámetros que emplea el mismo.

El análisis desarrollado precisó que el caudal de flujo base o subterráneo es el que más caudal aparta en la zona (0.38 m³/s el más representativo), a la vez se evidencian aportes importantes de interflujo (0.28 m³/s pico más alto) y no se presencia escorrentía directa a través de la superficie lo que indica que los niveles de agua (SU) en la capa superior no superan el SUmáx.

6.6.5. Río JALÓN: Estación de aforo Ateca (Seltas E. Tranquera, EA 9307, Unidad 803)

El río Jalón en donde se tiene la confluencia del sistema Piedra regulado principalmente por el Embalse de la Tranquera tiene su punto de control en la estación R.O.E.A 9119 en la misma se registran los caudales aportantes de una superficie de 3619 km². Con base al plan hidrológico el caudal ecológico del medio (710 l/s aproximadamente) se cumple en los años donde se evidencia aportaciones medias o húmedas mientras que ciertos incumplimientos se dan principalmente en años donde se presentan aportaciones menores presentándose principalmente en los meses correspondientes a verano donde el embalse se encuentra prácticamente vacío.



Figura 67. Subcuencas del Río Jalón (Estación de Aforo Ateca).

La calibración y validación del modelo se lo ha realizado en el período 1987-2007 y en él se han incluido las demandas agrarias y urbanas que tienen lugar en la cuenca que son del orden de 6 Hm³/año. La principal presión a la que se encuentra sometida el agua de esta subcuenca es la alteración del régimen a causa del Embalse la Tranquera quien modifica los hidrogramas principalmente en los meses correspondientes a primavera que es donde se tienen los mayores caudales. A continuación se muestra las condiciones iniciales y parámetros empleados en el desarrollo del modelo:

Tabla 36. Parámetros empleados en la modelación de la Estación Ateca

Condiciones Iniciales		Valor	Subcuencas Estación Ateca	
HsnowIni (m)	0		Área	318 Km ²
WHIni (Adim)	0		Parámetro	Valor
HumIni (m)	0.0885		Beta	3.5309 Adim
SUini (m)	0.0000		FC	0.5812 m
SLIni (m)	0.0003		PWP	0.2121 m
			SUMax	0.0622 m
			Kr	0.2493 1/d
			Ku	0.1910 1/d
			Kl	0.0026 1/d
			Kperc	0.3720 1/d

Los resultados de la FO (ver Tabla 37) muestran que el modelo se ajusta adecuadamente a los caudales aforados (observados) en la estación, los valores de la función objetivo tanto en la calibración como en la validación adoptan valores altos indicando de esta manera que el modelo representa idóneamente los procesos que se llevan a cabo en la cuenca. El valor del índice de Nash en los dos casos se encuentra por encima de 0.8 señalando que el ajuste de los picos altos de los datos simulados respecto a los observados es bueno, viéndose únicamente afectado en la estimación de los caudales bajos. El modelo como se aprecia predice adecuadamente períodos en los cuales se registra picos altos de caudales, es decir que puede ser útil al momento de predecir problemas de avenidas. Hay que señalar que la modelación presenta un buen ajuste por la presencia aguas arriba del Embalse de la Tranquera quien regula las aportaciones del sistema piedra y el cual constituye el aportante principal de los subsistemas considerados por la estación R.O.E.A 9119. Por lo que se puede decir que el embalse es el elemento más representativo en este punto de la modelación, dependiendo los caudales registrados en esta zona principalmente de los efectos producidos por la infraestructura de regulación.

El análisis en cuanto a la unidad 803 establecen que el flujo dominante en la subcuenca corresponde al interflujo, Qu, (0.065 m³/s es el pico más alto de caudal) sin embargo en contraste con las sueltas del embalse de la Tranquera a modo general estas resultan ser insignificantes, en la subcuenca analizada no se evidencia escorrentía directa con lo que los niveles de la capa superior (SU) no sobrepasan los niveles máximos (SUMax).

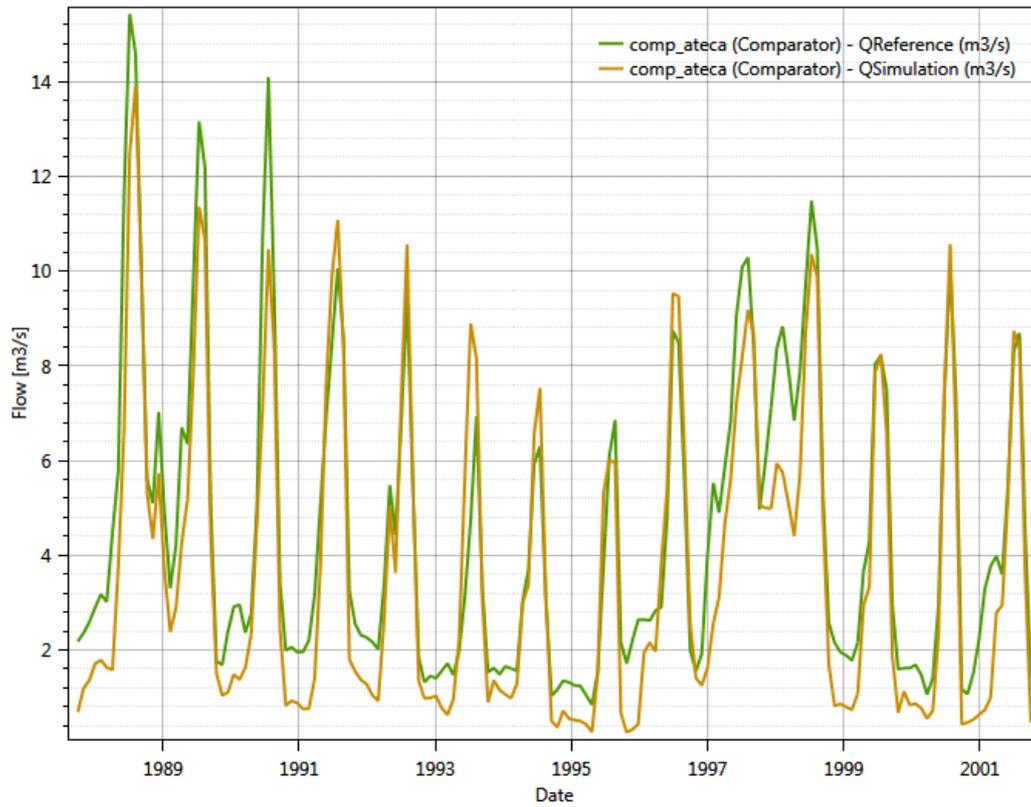


Figura 68. Aportación del río Jalón: Estación Ateca (Calibración)

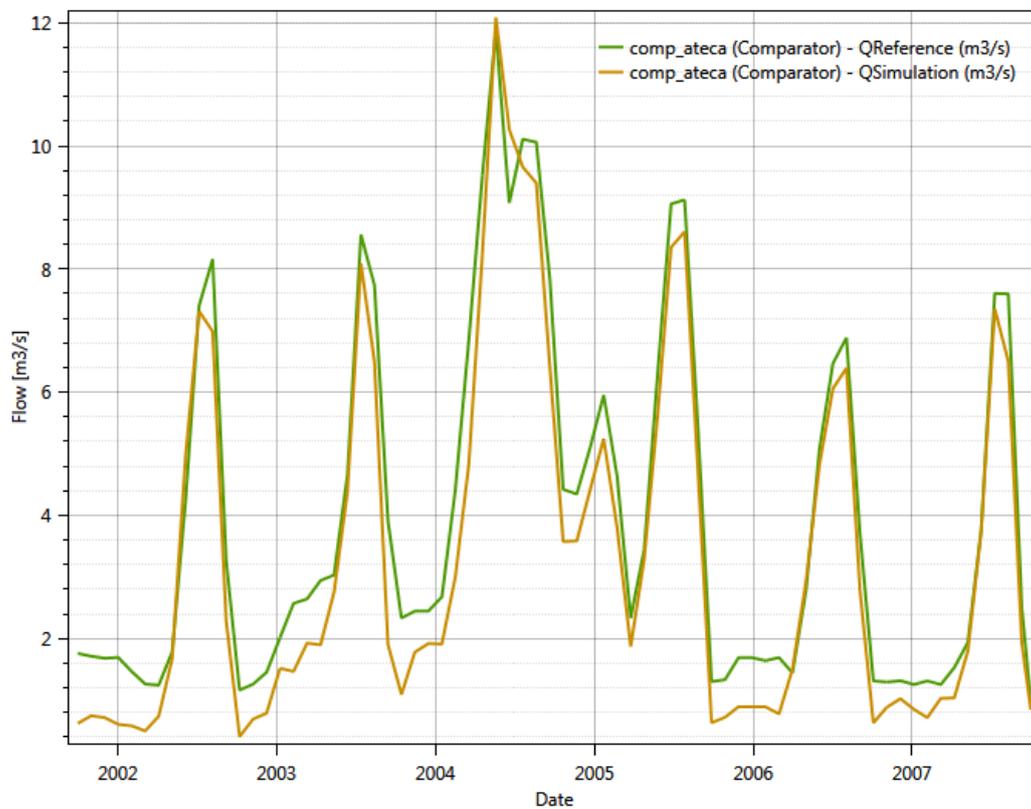


Figura 69. Aportación del río Jalón: Estación de Ateca (Validación)

Tabla 37. Valores Función Objetivo: Estación de Ateca

CALIBRACIÓN (1987 - 2001)		VALIDACIÓN (2001 - 2007)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.8246	Índice de Nash	0.9205
Nash-In	0.3861	Nash-In	0.6496
Coef. Pearson	0.9442	Coef. Pearson	0.9850
Bias	0.9529	Bias	0.9646
F objetivo	0.7770	F objetivo	0.8799

6.6.6. Río JALÓN: Estación de aforo Calatayud (Seltas E. Tranquera, Sistema Jiloca, Sistema Manubles, Estación ROEA 9126, UNIDAD 804, UNIDAD 910)

El río Jalón en este punto de análisis considera las aportaciones de la mayor parte de los sistemas que constituyen el sistema hidrográfico del Jalón, es aquí donde se encuentra la confluencia del sistema Jiloca en conjunto con el sistema Manubles, sistema Piedra (Aporte más significativo vienen dado por las suelta del embalse la Tranquera), y del margen izquierdo del sistema Jalón en el cual se debe hacer mención a las sueltas dadas por el embalse de Monreal Ariza. Las aportaciones resultantes de los sistemas antes mencionadas son registradas por la estación R.O.E.A 9126 comprendiendo una superficie de explotación de 6841km². De acuerdo al plan Hidrológico en este trayecto se encuentra localizado la depuradora de Ateca la cual es la responsable de mejorar la calidad de las aguas.

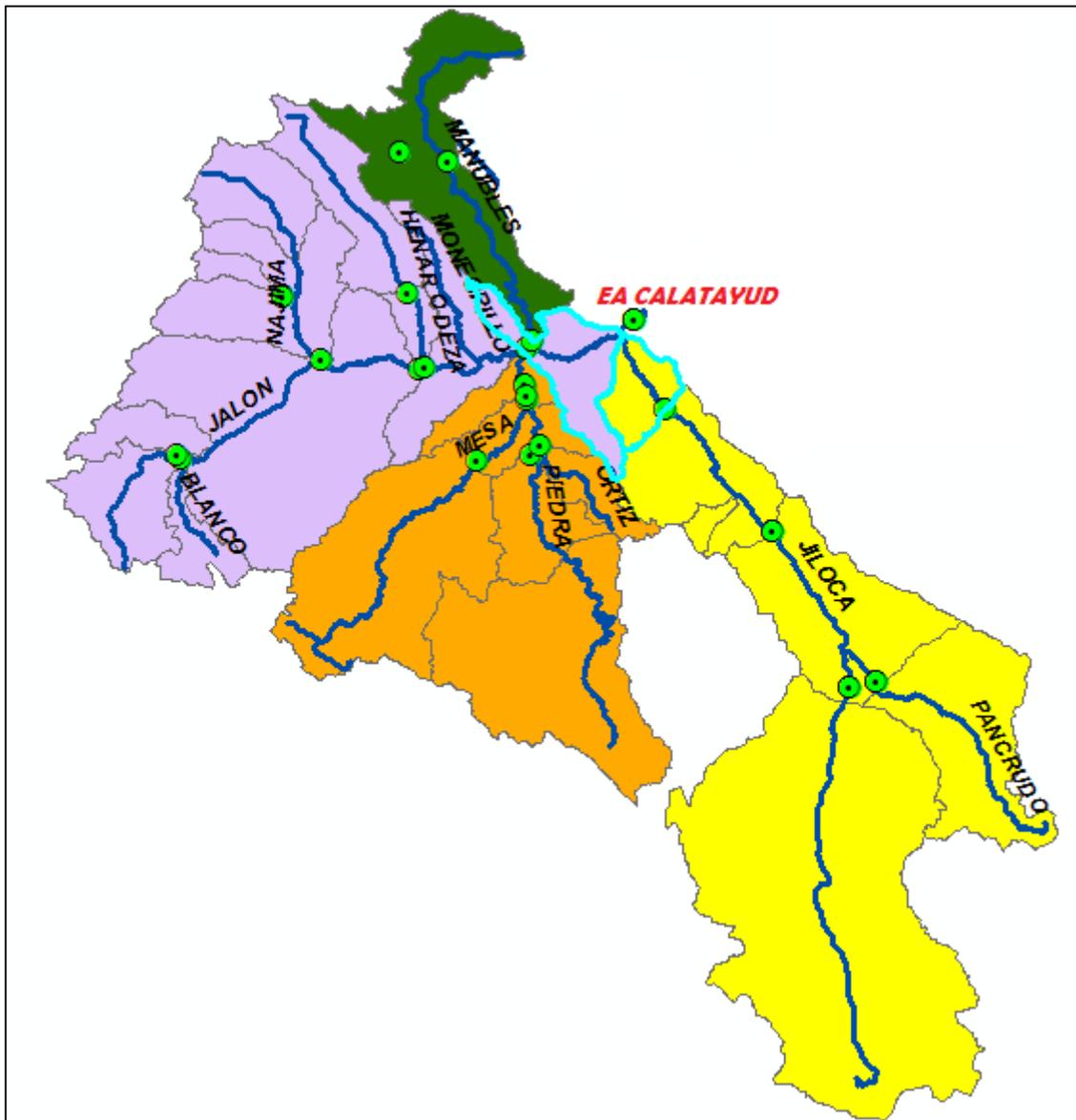


Figura 70. Subcuencas del Río Jalón (Estación de Aforo Calatayud).

El período de calibración y validación se lo ha realizado entre los años 1994-2007, hay que señalar que estos períodos no se los han realizado en los rangos acostumbrados en los análisis anteriores debido a que los registros históricos de la estación R.O.E.A 9126 cuentan con datos a partir del año hidrológico de 1993 y es por esta razón que se procedió a calibrar 7 años (1994-2001) y validarlo posteriormente en 6 años (2001-2207). En este proceso de calibración/validación se han incluido las demandas urbanas y agrarias que exige la zona, las detracciones más importantes son aquellas que derivan para los cultivos de maíz en la localidad de Terrer, y la demanda que exige la comunidad de Calatayud para el desarrollo normal de la urbe, en conjunto estas demandas son del orden de $8.6 \text{ Hm}^3/\text{año}$. En este punto al igual que en la Estación R.O.E.A 9119 se ven influenciados por el efecto de regulación del

embalse de la Tranquera situado en el Sistema Piedra. A continuación se muestra las condiciones iniciales y parámetros empleados en el desarrollo del modelo:

Tabla 38. Parámetros empleados en la modelación de la Estación Calatayud

Condiciones Iniciales	Valor	Subcuencas	Estación Calatayud	
HsnowIni (m)	0	Área	274	Km ²
WHIni (Adim)	0	Parámetro	Valor	
HumIni (m)	0.0501	Beta	1.9134	Adim
SUIni (m)	0.0001	FC	0.4712	m
SLIni (m)	0.0001	PWP	0.3136	m
		SUMax	0.0871	m
		Kr	0.0871	1/d
		Ku	0.3066	1/d
		Kl	0.0249	1/d
		Kperc	0.4840	1/d

Los resultados derivados del modelo muestran que los valores de la función objetivo (Ver Tabla 39) del proceso de calibración adoptan valores que indican que la simulación representa efectivamente los procesos hidrológicos del sistema en estudio. Este se corrobora con los resultados de la función objetivo resultante de la validación que demuestra que el ajuste de los valores simulados respecto a los observados es bueno. Las gráficas resultantes del modelo (Figura 71 y Figura 72) no evidencian lo contrario en ellas claramente se observa el buen ajuste en gran parte de los datos simulados sobre todo de los picos altos dando como resultado Índices de Nash elevados, al mismo se aprecia que no existe una subestimación de los caudales bajos. Al estar gobernado el sistema por el efecto de la regulación del embalse de la Tranquera, gran parte de las aportaciones (laminaciones de caudal) que se registran en la estación R.O.E.A 9126 se encuentran influenciados por las sueltas del embalse, siendo de esta manera un caudal conocido y relevante el cual resta importancia a las aportaciones de los pequeños subsistemas de explotación que se consideran para la calibración, a pesar de ello hay que indicar que el flujo más representativo de estos subsistemas son de tipo subterráneo (QI) y que no existe presencia de escorrentía directa en estas zonas (Unidad 804 ,Unidad 910).

Los valores adoptados por los parámetros objeto de calibración demuestran que cuando las funciones objetivo son buenas no se tiene mayor problema respecto a los parámetros PWP y

FCP. Claramente se observa que la capacidad de campo se encuentra por encima del punto de marchitez de las plantas, respecto a los coeficientes de flujo base, superficial y subterráneo, estos mantienen el sentido físico del proceso hidrológico.

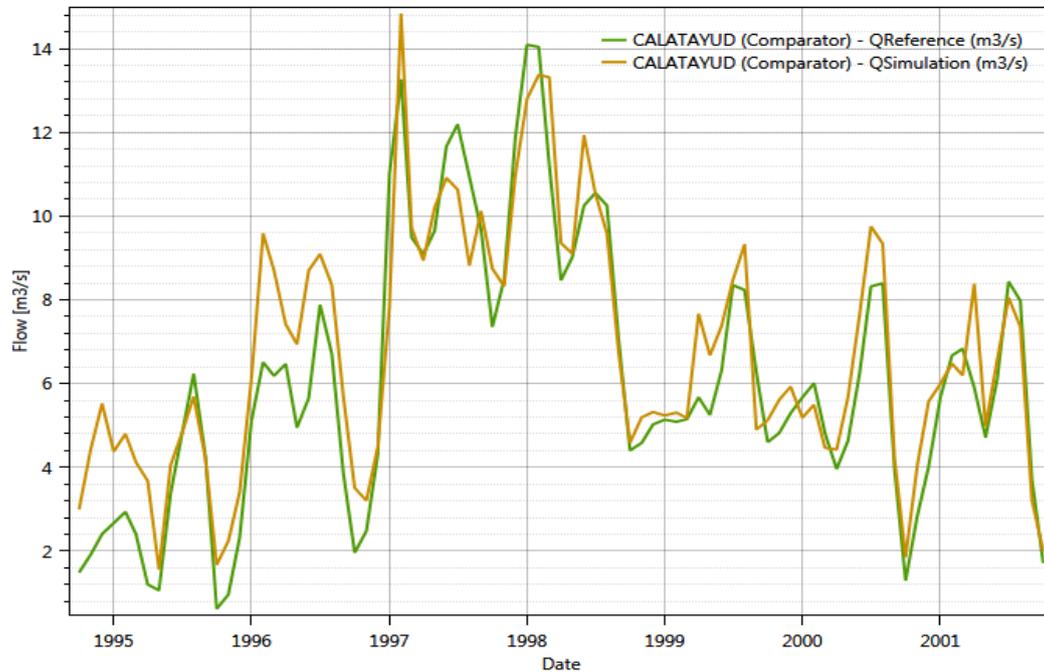


Figura 71. Aportación del río Jalón: Estación Calatayud (Calibración)

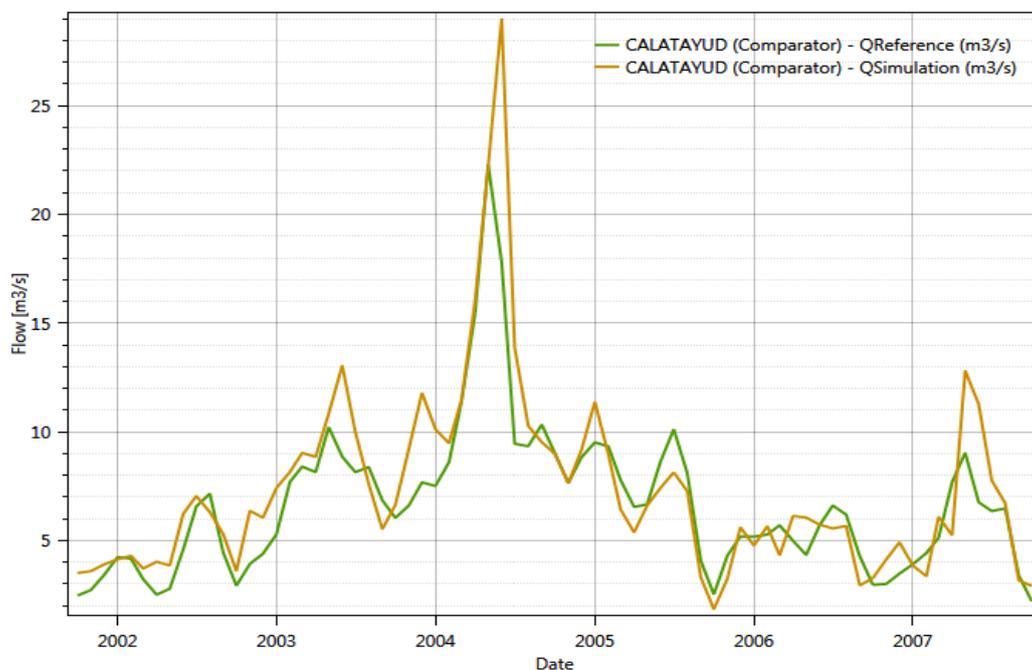


Figura 72. Aportación del río Jalón: Estación de Calatayud (Validación)

Tabla 39. Valores Función Objetivo: Estación de Calatayud

CALIBRACIÓN (1994 - 2001)		VALIDACIÓN (2001 - 2007)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.8116	Índice de Nash	0.7728
Nash-In	0.8420	Nash-In	0.7246
Coef. Pearson	0.9179	Coef. Pearson	0.9127
Bias	0.9906	Bias	0.9937
F objetivo	0.8905	F objetivo	0.8510

6.6.7. Río JALÓN: Estación de aforo Chodes (Salida Embalse La Tranquera, Sistema Jiloca, Sistema Manubles, Estación ROEA 9266, UNIDAD 806, 817, 819)

La estación de aforo R.O.E.A 9127 es la que se encarga de la medición de caudales una vez que se tiene la confluencia del Sistema Jiloca, Piedra, Manubles, del margen izquierdo del sistema Jalón y a su vez de las aportaciones resultantes de las subcuencas del río perejiles y ribota. La estación Chodes constituye el penúltimo control de caudales previó a la desembocadura final en el gran Ebro. En esta únicamente se excluye las aportaciones del Sistema Aranda, mismas que serán consideradas en el análisis final del sistema de explotación. Las aportaciones que tienen lugar en la cuenca provienen de una superficie que se extiende a lo largo de 7561 km². En base al plan hidrológico, las mediciones respecto al cumplimiento de caudal ecológico únicamente se han llevado a cabo en los últimos años, en estos se determina que los incumplimientos en esta zona son poco frecuentes.

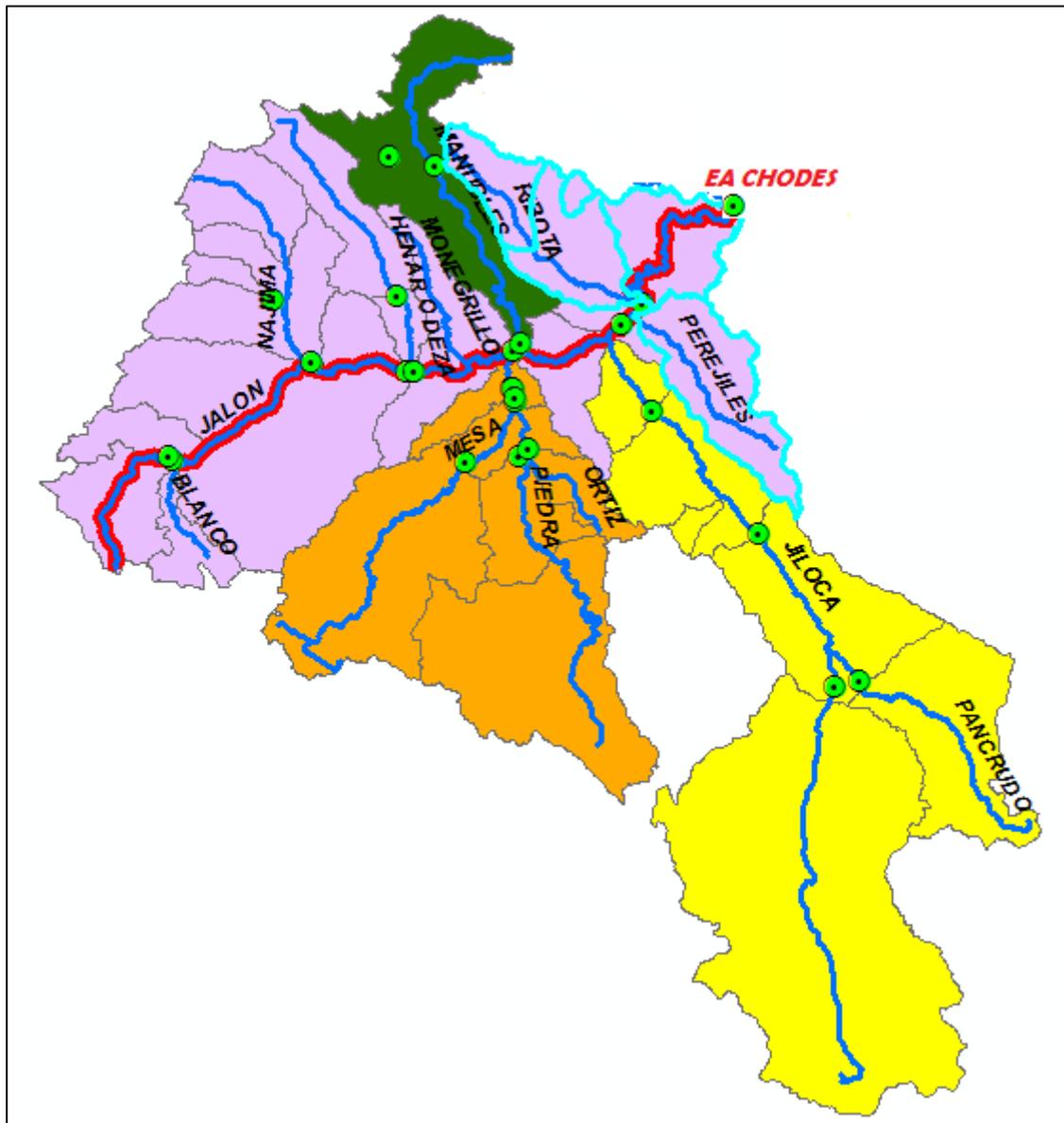


Figura 73. Subcuencas del Río Jalón (Estación de Aforo Chodes).

La calibración y validación del modelo se lo ha realizado en el período 2000-2007 dado que la estación Chodes entró en funcionamiento a partir del año 2000. Por tal motivo se ha optado por calibrar el modelo para 5 años y validarlo en los posteriores 3 años. En este proceso de análisis se han considerado tanto demandas urbanas como industriales. Las principales presiones bajo las cuales se encuentra sometida esta zona de análisis corresponden a aprovechamientos hidroeléctricos, regadíos y alteraciones morfológicas que se producen por la presencia de azudes. A continuación se muestra las condiciones iniciales y parámetros calibrados en el modelo:

Tabla 40. Parámetros empleados en la modelación de la Estación Chodes

Condiciones Iniciales	Valor	Subcuencas	Estación Chodes
HsnowIni (m)	0	Área	190 Km ²
WHIni (Adim)	0	Parámetro	Valor
HumIni (m)	0.0473	Beta	1.4441 Adim
SUini (m)	0.0000	FC	0.4432 m
SLIni (m)	0.0009	PWP	0.3089 m
		SUMax	0.0596 m
		Kr	0.3064 1/d
		Ku	0.0642 1/d
		Kl	0.0023 1/d
		Kperc	0.3704 1/d

La etapa de calibración muestran un buen ajuste del modelo, como se puede visualizar en la Figura 74 los datos simulados tienden a representar idóneamente los datos observados. El valor de la función objetivo (ver Tabla 41) respecto a la calibración toma valores que se consideran elevados demostrando de esta manera la eficiencia del modelo, sin embargo hay que hacer hincapié al momento de la validación ya que al considerar tan solo 3 años este no tiende a estabilizarse adecuadamente mostrando deficiencias al momento de representar los picos altos y bajos, viéndose afectado en especial durante los primeros meses de la simulación, dando como resultado un Índice de Nash relativamente bajo, a pesar de esta situación la representación no se aleja de la realidad y por tal motivo el resultado global de la función objetivo (etapa validación) toma valores que se encuentran en un rango que se pueden considerar aceptables. Dado que los caudales registrados en esta estación comprende datos históricos a partir del año 2000, estos no se corresponden de manera general a las subcuencas calibradas anteriormente, las cuales en general fueron calibrados durante el intervalo (1987-2001) y validados en el periodo (2001-2007). Respecto a los parámetros (FCP, PWP y coeficientes) cumplen las restricciones impuestas sin mayor problema.

En las unidades 816,817 y 819 los flujos bases (subterráneos) son los que caracterizan a las subcuencas, no tiene lugar propagación directa de escorrentía a través de la superficie, siendo el valor de SU tan pequeño que no sobrepasa los niveles máximos (SUMax). Existen aportaciones de flujo subsuperficial (Qu) que no representan mayores aportes.

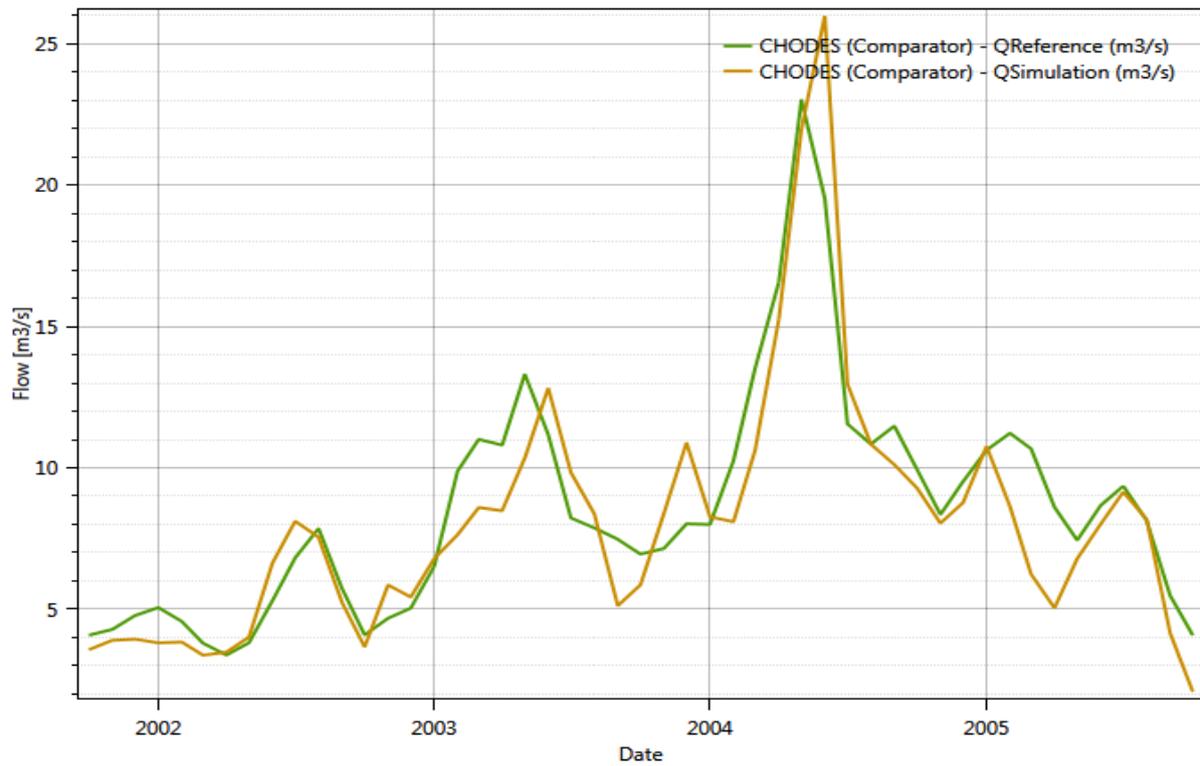


Figura 74. Aportación del río Jalón: Estación Chodes (Calibración)

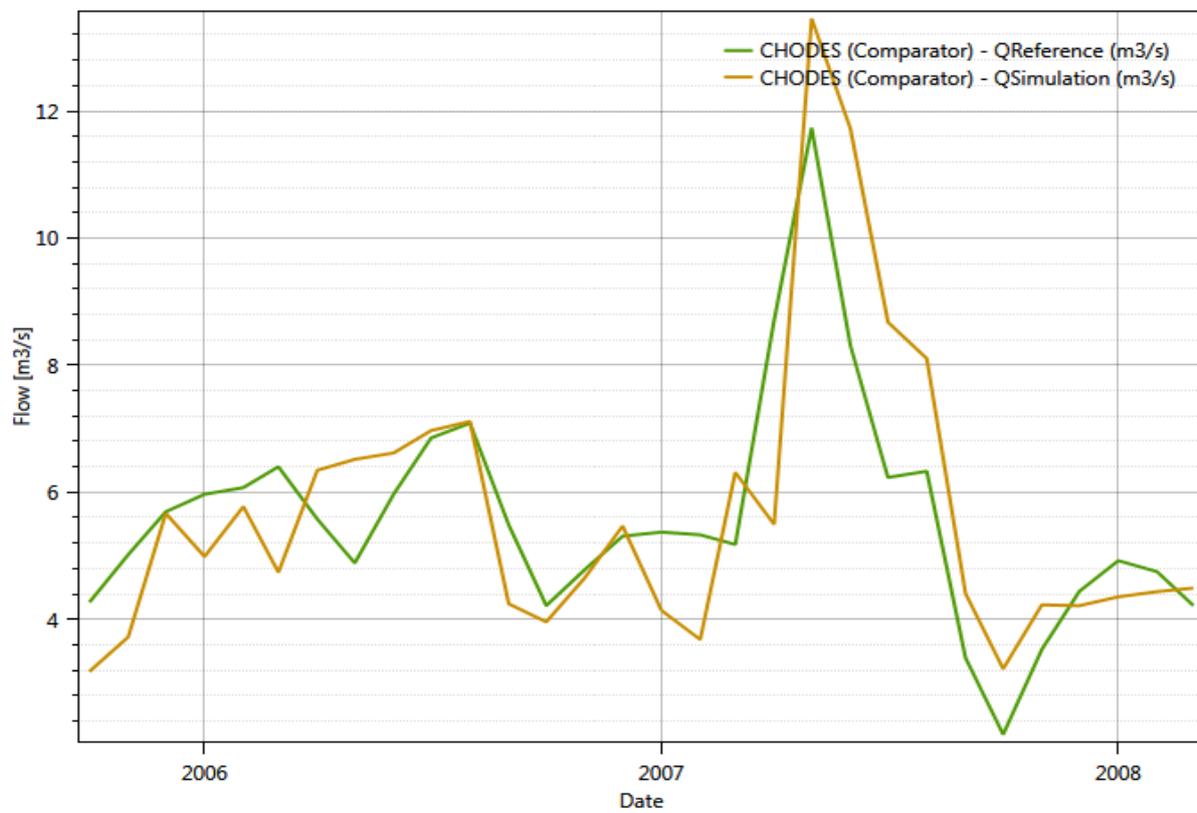


Figura 75. Aportación del río Jalón: Estación de Chodes (Validación)

Tabla 41. Valores Función Objetivo: Estación de Chodes

CALIBRACIÓN (2000 - 2005)		VALIDACIÓN (2005 - 2008)	
Función Objetivo	Valor	Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.7813	Índice de Nash	0.4011
Nash-In	0.7312	Nash-In	0.4571
Coef. Pearson	0.9154	Coef. Pearson	0.8120
Bias	0.9938	Bias	0.9997
F objetivo	0.8554	F objetivo	0.6675

6.6.8. Desembocadura Río JALÓN: Estación de aforo Grisen (Sistema Aranda, Jiloca, Manubles, Jalón, Unidades 807, 821, 822, 824, 825,827)

El tramo final de la subcuenca del río Jalón el cual ha sido objeto de estudio, se lo estudiará a partir de la confluencia del río Grío el cual no cuenta con una estación de aforo para la medición del caudal circulante, en el análisis también se considera las aportaciones provenientes del sistema Aranda en el cual se hace mención a las sueltas procedentes del Embalse Maidevera y en este a su vez se consideran las subcuencas del sistema que no habían sido calibradas debido a la ausencia de estaciones de aforo, estas subcuencas adoptarán valores de las subcuencas adyacentes con el fin de contar con menor número de variables al momento de la calibración de las subcuencas aportantes en el tramo final del sistema Jalón.

Este punto comprende el análisis en su totalidad del sistema de explotación del Jalón en él se ha considerado todos los sistemas (Jiloca, Piedra, Manubles, Aranda, margen izquierda del sistema Jalón) los cuales habían sido calibrados y validados anteriormente, es decir que este constituye el modelo completo de precipitación/escorrentía para la cuenca del río Jalón.

Las aportaciones resultantes del sistema en conjunto antes de desembocar en el río Ebro son registradas por la estación R.O.E.A 9117 comprendiendo una superficie de explotación de 9718 km². De acuerdo al plan Hidrológico en base a los datos que se tienen en la estación se puede concluir que los incumplimientos del caudal ecológico son frecuentes.

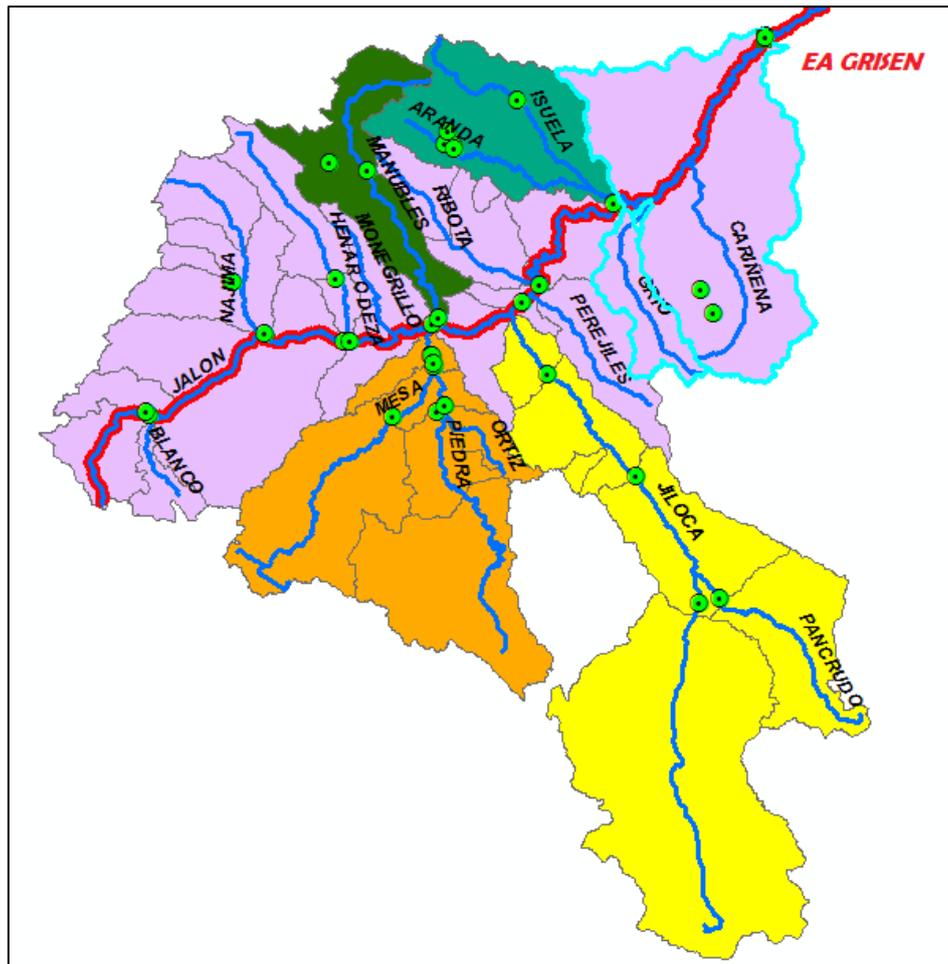


Figura 76. Desembocadura del Río Jalón (Estación de Aforo Grisen).

La calibración se ha llevado a cabo en el período 1987-1998 mientras que la validación entre los años (2004-2007) todo esto debido a la inexistencia de datos en ciertas estaciones de aforo por lo que el periodo 1998-2004 no ha sido considerado en este punto de análisis. Las principales detracciones de agua en el tramo final del sistema corresponde principalmente a la presencia de azudes, además este tramo se caracteriza por las importantes superficies regadas con aguas superficiales, éstas comprenden un total de 13800 ha aproximadamente. A continuación se muestra las condiciones iniciales y parámetros que fueron calibrados en el modelo:

Tabla 42. Parámetros empleados en la modelación de la Estación Grisen

Condiciones Iniciales		Subcuencas Desembocadura Jalón		
HsnowIni (m)	0	Área	1674	Km ²
WHIni (Adim)	0	Parámetro	Valor	
HumIni (m)	0.0000	Beta	4.4811	Adim
SUini (m)	0.0000	FC	0.5033	m
SLini (m)	0.0000	PWP	0.2700	m
		SUMax	0.0249	m
		Kr	0.2700	1/d
		Ku	0.0270	1/d
		Kl	0.0540	1/d
		Kperc	0.1459	1/d

En vista a los resultados mostrados por la función objetivo (ver Tabla 43) y mediante la observación gráfica de la calibración y validación (Figura 77 y Figura 78), se indica que los parámetros obtenidos en el proceso de calibración además de que cumplen con los criterios físicos establecidos con anterioridad representado de forma lógica los procesos hidrológicos que se producen en la cuenca, estos dan lugar a un modelo de precipitación/escorrentía capaz de representar los caudales observados/registrados en la Estación de Aforo Grisen R.O.E.A 9117. Las gráficas resultantes de la calibración /validación muestran que los datos simulados provenientes de series históricas se adaptan adecuadamente a los datos observados, presentando problemas únicamente al momento de reflejar los aportaciones correspondiente a caudales bajos sobre todo en el período (1991-1995), reflejándose este problema en el valor de Nash-In que es una de las funciones objetivo empleada para evaluar el ajuste del modelo con respecto a los caudales bajos. Al momento de representar los picos altos vemos como el modelo genera aportaciones que sin mayor problema se adaptan a los valores registrados en todo el periodo empleado para el análisis. En el periodo de validación cabe destacar que los parámetros iniciales empleados no son los adecuados, este problema se evidencia en la diferencia existente entre los valores observados y simulados por lo que el índice de Nash en este periodo disminuye considerablemente respecto al período de calibración, este problemas puede ser generado por el salto de años existente entre el periodo de calibración y validación debida a la inexistencia de datos en ciertas estaciones de aforo las cuales imposibilitan un mejor ajuste global del modelo, además cabe resaltar que la función objetivo

disminuyo considerablemente a partir de la estación de aforo de Calatayud (anteúltima EA antes de llegar a desembocadura), FO Calatayud = 0.85 a FO Grisen = 0.65, en la etapa de validación), problema que se presenta en vista a que las estaciones Chodes y Grisen no cuentan con registros completos comprendidos entre los años que generalmente se ejecutó la calibración y validación (1987-2007) para las subcuencas precedentes, es por tal razón que disminuye la eficacia del modelo al comprender distintos periodos de modelación, aumentando de esta manera la incertidumbre del modelo. Sin embargo estos resultados globales de las funciones objetivo indican que el modelo de precipitación/escorrentía desarrollado para este sistema de explotación(Río Jalón) genera aportaciones las cuales pueden ser empleadas para distintos propósitos siendo de utilidad principalmente para la gestión del recurso hídrico a través del sistema.

Por último en base al análisis realizado en la cuenca se observa que se cuenta con tres estructuras de regulación (Embalse la Tranquera, Monteagudo y Maidevera), siendo el más importante por su gran capacidad (85 Hm³) el embalse la Tranquera que es empleado principalmente para satisfacer los regadíos del bajo y medio Jalón.

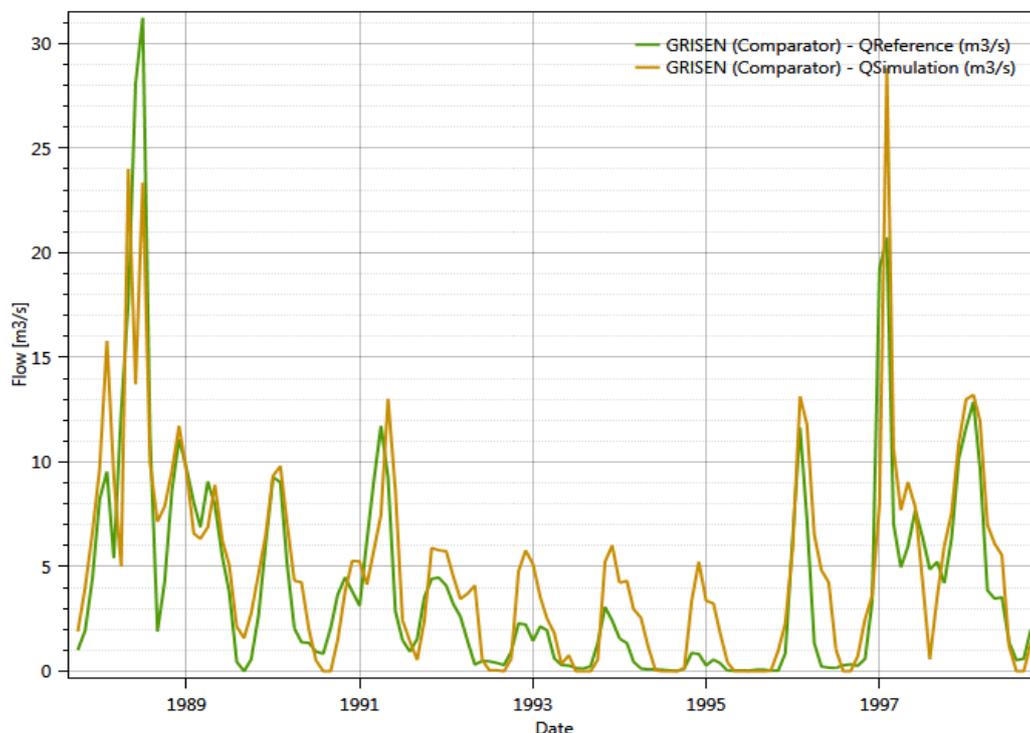


Figura 77. Aportación en la desembocadura del río Jalón: Estación Grisen (Calibración)

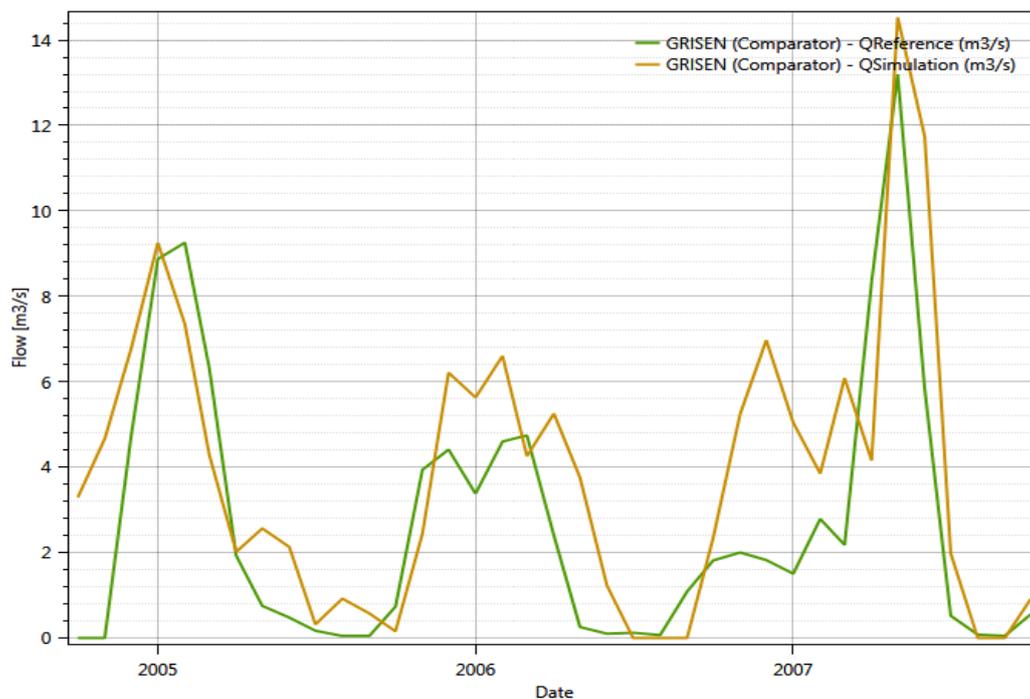


Figura 78. Aportación en la desembocadura del río Jalón: Estación Grisen (Validación)

Tabla 43. Valores Función Objetivo: Estación de Grisen (Etapa de Calibración y Validación)

CALIBRACIÓN (1987 - 1998)	
Función Objetivo	Valor
Índice de Nash	0.6844
Nash-In	0.1035
Coef. Pearson	0.8458
Bias	0.9625
F objetivo	0.8309

VALIDACIÓN (2004 - 2007)	
Función Objetivo	Valor
Indice de Nash	0.4207
Nash-In	0.1023
Coef. Pearson	0.7949
Bias	0.8078
F objetivo	0.6745

6.7. VALORACIONES GENERALES DE LA CALIBRACIÓN

En la Tabla 44 se presenta un resumen detallado de los periodos bajo los cuales se desarrolló calibración y validación para cada una de las subcuencas, además se detalla los resultados de la función objetivo global en base a los cuales se establecieron los juicios críticos para determinar la validez del modelo desarrollado:

Tabla 44: Resumen de las subcuencas calibradas

E AFORO	UNIDAD	PERÍODO CALIBRACIÓN	FO	PERÍODO VALIDACIÓN	FO
SISTEMA JILOCA					
Pancrudo Navarrete	912	1986-2001	0.8001	2001-2006	0.7206
Daroca	908	1986-2001	0.9351	2001-2006	0.8804
Morata	909,911	1986 – 2001	0.6408	2001-2006	0.7495
SISTEMA PIEDRA					
Járaba	905	1987-2001	0.7539	2001-2006	0.6570
Nuévalos	901,902	1984-1997	0.8293	1997-2000	0.7005
Tranquera	906	1987-2001	0.7518	2001-2007	0.7968
SISTEMA MANUBLES					
Ateca	816	1989-2000	0.7900	2000-2006	0.5988
SISTEMA ARANDA					
Trasobares	826	1991-2002	0.6433	2002-2007	0.6535
Maidevera	823	1991-2002	0.7385	2002-2007	0.7758
SISTEMA JALÓN					
Barrio Blanco	813	1996-2003	0.7803	2003-2007	0.8184
Jubera	801	1987-2001	0.8479	2001-2007	0.8565
Monreal Ariza	810,811,812	1990-2002	0.6999	2002-2007	0.7818
Embid Ariza	814	1987-2001	0.6821	2001-2007	0.6432
Ateca	803	1987-2001	0.777	2001-2007	0.8799
Calatayud	804,910	1994-2001	0.8905	2001-2007	0.8510
Chodes	806,817,819	2000-2005	0.8554	2005-2008	0.6675
Grisen	807,821,822, 824,825,827	1987-1998	0.8309	2004-2007	0.6745

A modo general puede comentarse que el modelo de precipitación/escorrentía desarrollado para cada una de las subcuencas representa adecuadamente los procesos hidrológicos que tienen lugar en la cuenca, en la mayoría de las estaciones de aforo donde se cuentan con registros históricos continuos y confiables se presentan buenos resultados, como resultado de esto tenemos en la mayoría de las subcuencas valores de las funciones objetivo en la etapa de calibración por encima de 0.7, lo que indica que la representación de los datos del modelo presentan cierta aproximación a la realidad siendo por tal motivo útiles para la gestión de los recursos hídricos.

Salvo ciertos casos especiales (Trasobares: Cuenca del río Isuelas, Ateca: Cuenca del río Manubles, Embid Ariza: cuenca del río Henar) se obtuvieron resultados que dan lugar a cierto grado de incertidumbre ($FO < 0.7$) sin embargo las aportaciones generadas en estas subcuencas no representan grandes aportaciones a nivel general, dado que la mayor parte de las aportaciones que se registran en desembocadura dependen en gran tamaño de las sueltas del embalse de la Tranquera (embalse de mayor capacidad en el sistema de explotación del Jalón), el cual regula las aportaciones del Sistema Piedra.

Por tanto a partir de las validaciones desarrolladas para cada una de las subcuencas se puede dar como validado el modelo desarrollado. Este reproduce eficientemente los caudales de las series históricas analizadas salvo ciertos puntos donde la calidad de los datos no fue adecuado o no se contaba con ciertos períodos de registros que en los modelos precedentes fueron comunes afectando de esta manera la continuidad del modelo y disminuyendo de cierta forma los valores de la función objetivo. Esto se observa principalmente en la calibración de las series históricas de las estaciones de aforo de Chodes y Grisen (localizadas a pocos kilómetros de desembocadura del sistema de explotación del río Jalón). En el caso de Chodes la escasez de datos involucró que las subcuencas aportantes sean calibradas a partir del año 2000, años donde normalmente sus modelos precedentes eran validados, la validación al realizarse en tres años no tuvo el tiempo suficiente para estabilizarse y como consecuencia de ello se observó una disminución considerable de la FO (de 0.8510 a 0.6675). Algo similar ocurrió en la EA Grisen donde la ausencia de registros durante el periodo 1998-2004 no permitió que la calibración y validación del modelo se realice en años consecutivos, ocasionando que las condiciones iniciales jueguen un papel importante en la modelación es aquí donde se tienen

los mayores errores de estimación y consecuentemente disminuyendo la FO e incrementando la incertidumbre del modelo.

En la Tabla 45 se muestran los parámetros característicos resultado de la calibración para cada zona de estudio, en ellos se especifica un rango mínimo y máximo de valores resultantes del análisis individual para cada subcuenca, mientras que en la Figura 79 se observa el modelo creado mediante el software RS MINEVE.

Tabla 45. Resumen de la parametrización para cada sistema de explotación del río Jalón.

SISTEMA	PARÁMETROS															
	Beta		FC		PWP		SUMax		Kr		Ku		Kl		Kperc	
	Adim		m		M		M		1/d		1/d		1/d		1/d	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
JILOCA	1.9933	4.1923	0.1847	0.5494	0.0642	0.3070	0.0087	0.0156	0.2701	0.3507	0.1162	0.2275	0.0025	0.1270	0.1974	0.4047
PIEDRA	1.0932	2.7005	0.1341	0.4622	0.1334	0.4396	0.0111	0.0997	0.0524	0.2560	0.0101	0.0104	0.0015	0.0038	0.0707	0.4947
MANUBLES	1.2758	1.2758	0.2656	0.2656	0.1159	0.1159	0.0326	0.0326	0.3291	0.3291	0.1278	0.1278	0.0110	0.0110	0.0996	0.0996
ARANDA	1.0000	2.1792	0.0715	0.2036	0.0495	0.1680	0.0445	0.0831	0.2133	0.2271	0.0142	0.0619	0.0086	0.0174	0.0004	0.2245
JALÓN	1.4003	4.4812	0.1159	0.6483	0.0972	0.5497	0.0250	0.0871	0.0871	0.3424	0.0123	0.3067	0.0023	0.0541	0.1460	0.6394

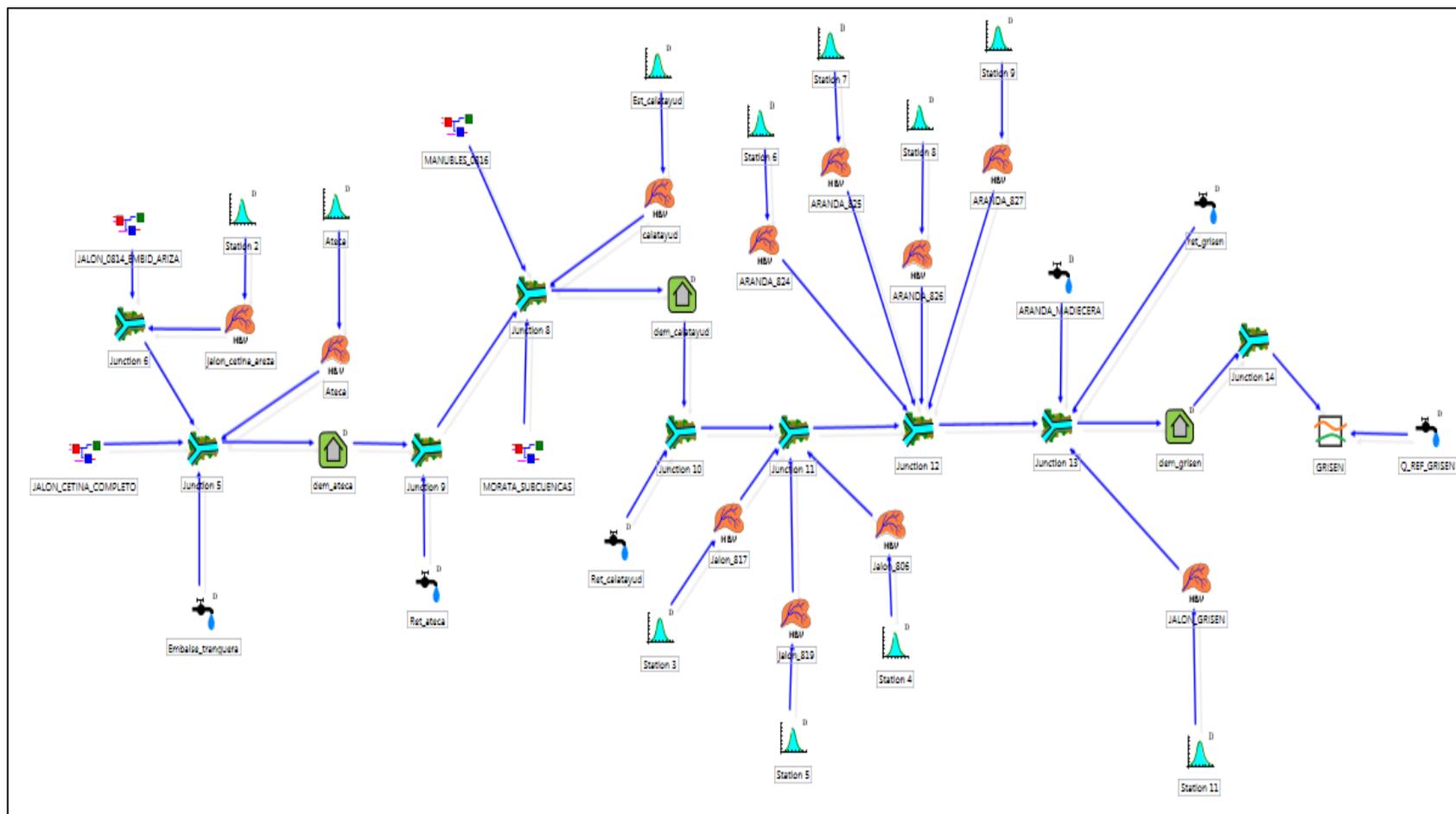


Figura 79. MPE desarrollado para el sistema de explotación del río Jalón.

7. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LAS SERIES OBTENIDAS CON EL MODELO SIMPA

Una de las primicias en el desarrollo de esta tesis, ha sido realizar un análisis a través del cual se tenga un conocimiento más detallado de la gestión de los recursos en la cuenca. Una vez conocido en cierto grado la naturaleza y el comportamiento de la zona mediante la aplicación del modelo HBV, a partir de las respuestas (aportaciones) obtenidas en cada sistema mediante el software Rs Minerve, ahora lo que se pretende a continuación es compararlas con las aportaciones resultantes del modelo SIMPA (Simulación Precipitación-Aportación), desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), que es el modelo que emplea la Confederación Hidrográfica del Ebro para la gestión y evaluación de los recursos hídricos en régimen natural.

El modelo SIMPA se emplea generalmente por todas las confederaciones hidrográficas para la evaluación de los recursos hídricos a escala mensual y se utiliza para actualizar la situación de los recursos como parte de los trabajos del seguimiento en base al Plan de cuenca establecido.

7.1. SERIE DE APORTACIONES

La comparación de las series de aportaciones como en el caso de la calibración y validación se lo realizará en base a los sistemas establecidos por la confederación hidrográfica, por lo que se estudiará las aportaciones totales en los 5 sistemas. Jiloca, Piedra, Manubles, Aranda y Jalón.

El sistema Jalón corresponde al sistema de explotación global, es aquí donde se tiene la confluencia de todos los sistemas objeto de análisis, permitiendo evaluar las aportaciones totales que se derivan del modelo SIMPA con las aportaciones resultantes del modelo HBV a partir de Rs Minerve.

7.1.1. Aportaciones del Sistema Jiloca.

En este apartado se abordará las aportaciones en régimen natural de las cabeceras del río Jiloca en el cual se tiene la confluencia de la cabecera del río Pancrudo, las aportaciones resultantes de su confluencia serán evaluadas hasta la altura de la EA de Morata que corresponde a la última estación de aforo previo a su desembocadura en el río Jalón. La superficie en estudio abarca 2502 km².

En la Figura 80 se muestra una gráfica comparativa entre las aportaciones mensuales en régimen natural determinados por la Confederación Hidrográfica de Ebro a partir del modelo SIMPA y las aportaciones que se obtienen a partir del modelo HBV (Rs Minerve) para la serie hidrológica comprendida entre 1980-2006.

En base al análisis se observa que las aportaciones obtenidas a partir de los 2 modelos en lo que tiene que ver a la forma siguen un mismo patrón sin embargo éstas varían en magnitud, las aportaciones del modelo SIMPA para todo el período analizado se encuentra por encima de las obtenidas en Rs Minerve con el modelo HBV, la diferencia máxima de estimación (18.33 Hm³/mes) tiene lugar en mayo del año hidrológico 2002. En vista a lo observado y dado que HBV representa mejor los procesos que se desarrollan en el la subcuenca al emplear más parámetros de modelación y ser más exacto al momento de realizar las estimaciones, se deduce que SIMPA tiende a sobrestimar las aportaciones, a pesar que los valores obtenidos en la mayor parte de la serie se corresponden entre sí, existen puntos en los que la diferencia de caudales estimados es importante, lo que puede desencadenar problemas de gestión del recurso, es importante siempre encontrarse del lado de la seguridad para no generar posibles déficits en el suministro de las demandas.

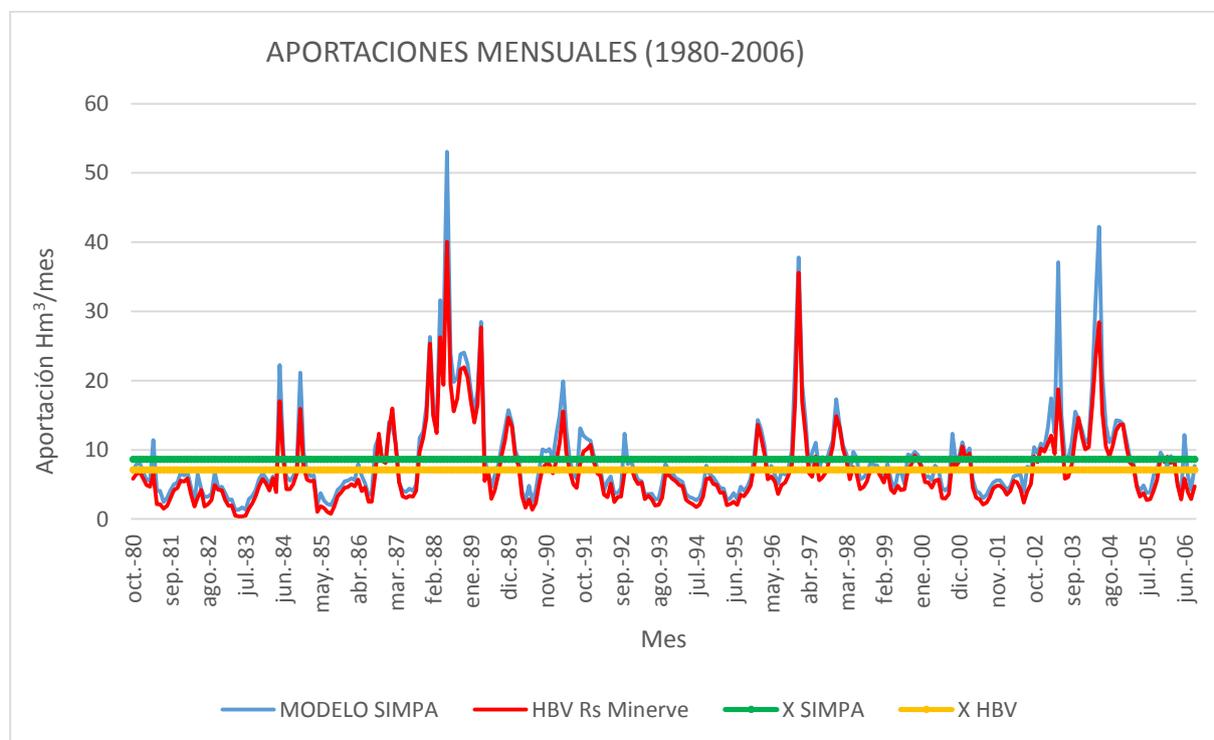


Figura 80. Aportaciones mensuales sistema Jiloca

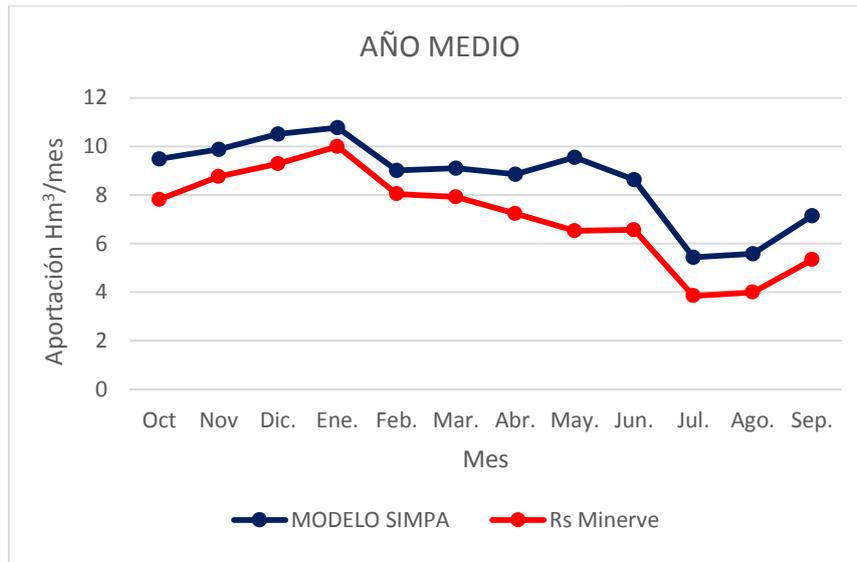


Figura 81. Aportaciones medias sistema Jiloca

La Figura 81 correspondiente al año medio en los dos casos representa lógicamente lo que es de esperarse que se suceda en la vida real, en base al modelo SIMPA para los meses correspondientes a invierno se observa como el caudal asciende progresivamente encontrando su pico máximo en el mes de enero ($10.77 \text{ Hm}^3/\text{mes}$), es aquí donde empieza un descenso y posteriormente un pequeño ascenso en los meses primaverales que es a partir del cual se tiene un descenso importante de las aportaciones llegando a un mínimo de $5.43 \text{ Hm}^3/\text{mes}$ para el mes de julio, que corresponde prácticamente a la reducción del 50% respecto a la máxima aportación. Esta gráfica pone una vez más de manifiesto la sobrestimación de los caudales realizados por SIMPA, siendo la diferencia media máxima de $3.08 \text{ Hm}^3/\text{mes}$ para el mes de mayo. Esta sobreestimación de caudal en algunos casos puede dar lugar a problemas durante la asignación de recursos lo que deriva en la generación de fallos en el sistema. El modelo HBV empleado en el desarrollo de esta tesis tiende a realizar un análisis más exhaustivo enfocándose en las características más relevantes de la estructura y topología del terreno que influye en los procesos hidrológicos para la generación de escorrentía, siendo por consiguiente más preciso a la hora de estimar las aportaciones y reproduciendo a la vez con mayor exactitud el comportamiento de la cuenca.

Tabla 46. Medidas estadísticas de las Aportaciones Anuales: Sistema Jiloca

MEDIDA ESTADÍSTICA	MODELO SIMPA (Hm ³ /mes)	MODELO HBV (Hm ³ /mes)
Media	8.66	7.11
Desviación Estándar	6.53	5.45
Percentil 50	6.75	5.56
Percentil 75	10.41	8.81

En lo que respecta a las medidas estadísticas se observa que las medias de las aportaciones mensuales no difieren en gran proporción una respecto a otra, 8.66 Hm³/mes para el modelo SIMPA y 7.10 Hm³/mes para el modelo HBV. En cuanto al percentil 50 tenemos que el 50% de los caudales estimados en SIMPA se encuentran por debajo de 6.75 Hm³/mes, mientras que los de HBV son menores a 5.56 Hm³/mes.

7.1.2. Aportaciones del Sistema Piedra.

En este punto se compararán las aportaciones que constituyen la entrada al embalse la Tranquera, el cual es el principal elemento regulador del sistema del Jalón. Se tienen principalmente 3 subcuencas aportantes que son: el río Mesa, río Ortiz, río Piedra. Para realizar este cometido se tomarán los caudales en régimen natural que llegan hasta el punto donde se encuentran ubicadas las estaciones de aforo que se indican a continuación: EA 9056 JARABA, EA 9008 NUÉVALOS, EA 9129 TRANQUERA C.E, estas en conjunto comprenden una área de explotación de 1356 km².

La comparativa de las aportaciones se visualiza en la Figura 82, en esta se evidencia que en la mayor parte de la serie estudiada (1983-2006) las aportaciones provenientes del modelo SIMPA se encuentran por encima de los valores obtenidos en el modelo HBV. Se observa que las aportaciones varían significativamente cuando se tienen picos altos de caudales, la diferencia máxima que se tiene es del orden de 22.30 Hm³/mes en el año hidrológico de 1997. Respecto a los caudales bajos se observa una buena correspondencia entre las respuestas generadas en los dos modelos no existiendo una mayor diferencia entre los datos obtenidos en la simulación, existen puntos (oct-82, oct-83, oct-2004) donde se evidencia una diferencia del orden de 2.50 Hm³/mes, sin embargo se puede decir que ambos modelos tienden a representar los caudales bajos de forma similar indicando que representan en gran parte adecuadamente cuando se tienen escasos recursos en el medio.

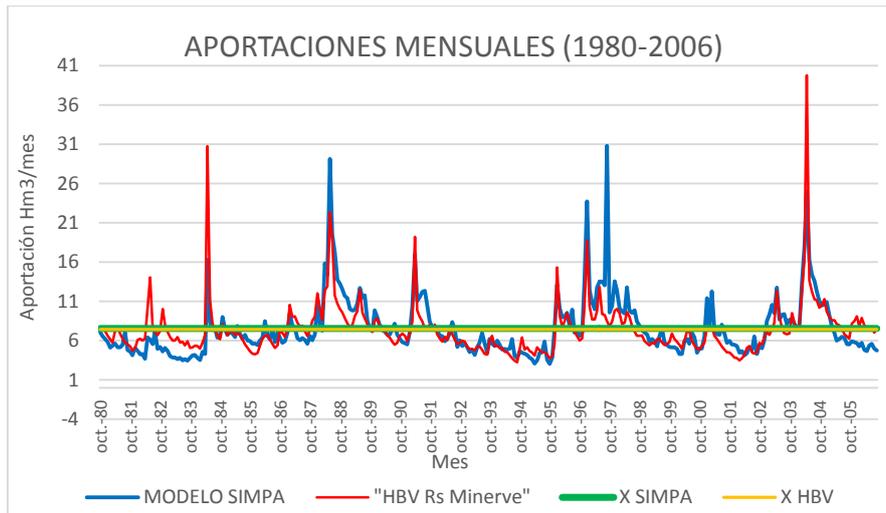


Figura 82. Aportaciones anuales sistema Piedra

Respecto al año medio, Figura 83, vemos que para los meses de Octubre a Marzo la estimación media por parte de los 2 modelos es prácticamente la misma, una diferencia marcada se tiene a partir de abril, las aportaciones de HBV aumentan ligeramente encontrando un pico máximo en el mes de mayo (9.95 Hm³/mes), y es a partir del mes de Junio y para todos los meses estivales (verano) que la aportación tiende a disminuir como era de esperarse y adoptando estimaciones que se encuentran por debajo de las establecidas en SIMPA, encontrando su mínimo en el mes de septiembre (6.34 Hm³/mes) lo que indica una disminución del recurso respecto al mes de mayor aportación de 63.71%.

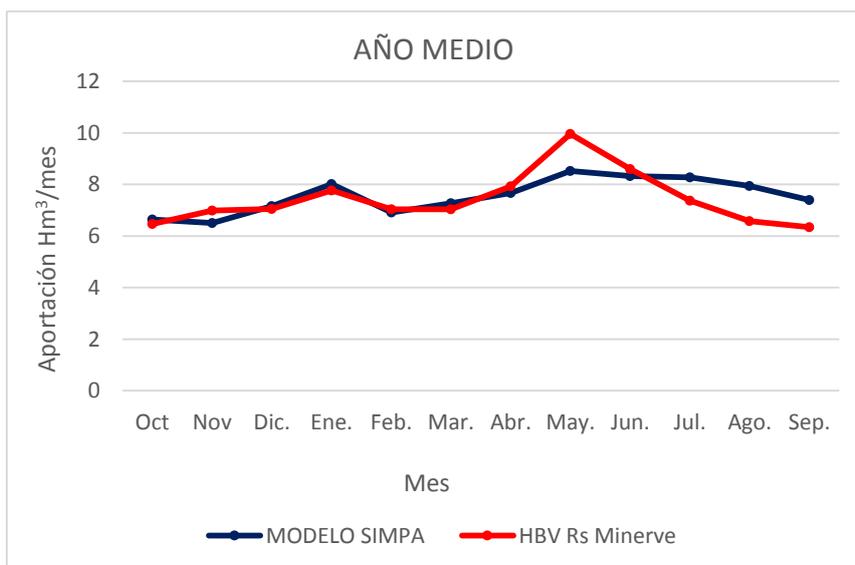


Figura 83. Aportaciones medias sistema Piedra

Tabla 47. Medidas estadísticas de las Aportaciones Anuales: Sistema Piedra

MEDIDA ESTADÍSTICA	MODELO SIMPA (Hm ³ /año)	MODELO HBV (Hm ³ /año)
Media	7.55	7.43
Desviación Estándar	3.72	3.42
Percentil 50	6.52	6.79
Percentil 75	8.69	8.24

Las medidas estadísticas muestran que la media de las aportaciones el modelo SIMPA no se encuentra por lejos de la media resultante del modelo HBV (7.55 y 7.42 Hm³/mes respectivamente), y el percentil 75 para ambos casos del modelo SIMPA indican que el 75% de las aportaciones se encuentran por debajo de 8.6 Hm³/mes aproximadamente, mientras que el percentil 50 indica que el 50% de las aportaciones estimadas de igual manera en los 2 modelos se encuentran por debajo de 6.79 Hm³/mes. Estas medidas indican que para el sistema Piedra a pesar de que existen diferencias en la estimación, estas no varían significativamente por lo que se puede indicar que se tiende a encontrar el sistema del lado de la seguridad, sin embargo hay que indicar que SIMPA en verano siempre tiende a sobrestimar las aportaciones, la diferencia máxima de estimación respecto al modelo HBV es de 1.35 Hm³/mes para el mes de Agosto.

7.1.3. Aportaciones del Sistema Manubles.

La comparación de aportaciones entre los 2 modelos para este sistema depende únicamente de las aportaciones en cabecera del río Manubles. Para llevar a cabo este objetivo se tendrá en cuenta las aportaciones que tienen lugar hasta la desembocadura en el río Jalón por el lado norte del sistema, el análisis se realizará hasta la altura de la EA 9184 en Ateca, considerando el caudal en régimen natural proveniente de 446 km².

La gráfica comparativa de las aportaciones naturales resultantes de los modelos empleados (Ver Figura 84) muestra para este caso que las aportaciones SIMPA tienden a subestimar los picos altos de caudal mientras que en otros casos se observa una sobrestimación de los caudales bajos. En ciertos puntos se observa una adecuada correspondencia de los datos sin embargo en la mayor parte de la serie analizada se observa diferencias importantes en magnitud de los eventos desarrollados, por ejemplo en el año hidrológico 2005 se observa una infravaloración de los caudales en régimen natural, en este período se observa una

diferencia del orden de 1.5 Hm³/mes, que respecto a la media de aportaciones del modelo SIMPA (1.7 Hm³/mes) es de gran consideración para realizar las respectivas correcciones para estimaciones futuras.

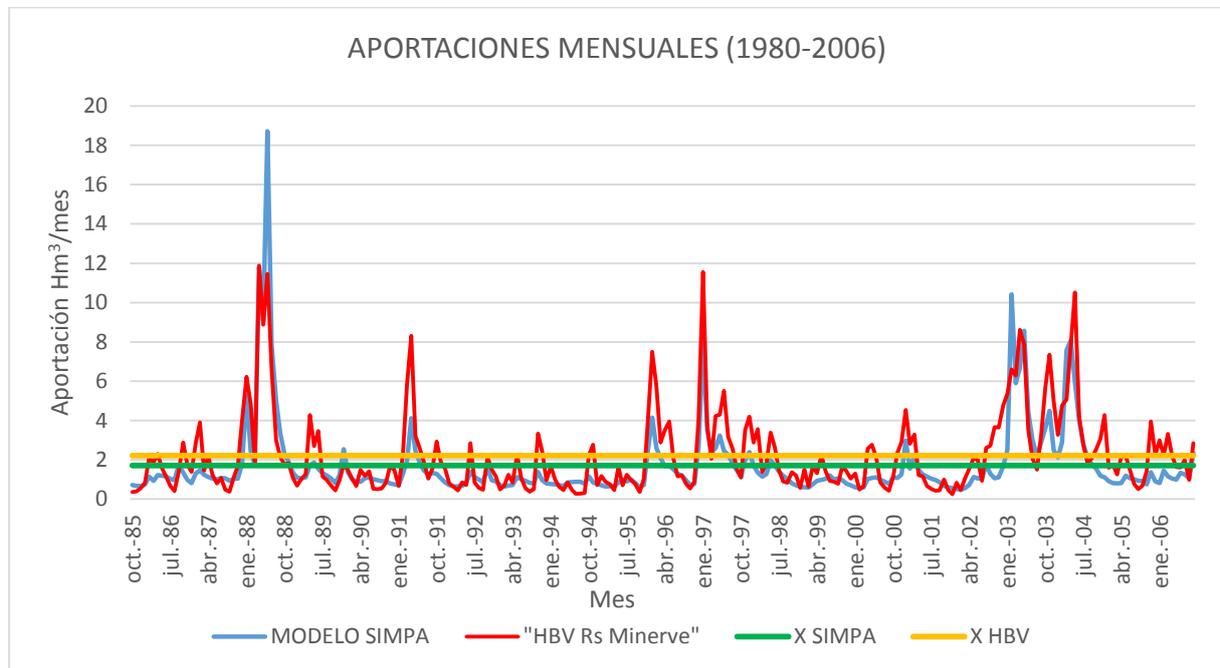


Figura 84. Aportaciones anuales sistema Manubles

Las aportaciones medias del modelo HBV en este sistema tienden a ser superiores casi para todo el año a excepción de los meses estivales. A partir del mes de abril donde se tiene un máximo de 3.33 Hm³/mes las aportaciones tienden a disminuir progresivamente hasta llegar a su aportación media mínima en agosto que es de 1.07 Hm³/mes. En la Figura 85 se observa un comportamiento del modelo HBV esperado, donde los aportes van en aumento hasta el mes de Diciembre, disminuyendo para el mes de marzo en 0.5 Hm³/mes, en el mes de abril aumenta en 1 Hm³/mes y es a partir de ahí donde se observa un descenso importante de las precipitaciones para los meses correspondientes a verano. Para los meses estivales se observa como el modelo SIMPA sobreestima las aportaciones sin embargo éstas no varía en gran proporción como en otros sistemas, esta sobreestimación es del orden de 0.32 Hm³/mes. Para el resto de los meses se observa una infravaloración de los eventos desarrollados. Respecto a los otros sistemas analizados, junto con el sistema Aranda son los únicos en los cuales se tiene una infraestimación de los caudales.

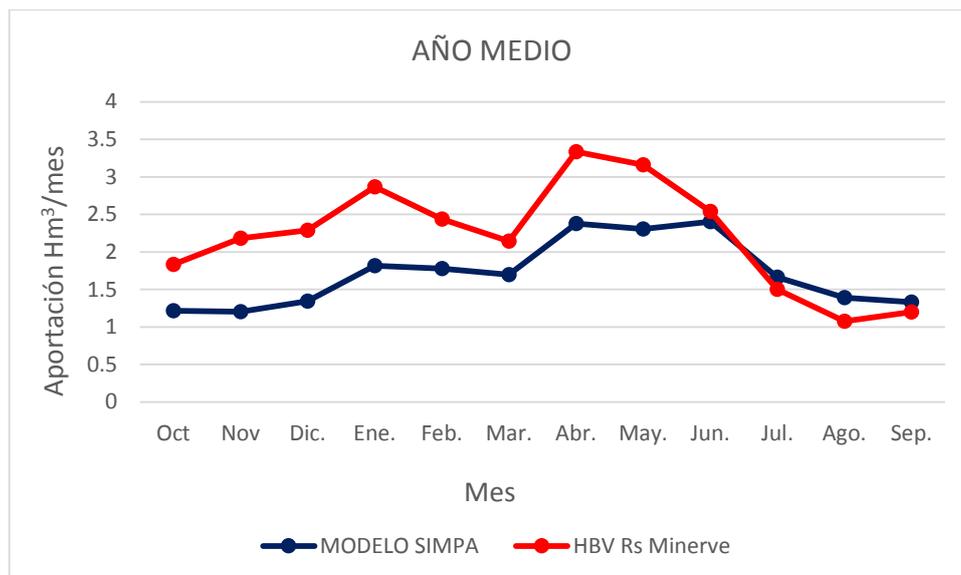


Figura 85. Aportaciones medias sistema Manubles

Las medidas estadísticas (Tabla 48) respecto al modelo SIMPA indican que el 75% de las aportaciones se encuentran por debajo de 1.70 Hm³/mes mientras que las del modelo HBV inferiores a 2.84 Hm³/mes. Respecto a la media se observa que las aportaciones del modelo HBV (2.21 Hm³/mes) en porcentaje son mayores en un 23% aproximadamente a las aportaciones establecidas por SIMPA.

Tabla 48. Medidas estadísticas de las Aportaciones Anuales: Sistema Manubles

MEDIDA ESTADÍSTICA	MODELO SIMPA (Hm ³ /año)	MODELO HBV (Hm ³ /año)
Media	1.71	2.21
Desviación Estándar	1.97	2.06
Percentil 50	1.08	1.52
Percentil 75	1.70	2.85

7.1.4. Aportaciones del Sistema ARANDA

En el análisis de este Sistema intervienen 5 subcuencas (0823, 0824, 0825, 0826 y 0827) con una extensión de aproximadamente 515 km² cuyas aportaciones entran a formar parte de los ríos Isuela y Aranda que son los principales afluentes del río Jalón por el margen noreste del sistema de explotación. Las subunidades 0823 y 0826 corresponden a las subcuencas de cabecera de los ríos Aranda e Isuela respectivamente por lo que éstas se dicen que se encuentran propiamente en régimen natural.

En la Figura 86 se observa la gráfica comparativa de las aportaciones que provienen del modelo SIMPA y HBV, se marca una correlación entre los mismos, encontrándose ligeramente por encima en varios períodos de tiempo las resultantes del modelo SIMPA, aquí la mayor diferencia en la estimación ($11.54 \text{ Hm}^3/\text{mes}$) se da en el caudal pico en febrero del año hidrológico 2003. Durante la mayor parte del intervalo se observa que los caudales del modelo SIMPA para los caudales bajos se encuentran sobrestimados ligeramente por lo que se debe tomar ciertas precauciones en estimaciones futuras en vista que se podría establecer ciertos grados de seguridad que pueden tener un cierto grado de incertidumbre. A pesar de las diferencias establecidas se puede indicar que ambos modelos en esta cuenca representan de manera aproximada el comportamiento de las subcuencas.

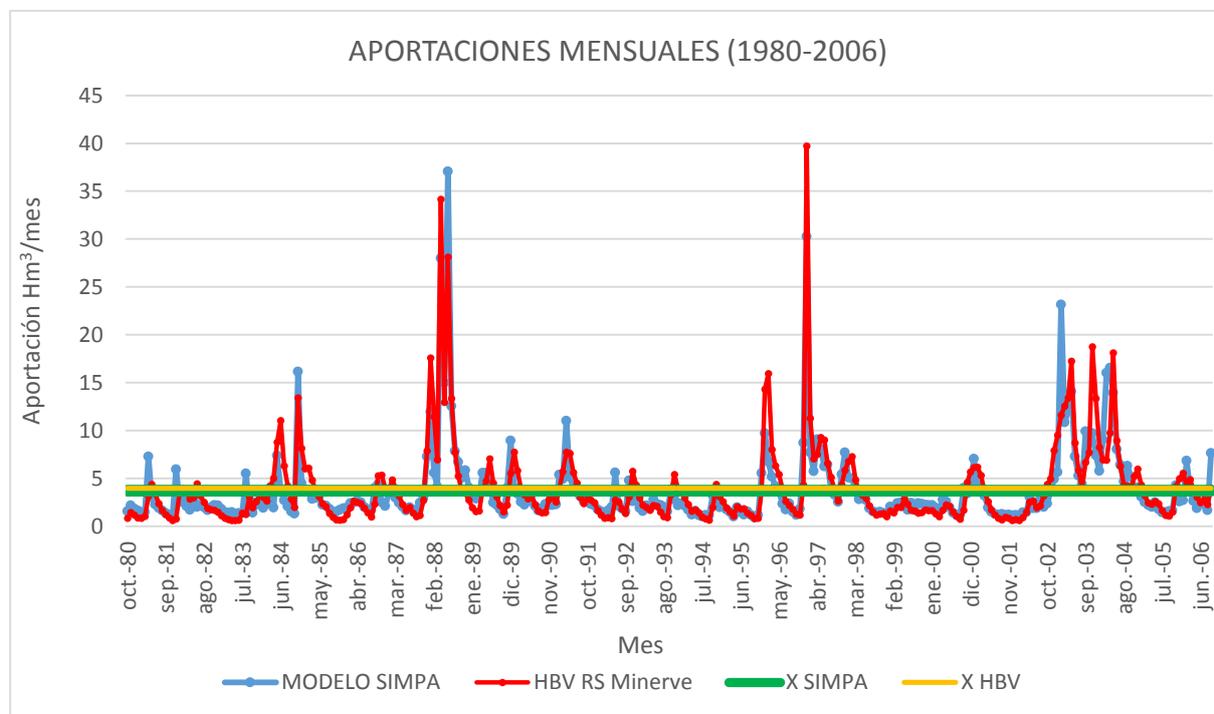


Figura 86. Aportaciones anuales sistema Aranda

Las aportaciones medias del modelo HBV según denota la Figura 87 se encuentran por encima de las del SIMPA en gran parte del año, se observa un ascenso de las aportaciones a partir de octubre encontrando su máxima aportación $6.08 \text{ Hm}^3/\text{mes}$ en el mes de Enero, durante febrero y mayo se observan ciertas fluctuaciones (aumento y descenso de las precipitaciones) y es en el intervalo junio-octubre donde se observa un descenso importante de las aportaciones de $4.76 \text{ Hm}^3/\text{mes}$ a $2.17 \text{ Hm}^3/\text{mes}$, en la mayor parte de los meses estivales se observa que

estas estimaciones se encuentran por debajo de las establecidas por SIMPA demostrando como en otros casos la sobreestimación de caudales.

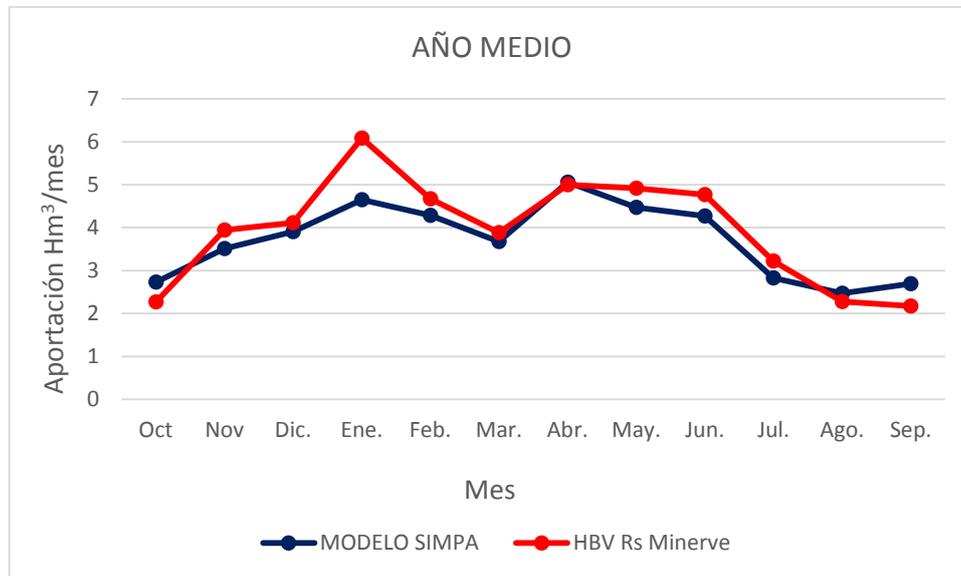


Figura 87. Aportaciones medias sistema Aranda.

Las medidas estadísticas tabuladas a continuación muestran como los valores no distan en gran proporción entre sí, la media resultante para los dos casos se encuentra en los 3.8 Hm³mes, mientras que los percentiles en ambos casos denotan que el 75 % de los datos se encuentran por debajo de 4.02 y 4.73 Hm³/mes para el modelo SIMPA y HBV respectivamente, y que el 50% de los datos de igual manera para ambos casos se encuentran por encima de 2.34 Hm³/año.

Tabla 49. Medidas estadísticas de las Aportaciones Anuales: Sistema Aranda

MEDIDA ESTADÍSTICA	MODELO SIMPA (Hm ³ /año)	MODELO HBV (Hm ³ /año)
Media	3.71	3.95
Varianza	4.08	4.41
Percentil 50	2.35	2.61
Percentil 75	4.03	4.74

7.1.5. Aportaciones del Sistema JALÓN

En este apartado se realiza una comparativa global del sistema, en este punto se analizan las aportaciones de todas las subcuencas que forman parte del sistema de explotación con sus respectivos afluentes al río Jalón- el cual desemboca posteriormente en el gran Ebro-, los

afluentes en cuestión son: río Blanco (oeste), río Nájima y Henar (noroeste), río Mesa, Piedra y Ortiz (suroeste), río Manubles (norte), río Jiloca (sur), río Aranda e Isuela (noreste), río Perejiles, Grío y Cariñena (sureste). Las aportaciones en régimen natural resultantes serán evaluadas a la altura de la EA GRISEN 9087.

Como se muestra en la Figura 88 las aportaciones del modelo SIMPA durante el periodo analizado (1950-2006) se encuentran casi en su totalidad por encima de las del modelo HBV, estas en varios casos como en el año hidrológico 1987 se encuentran sobreestimando los caudales circulantes en el sistema en gran proporción siendo junio/ del año hidrológico 1987 el punto de mayor diferencia entre los dos modelos (91.47 Hm³/mes). En toda la serie se evidencia que los picos de caudales distan en la mayoría de los casos aproximadamente 15 Hm³/mes. Para el caso de la estimación de caudales bajos estos se correlacionan más entre sí, siendo en este caso que las aportaciones del modelo HBV se encuentran en todo momento en igualdad o ligeramente inferiores a las estimaciones realizadas por el modelo SIMPA.

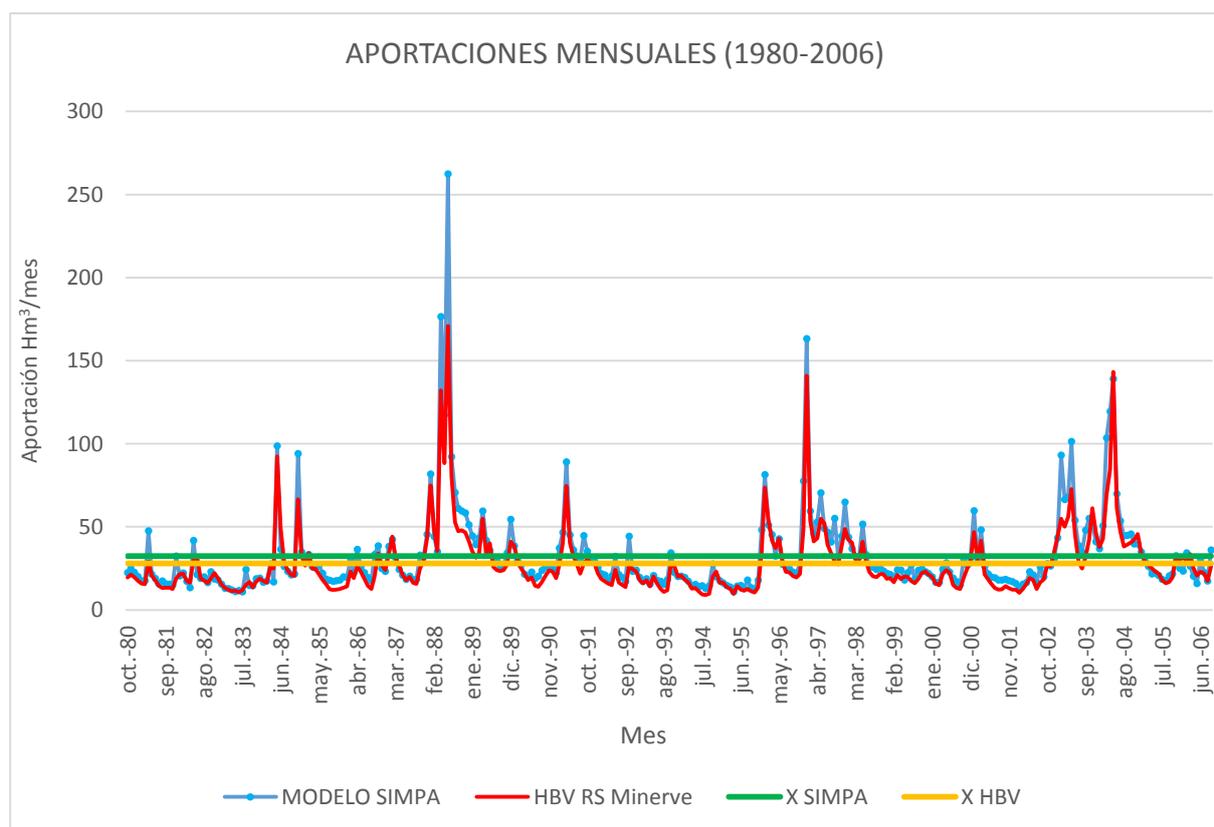


Figura 88. Aportaciones anuales sistema Jalón.

Respecto al año típico medio se evidencia que en todo el año las aportaciones SIMPA se encuentran por encima de las del HBV, estas tiende a crecer en los meses de otoño decrecen

en invierno (Febrero) y vuelven a tener un ascenso hasta el mes de mayo donde se evidencia el punto más alto (41.39 Hm³/mes), a partir de ese momento los caudales resultantes descienden considerablemente hasta alcanzar su punto mínimo en agosto (19.35 Hm³/mes). Se observa que para los meses estivales (julio, agosto y septiembre) el descenso de aportaciones es pronunciado, se tiene un descenso del 50% de las aportaciones respecto a la máxima. Mediante estos análisis se corrobora la sobrestimación de los eventos que tienen lugar en el sistema de explotación del Jalón. Es importante tomar las medidas necesarias en las estimaciones resultantes del modelo SIMPA dado que estos pueden dar lugar a problemas en el sistema de gestión, se deben manejar ciertos grados de incertidumbre y por sobre todas las cosas es importante encontrarse siempre del lado de la seguridad con el fin de no generar posibles fallos en la gestión que causen molestias en el sector tanto urbano como agrario.

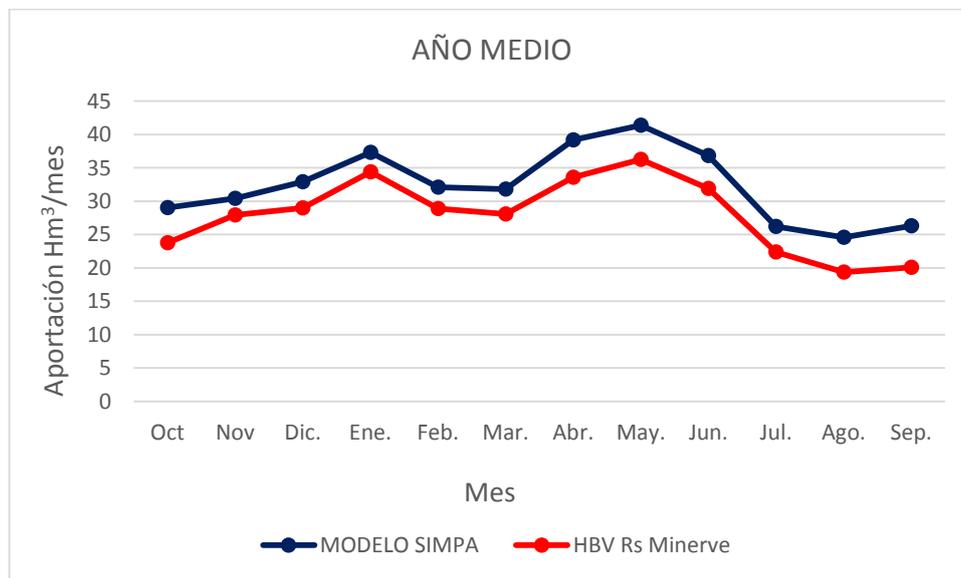


Figura 89. Aportaciones medias sistema Jalón.

Tabla 50. Medidas estadísticas de las Aportaciones Anuales: Sistema Jalón

MEDIDA ESTADÍSTICA	MODELO SIMPA (Hm ³ /año)	MODELO HBV (Hm ³ /año)
Media	32.35	27.97
Varianza	25.82	20.01
Percentil 50	24.17	21.90
Percentil 75	36.46	32.47

Las medidas estadísticas que se detallan en la Tabla 50 muestran en el caso de la media (32.35 y 27.97 Hm³/año para el modelo SIMPA y HBV respectivamente) que las aportaciones de un

modelo a otro no varían considerablemente entre sí. Vemos según esta tabla que los percentiles para el caso del HBV el 50% de los datos simulados se encuentran por encima de 21.90 Hm³/mes. Mientras que el percentil 75 del modelo SIMPA dice que el 75% de los datos se encuentran por debajo de 36.46 Hm³/mes, mostrando de esta manera una cierta correlación de los datos simulados (SIMPA y HBV) uno respecto de otro.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las aportaciones medias que se tienen en cada sistema analizado:

SISTEMA	MEDIDA ESTADÍSTICA	MODELO SIMPA (Hm ³ /mes)	MODELO HBV (Hm ³ /mes)
JILOCA	Media	8.66	7.10
	Percentil 50	6.75	5.44
PIEDRA	Media	7.55	7.43
	Percentil 50	6.52	6.80
MANUBLES	Media	1.71	2.21
	Percentil 50	1.08	1.52
ARANDA	Media	3.71	3.94
	Percentil 50	2.34	2.60
JALÓN	Media	32.35	27.96
	Percentil 50	24.17	21.89

8. CONCLUSIONES

En este estudio se ha desarrollado una evaluación de los recursos hídricos del sistema del río Jalón a través de la aplicación de modelos de precipitación-escorrentía en forma semidistribuida empleando la herramienta Rs Minerve 2.0 la cual mediante el modelo HBV permitió analizar el comportamiento de los recursos hídricos, flujos superficiales, subterráneos e influencia que ejercen las estructuras de regulación en todas las subcuencas que forman parte del sistema de explotación. De este modo se pretende representar los procesos hidrológicos que se desarrollan en la cuenca de una manera aproximada y lo más realista posible y que sea capaz de reproducir diferentes eventos en función de los datos de entrada empleados en el modelo.

El sistema de explotación fue dividido en 5 subsistemas: Aranda, Jalón, Jiloca, Piedra y Manubles mismas que comprenden un total de 30 subcuencas las cuales fueron objeto de calibración. La modelación se realizó empleando como inputs de entrada datos que fueron obtenidos a través del proyecto de investigación Spain v2.1 que comprende una red mallada de datos de precipitación y temperatura diaria de alta resolución para el periodo 1950-2008. En base a estos datos meteorológicos se estimó la evapotranspiración potencial empleando el modelo de Hargreaves y estimándola en función de la cobertura vegetal de las zonas de estudio.

La calibración y validación del modelo fue posible gracias a la existencia 34 estaciones de aforo de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (R.O.E.A), empleando el algoritmo SCE-UA para la calibración de los parámetros del modelo HBV y para evaluar la sensibilidad e incertidumbre del mismo, se planteó una función objetivo ($FO=1$) que es resultado de una suma ponderada de cuatro indicadores de eficiencia a los cuales se le asignó un peso relativo de 0.25, estos índices fueron: el índice de Nash (Realiza un buen ajuste de los picos alto de caudal), el índice de Nash logaritmo (Tiende al ajuste de los caudales bajos), el coeficiente de Pearson (Evalúa las desviaciones de los datos simulados respecto a los observados) y el bias score (Medida simétrica entre los promedios de los datos observados y simulados).

Según el análisis realizado se tiene que el 50% de las subcuencas del río Aranda, 75% de las subcuencas del subsistema Jiloca, 100% del río Manubles y el 75% de las subcuencas del sistema del río Jalón tienen un valor de la función objetivo superior a 0,7 o incluso en algunos

casos superior a 0.8 tanto en la etapa de calibración como en la de validación, siendo catalogados estos ajustes como buenos e indicando que en la mayoría de los casos los datos simulados reproducen adecuadamente el comportamiento de la cuenca.

Los mejores ajustes se obtuvieron sobre todo en aquellas subcuencas de cabecera, mismas que no abarcaban una gran extensión y que a la vez no se veían afectadas en gran medida por las detracciones de agua para satisfacer demandas ya sea de tipo agraria, urbana o industrial. Las cuencas de cabecera al encontrarse en régimen natural facilitaron y favorecieron el ajuste y calibración adecuada de los datos como es el caso de las subcuencas del río Blanco, Jubera, Pancrudo, Piedra, Ortiz.

Los resultados del análisis en desembocadura calibrados y validados (0.83 y 0.67 respectivamente) del sistema de explotación del río Jalón fueron buenos a pesar de la incertidumbre que conllevan los MPE y de los errores sistemáticos de calibración mientras más aguas abajo nos encontramos en el sistema, esto debido a las alteraciones que se derivan de los embalses, y a las importantes detracciones de agua para satisfacer las demandas.

Otro aspecto importante el cual ha sido objeto de análisis de este estudio fue comparar las aportaciones resultantes en régimen natural derivadas del modelo HBV obtenidas en Rs Minerve con las establecidas por el modelo SIMPA que es el que la Confederación Hidrográfica del Ebro emplea para estimar las aportaciones a lo largo del sistema en régimen natural, al ser el modelo HBV más preciso por la forma en la cual representa los procesos hidrológicos y en la forma en la que fueron estimadas las aportaciones, determinamos en primera instancia si los modelos se correlacionan entre sí y a la vez se observa si las aportaciones provenientes del modelo SIMPA sobrestiman o subestiman los caudales circulantes.

La comparación realizada indicó que en los 5 sistemas analizados, las aportaciones generadas por SIMPA se encuentran en gran parte de la serie hidrológica estudiada por encima de las aportaciones obtenidas con el modelo HBV.

El análisis de las aportaciones anuales medias muestra que para el sistema global de explotación del río Jalón las aportaciones HBV (335.62 Hm³/año) son 52 Hm³/año inferiores a las determinadas por el modelo SIMPA (388.21 Hm³/año).

Referente al año medio para todo el sistema de explotación del Jalón las respuestas generadas por el modelo HBV en contraste con las aportaciones SIMPA se encuentran claramente por

debajo de estas, la diferencia en cuanto al modelo SIMPA es del orden de 2.47 a 6.20 Hm³/mes.

Realizado el análisis se deduce que SIMPA se encuentra sobreestimando los caudales, mismas que pueden tener repercusiones al momento de la gestión de la demanda, dado que al hipotéticamente disponer de más recursos se podría asignar los mismos a otro tipo de demandas, sin embargo si en la realidad estas aportaciones estimadas no se cumplen podríamos estar ocasionando fallos en el sistema, por lo que se debe tener cuidado al momento de tomar decisiones, en la planificación y gestión de los recursos, teniendo en cuenta que siempre debemos estar del lado de la seguridad.

Comparadas las aportaciones con el modelo SIMPA y en base a los resultados globales de la calibración, parametrización y validación del modelo en función de los datos observados de las estaciones de aforo del sistema de explotación del Jalón, se concluye que este 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 empleados con confianza, sin embargo siempre se debe tomar ciertas medidas preventivas para estar del lado de la seguridad por el hecho que todos los modelos conllevan un cierto grado de incertidumbre y dado que no todos los eventos que se producen en la naturaleza con el tiempo tienen la misma intensidad y frecuencia bajo las cuales fueron parametrizadas viéndose influenciados directamente por las condiciones climáticas del medio y de la estructura del suelo y vegetación.

Finalmente señalar que los modelos de precipitación constituyen una herramienta indispensable en la gestión de los recursos hídricos, las aportaciones generadas por los MPE generalmente se emplean como entradas a los modelos de gestión cuyo objetivo principal es la estimación de garantías de suministro a las demandas, predicción de avenidas, gestionar adecuadamente los recursos, entre otras. Importante recordar que la efectividad del modelo y su capacidad de predicción dependen en gran parte de la forma y circunstancias bajo las cuales fueron elaboradas y principalmente de la comprensión y entendimiento de los procesos hidrológicos que se desarrollan en la cuenca que se está estudiando. Es decir que no existe modelo perfecto aplicable a todas las cuencas dado que cada una presenta condiciones propias en cuanto al clima, geografía, geología, etc., que son factores que indiscutiblemente condicionan la estructura de los modelos.

9. REFERENCIAS

- 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
- Arquiola, J. P., Solera, A. S., Álvarez, J. A., & Elvira, N. L. Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos.
- Ayala-Carcedo, F. J. (2001). Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos en España y viabilidad del Plan Hidrológico Nacional 2000. El Plan Hidrológico Nacional a debate. Bilbao, 51-66.
- Bergstrom, S. (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments.
- Bergström, S., & Singh, V. P. (1995). The HBV model. Computer models of watershed hydrology. 443-476.
- Beven, K. J. (2011). Rainfall-runoff modelling: the primer. John Wiley & Sons.
- Boyle, D. P., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (2000). Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36(12), 3663-3674.
- Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. Obtenido de Instituto para la mitigación de los efectos del Fenómeno el Niño: http://www.imefen.uni.edu.Pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf.
- Dakhlaoui, H., Bargaoui, Z., Bardossy, A., & Ehret, U. (2002). Comparison of Hydrological Model Results Depending On The Objective Function Used For Parameter Estimation. In EGS General Assembly Conference Abstracts (Vol. 27, p. 6372).
- De vos, N.J., Rientjes, T.H.M. and Savenije, H.H.G, 2006 Enhanced conceptual rainfall - runoff modeling through ensemble Kalman filtering.
- Finger, D. (2011). "Calibration of Hydrological Models". Hydrological Processes and Modelling, SS 2011. Swiss Federal Research Institute WSL. Switzerland.

Foehn, A., García Hernández, J., Claude, A., Roquier, B., Boillat, J. L., & Paredes Arquiola, J. (2014). RS MINERVE-User's manual v1. 15. *RS MINERVE Group, Switzerland*.

Gershenfeld, N. A. (1999). *The nature of mathematical modeling*. Cambridge university press.

Girard, C., Pulido-Velazquez, M., Rinaudo, J. D., Pagé, C., & Caballero, Y. (2015). Integrating top-down and bottom-up approaches to design global change adaptation at the river basin scale. *Global Environmental Change, 34*, 132-146.

Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research, 34*(4), 751-763.

Herrera, S., Gutiérrez, J. M., Ancell, R., Pons, M. R., Frías, M. D., & Fernández, J. (2012). Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology, 32*(1), 74-85.

Hernández, J. G., Claude, A., Arquiola, J. P., Roquier, B., & Boillat, J. L. (2014). Integrated flood forecasting and management system in a complex catchment area in the Alps— implementation of the MINERVE project in the Canton of Valais. *Apley and Solomon's Concise System of Orthopaedics and Trauma, 87*.

Houghton, J. T., Ding, Y. D. J. G., Griggs, D. J., Noguier, M., van der Linden, P. J., Dai, X., ... & Johnson, C. A. (2001). *Climate change 2001: the scientific basis*.

Hundecha, Y., & Bárdossy, A. (2004). Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology, 292*(1), 281-295.

Jakeman, A. J., Littlewood, I. G., & Whitehead, P. G. (1990). Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of hydrology, 117*(1), 275-300.

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.

Moore, R. J. (2007). The PDM rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 11*(1), 483-499.

Musefa, A.: Hydrological responses to land cover changes; Modelling Case study in Abbay/Blue Nile basin, Ethiopia, MSc Thesis, ITC, Enschede, 2007.

Poblete López, D. N. (2008). Modelo hidrológico distribuido para la simulación de recursos hídricos.

Pope, V. D., Gallani, M. L., Rowntree, P. R., & Stratton, R. A. (2000). The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Climate Dynamics*, 16(2-3), 123-146.

Salla, M. R., Paredes-Arquiola, J., Solera, A., Álvarez, J. A., Pereira, C. E., Alamy Filho, J. E., & De Oliveira, A. L. (2014). Integrated modeling of water quantity and quality in the Araguari River basin, Brazil. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 42(1), 224-244.

Seibert, J. (1997). Estimation of parameter uncertainty in the HBV model. *Nordic Hydrology*, 28(4), 247-262.

Serrano A., García A.J., Mateos V.L., Cancillo M.L. and Garrido J., 1999. Monthly modes of variation of precipitation over the Iberian Peninsula. *J. Climate*, 12, 2894-2919.

Singh, V. P. (1995). Watershed modeling. *Computer models of watershed hydrology*, 1-22.

Taffese, T. E. W. O. D. R. O. S. (2011). Physically based rainfall: Runoff modelling in the northern Ethiopian highlands: The case of Mizewa watershed.

TAPASH, D., Bardossy, A., & Zehe, E. (2006). Influence of spatial variability of precipitation in a distributed rainfall-runoff model. *Predictions in Ungauged Basins: Promise and Progress*, (303), 195.

Trigo, R. M. and Palutikof, J. P., 2001. Precipitation Scenarios over Iberia: A Comparison between Direct GCM Output and Different Downscaling Techniques. *J. Climate*, 14, 4422-4446.

Wagener, T., Boyle, D. P., Lees, M. J., Wheeler, H. S., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (2001). A framework for development and application of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 5(1), 13-26.

Wagener, T., Wheeler, H. S., & Gupta, H. V. (2004). Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments (p. 306). London: Imperial College Press.

Wheater, H. S., Wheeler, H., Sorooshian, S., & Sharma, K. D. (2008). Modelling hydrological processes in arid and semi-arid areas: an introduction to the workshop. Hydrological modelling in arid and semi-arid areas, 1-20.

Yapo, P. O., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (1996). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology*, 181(1), 23-48.

Yeung, C. W. (2005). Rainfall-runoff and water-balance models for management of the Fena Valley Reservoir, Guam. US Department of the Interior, US Geological Survey.

10. ANEJOS

10.1. SERIES DE APORTACIONES ESTACIONES DE AFORO (CAUDALES DIARIOS)

10.1.1. SISTEMA JILOCA

EA 9042 CALAMOCHA

Localizado en la Municipalidad de Calamocha en la Provincia de Teruel sobre el cauce del río Jiloca, la cuenca aportante en este punto abarca una superficie de 1498 km². Su régimen de caudales es de tipo natural, sin embargo se evidencia demandas de tipo urbano y de riego de consideración. La serie hidrológica disponible es de 74 años (1930-2011) de los cuales 62 corresponden a series completas.

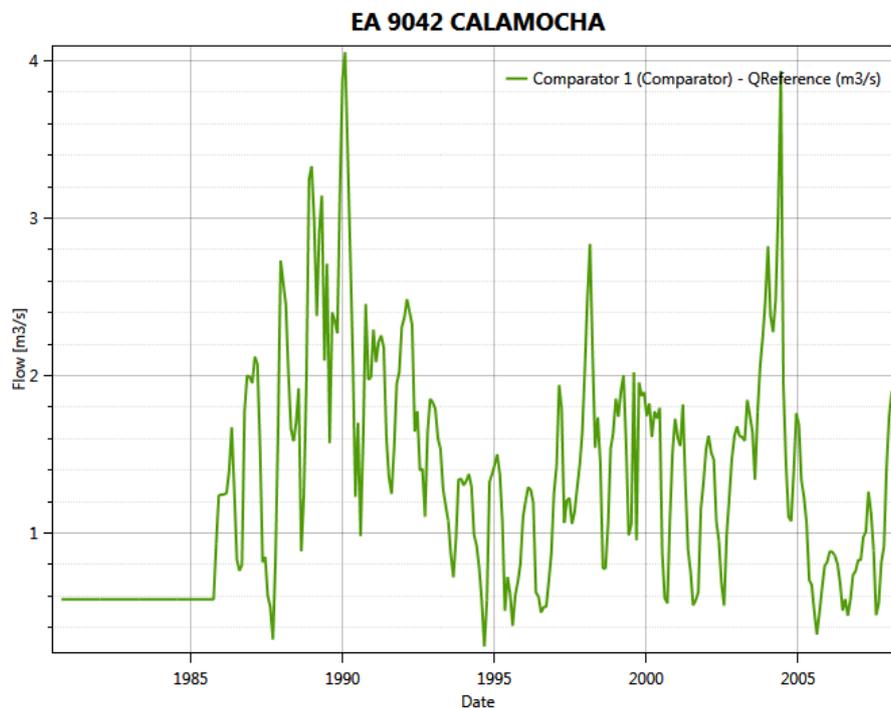


Figura 90. Estación R.O.E.A 90 42 Calamocha

EA 9041 NAVARRETE DEL RÍO

Localizado en la municipalidad de Calamocha sobre el cauce del río Navarrete, la cuenca aportante en esta estación comprende una superficie de 364 km². El régimen de caudales es de tipo natural, y para la modelación dispone de 79 años hidrológicos (1930-2011) de los cuales 63 corresponden años completos y 16 años incompletos.

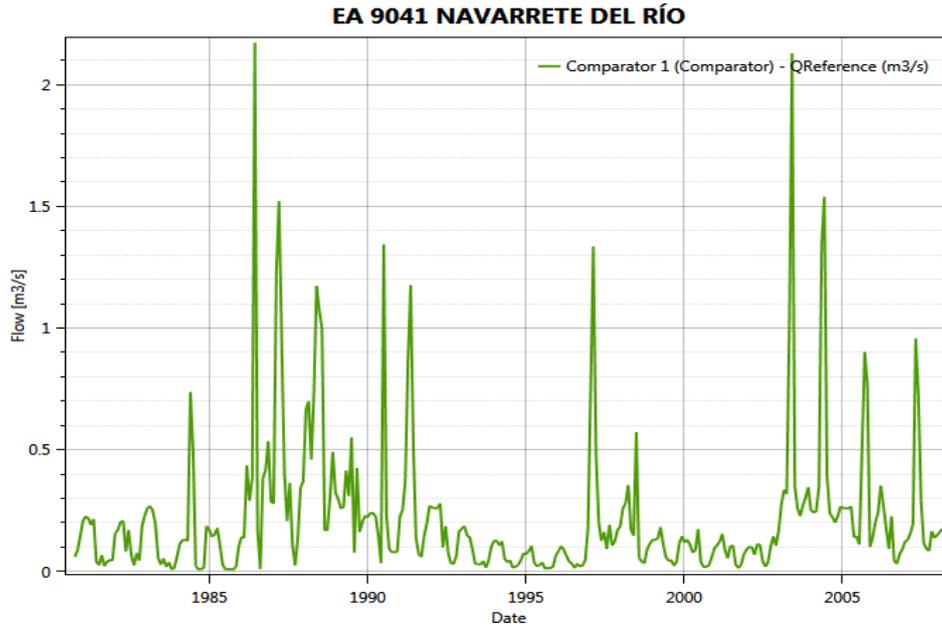


Figura 91. Estación R.O.E.A 90 41 Navarrete del Río

EA 9010 DAROCA

Localizado en la municipalidad de Daroca en la provincia de Zaragoza sobre el cauce del río Jiloca, aguas abajo de la confluencia de las estaciones de aforo EA 9042 Calamocha y EA 9041 Navarrete del Río, la cuenca aportante en esta estación comprende una superficie de 2202 km². El régimen de caudales es de tipo natural, y para la modelación dispone de 97 años hidrológicos (1912-2011) de los cuales 70 corresponden a años completos y 27 años incompletos.

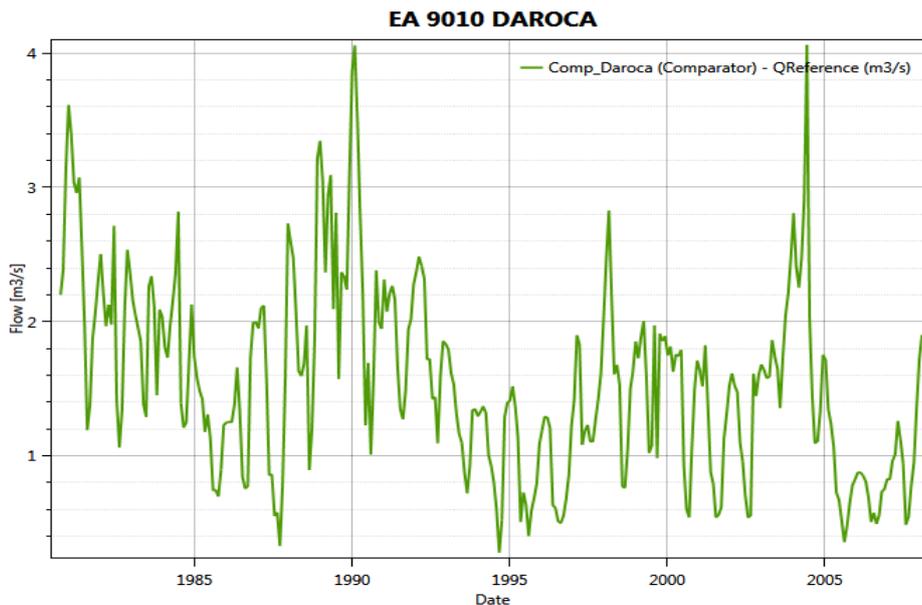


Figura 92. Estación R.O.E.A 90 10 Daroca

EA 9055 MORATA

Localizado en la municipalidad de Jiloca en la provincia de Zaragoza sobre el cauce del río Jiloca, aguas abajo de la estación de aforo EA 9010 Daroca, en este punto se concentra todo el Sistema Jiloca como cuenca aportante comprendiendo una superficie de 2502 km². El régimen de caudales es de tipo natural, y para la modelación dispone de 68 años hidrológicos (1930-2011) de los cuales 50 corresponden años completos y 18 años incompletos.

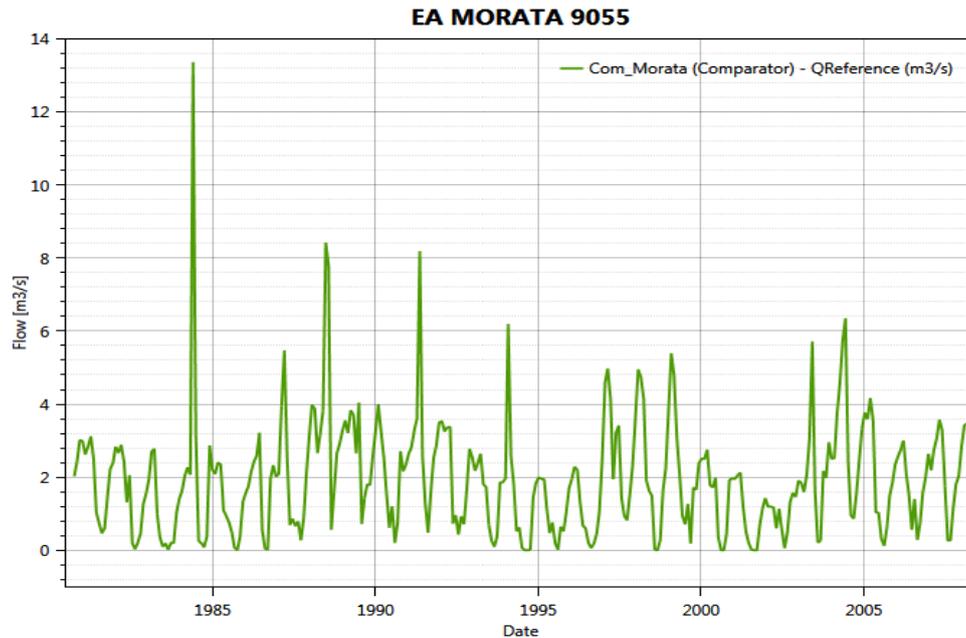


Figura 93. Estación R.O.E.A 90 55 Morata

10.1.2. SISTEMA PIEDRA

EA 9056 JARABA

Ubicada sobre el cauce del río Mesa en la municipalidad de Jaraba en la provincia de Zaragoza, su régimen de caudales es de tipo natural, la cuenca aportante es de cabecera y tiene una extensión de 537 km². Esta corresponde a 1 de las 3 estaciones de aforo que controlan la cantidad de agua que entra al embalse de la Tranquera para su posterior regulación. Tiene disponible 54 años hidrológicos (1930-2011) de los cuales 43 corresponden años completos y 11 años incompletos.

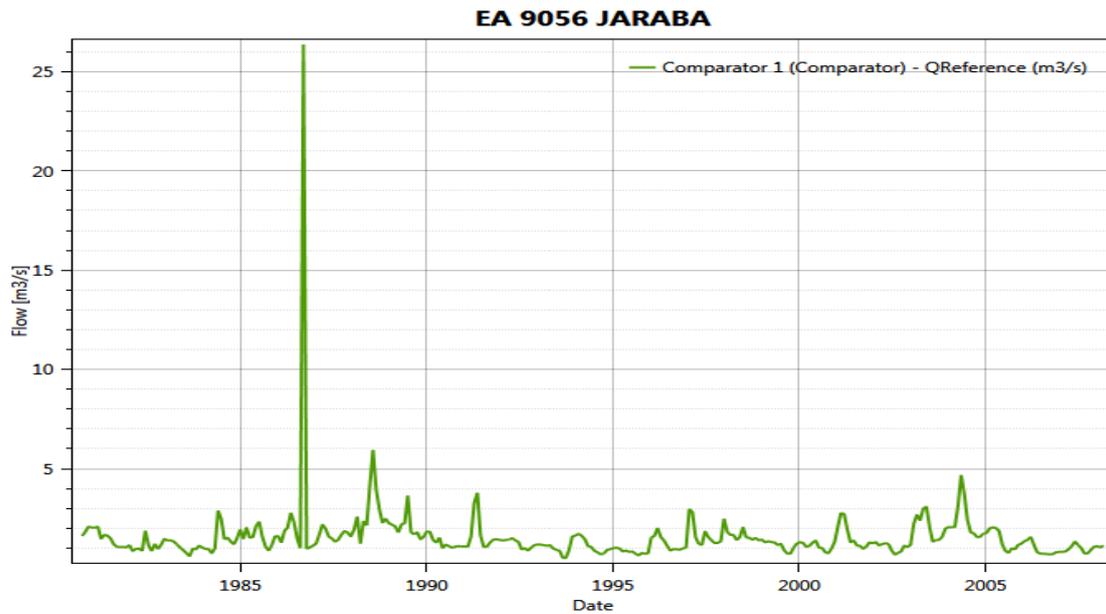


Figura 94. Estación R.O.E.A 90 56 Jaraba

EA 9008 NUÉVALOS

Ubicada sobre el cauce del río Piedra en la Municipalidad de Jaraba en la provincia de Zaragoza, su régimen de caudales es de tipo natural, la cuenca aportante proviene de 2 subcuencas las cuales tienen una extensión de 732 km². Esta estación es otra de las estaciones cuyo objetivo es medir la cantidad de agua que está entrando al embalse de la Tranquera. La serie de aportaciones disponible en esta estación datan del año 1912-2011, de los cuales 68 años son completos y 10 incompletos.

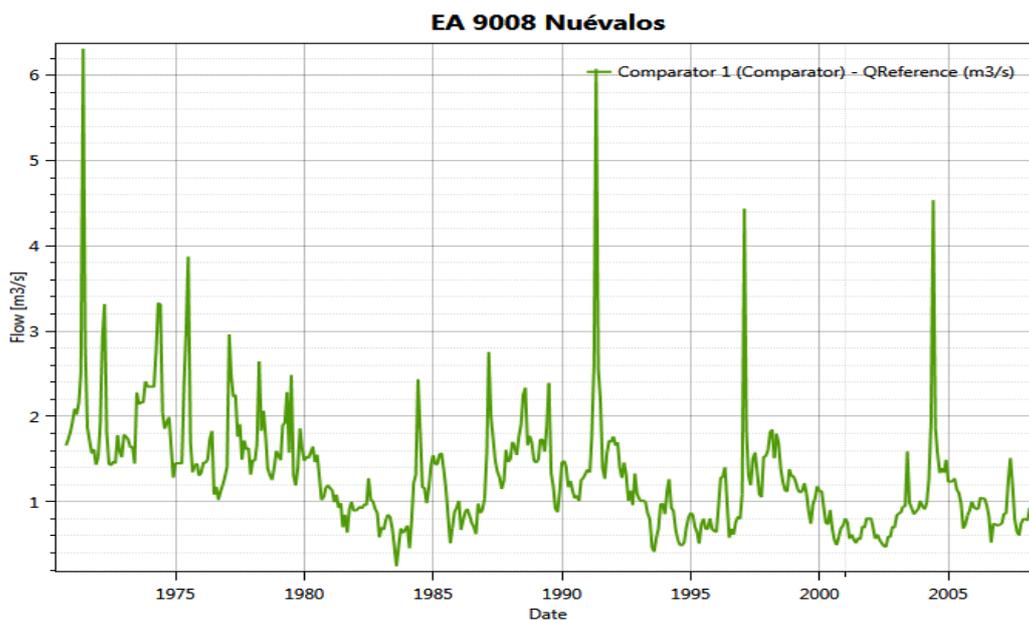


Figura 95. Estación R.O.E.A 90 08 Nuévalos

EA 9129 TRANQUERA C.E

Localizado en la municipalidad de Nuévalos sobre el cauce del río Ortiz, la cuenca aportante en este punto tiene una superficie de 87 km², tiene como propósito medir la cantidad de agua que entra al embalse de la Tranquera. Su régimen de caudales es de tipo natural, no se evidencian demandas de gran consideración. Para la modelación hidrológica cuanto con 40 años hidrológicos (1972-2011) de los cuales 35 tienen la serie de caudales completa.

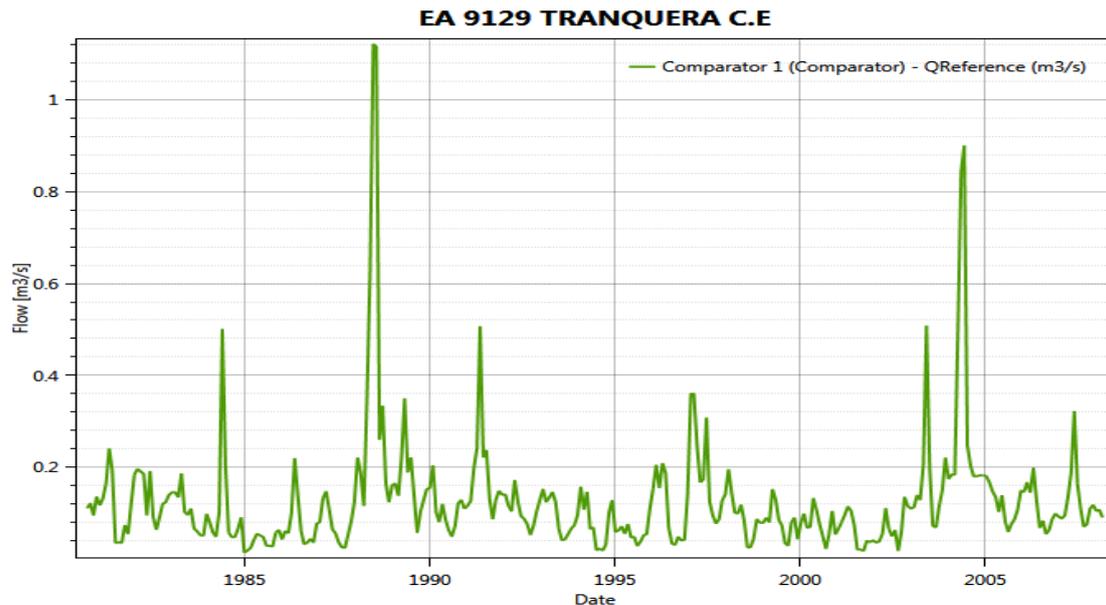


Figura 96. Estación R.O.E.A 90 08 Nuévalos

EA 9125 CARENAS

Ubicado en la municipalidad de Carenas, aguas abajo del embalse de la Tranquera cuya capacidad es de 84.17 Hm³ y el cual regula las aguas del río Piedra para la posterior gestión del recurso (regadío, urbano, industrial). La cuenca aportante en esta estación comprende 1478 km² correspondiente a la mayor parte del Sistema Piedra. El régimen de caudales gobernante es de tipo alterado de tal modo que controla las salidas pertenecientes al embalse. Para objetos de modelaciones cuenta con 58 años hidrológicos (1953-2011) de los cuales 58 corresponden a series completas.

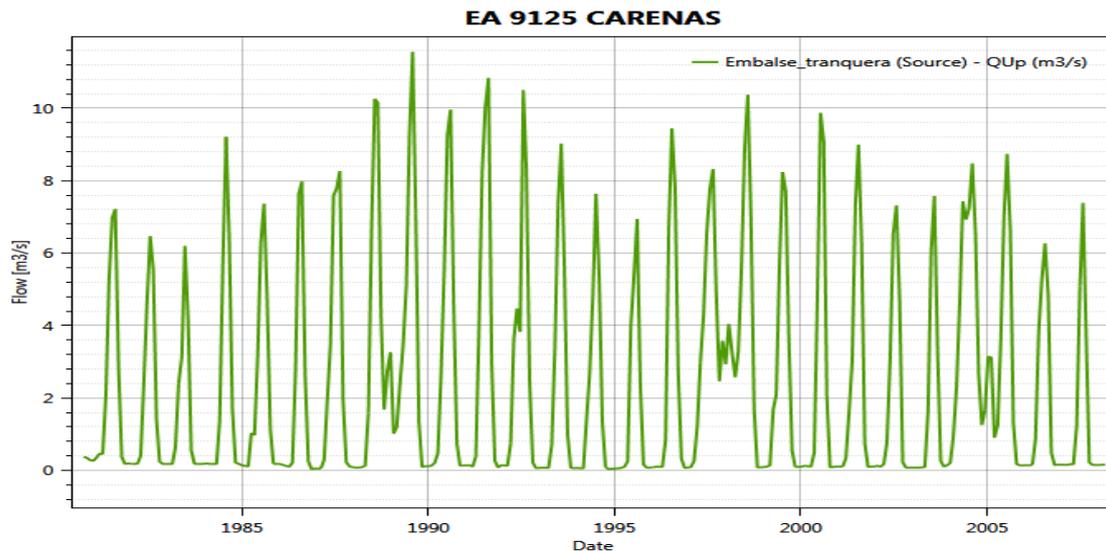


Figura 97. Estación R.O.E.A 9125 Carenas

10.1.3. SISTEMA MANUBLES

EA 9184 ATECA

Ubicado en la municipalidad de Ateca en la provincia de Zaragoza en el cauce del río Manubles, su cuenca receptora es de 446 km², El régimen de caudales gobernante en esta cuenca es de tipo natural. La serie de aportaciones disponible en esta estación datan del año 1975-2011, de los cuales 31 años son completos y 6 incompletos.

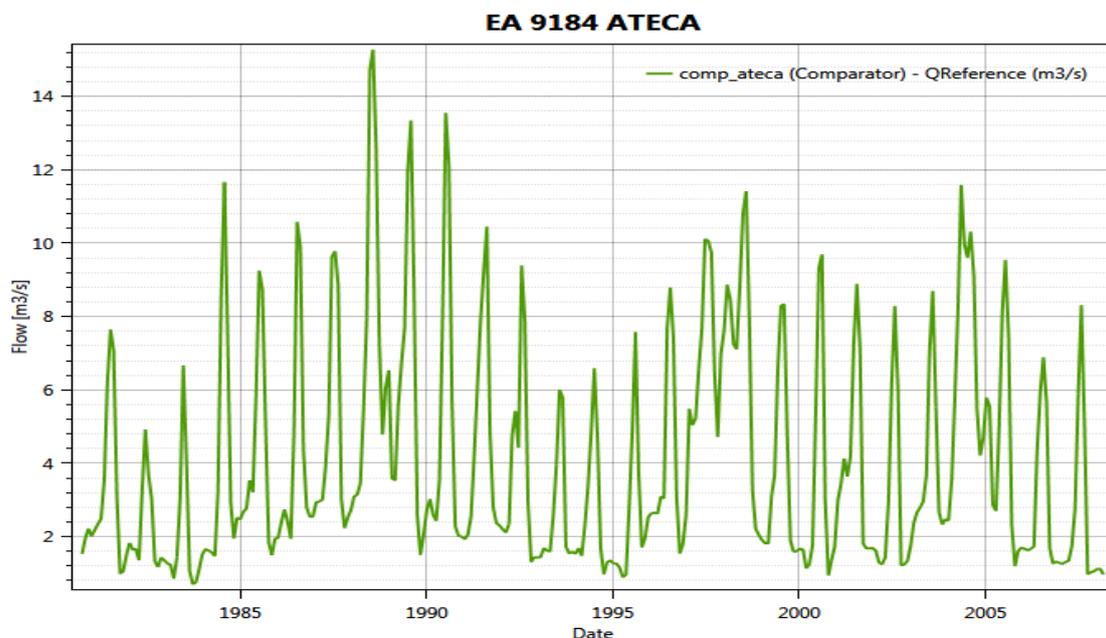


Figura 98. Estación R.O.E.A 9184 Ateca

10.1.4. SISTEMA ARANDA

EA 9261 TRASOBARES

Situado en la municipalidad de Trasobares en la provincia de Zaragoza sobre el cauce del río Isuela, la cuenca aportante (cabecera) tiene una superficie de 123 km² y su régimen es de tipo natural. Tiene disponible 22 años hidrológicos (1990-2011) 21 de ellos completos y 1 incompleto.

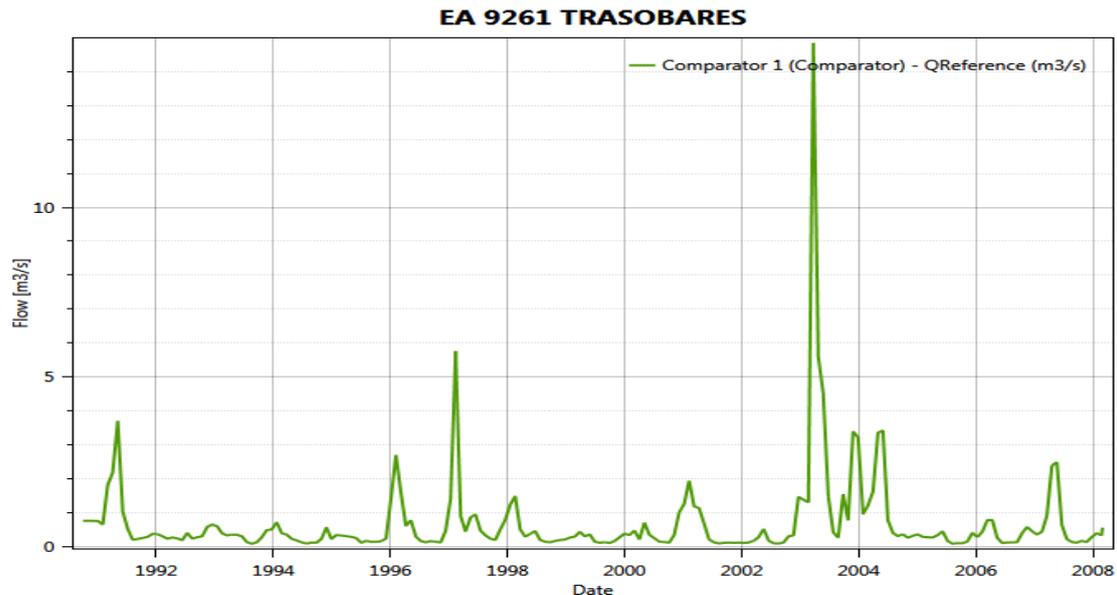


Figura 99. Estación R.O.E.A 9261 Trasobares

EA 9238 MAIDEVERA

Situado en la municipalidad de Aranda de Moncayo en la provincia de Zaragoza sobre el cauce del río Aranda, aguas abajo del embalse de Maidevera (18.33 Hm³) de las Vicarias el cual se encarga de la regulación en esta zona, en especial en la gestión empleada en los regadíos del Aranda, la cuenca aportante en esta estación es de 77 km² y su régimen es de tipo alterado en el cual dominan las sueltas del embalse. Tiene disponible 20 años hidrológicos (1987-2010) 16 de ellos completos y 4 incompletos.

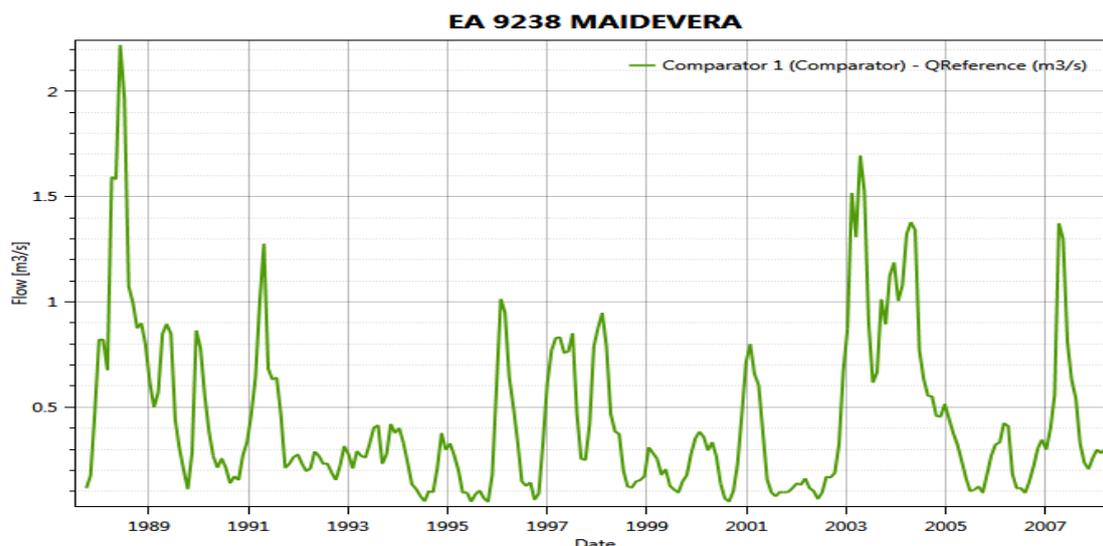


Figura 100. Estación R.O.E.A 9238 Maidevera

SISTEMA JALÓN

EA 9167 BLANCO EN BARRIO BLANCO

Ubicada en el río Blanco en la Municipalidad de Arcos de Jalón en la Provincia de Soria, su régimen de caudales es de tipo natural, no se evidencia demandas de ningún tipo bajo su curso de agua, su cuenca aportante es cabecera y tiene una extensión de 73 km². Tiene disponible 31 años hidrológicos (1970-2011) con datos de los cuales 29 corresponden años completos y 2 a incompletos.

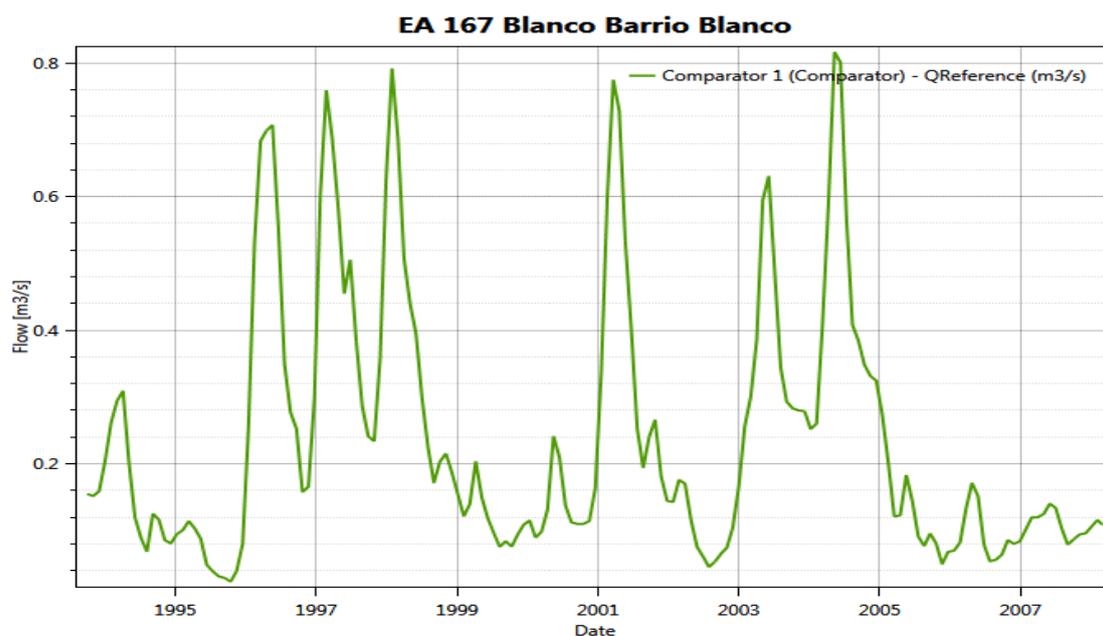


Figura 101. Estación R.O.E.A 9167 Barrio Blanco

EA 9158 JALÓN DE JUBERA

Ubicada sobre el río Jalón en la municipalidad de Arcos de Jalón, su régimen de caudales es de tipo natural, su cuenca (cabecera) aportante es de 196 km². Tiene disponible 64 años hidrológicos (1931-2011) todos completos.

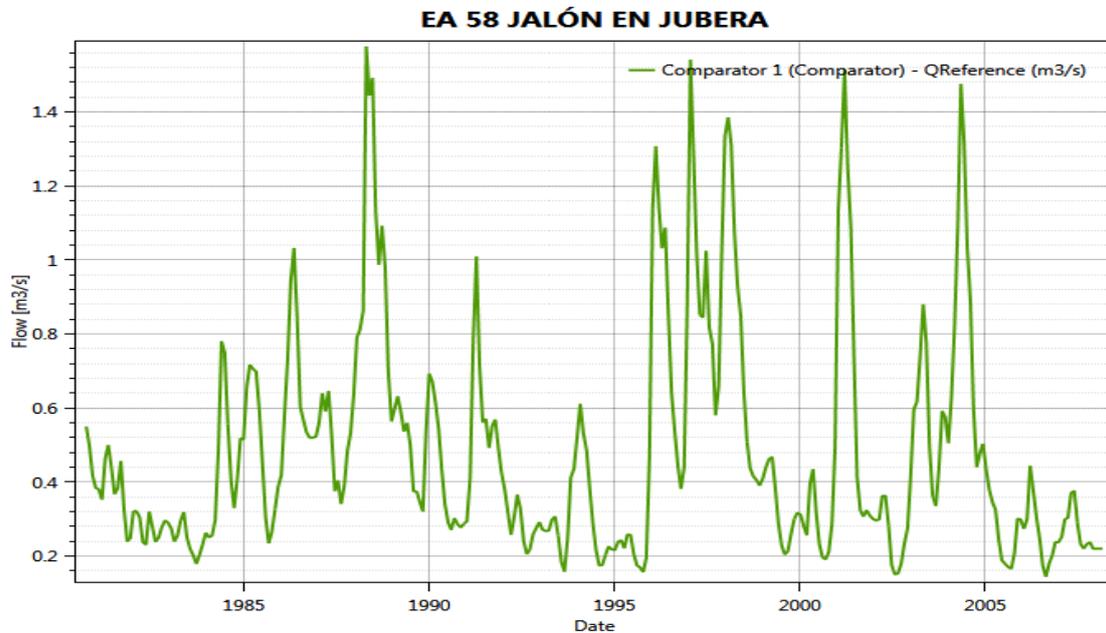


Figura 102. Estación R.O.E.A 9158 Jubera

EA 9807 MONTEAGUDO VICARIAS P.P

Situado en la municipalidad Monteagudo de las Vicarias aguas abajo del embalse de su mismo nombre sobre el río Nájima, tiene una capacidad de 9.73 Hm³, por lo que el régimen gobernante es de tipo alterado, la cuenca aportante al embalse tiene una superficie de 299 km². Tiene disponible 28 años hidrológicos (1984-2011) 27 de ellos completos y 1 incompleto.

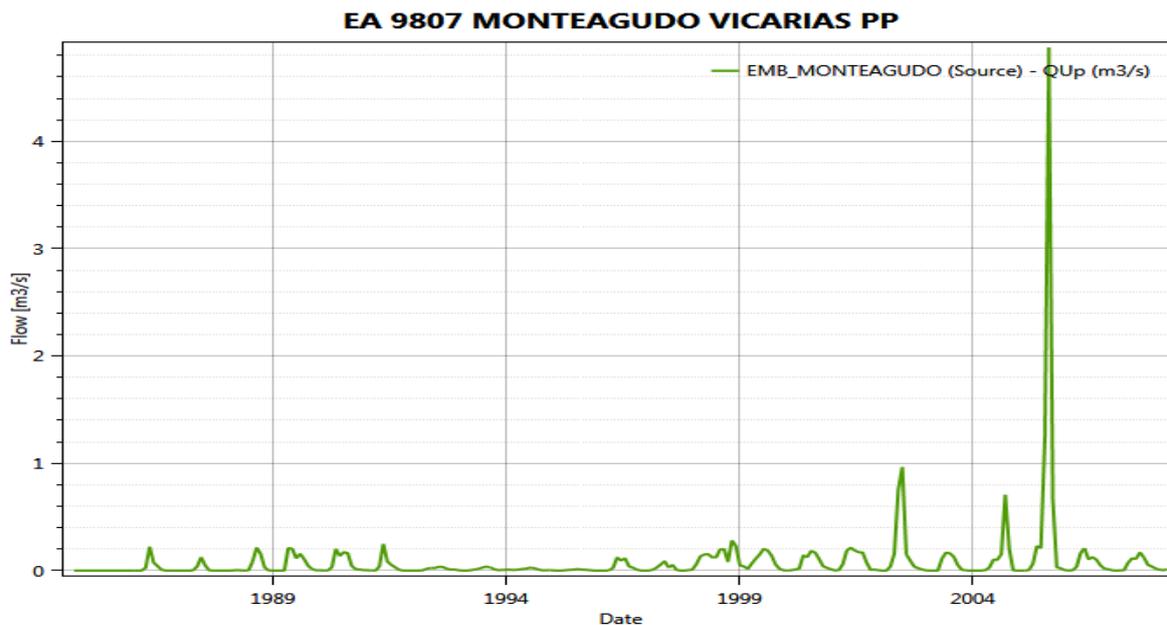


Figura 103. Estación R.O.E.A 9807 Monteagudo Vicarias

EA 9147 MONREAL ARIZA

Ubicado en la municipalidad de Monreal de Ariza en la Provincia de Zaragoza sobre el río Nájima, la cuenca aportante en este punto es de 465km², el régimen que se tiene en esta zona es de tipo alterado, dado que se encuentra aguas abajo del embalse Monteagudo de las Vicarias, es importante a su vez tomar en cuenta la demanda agraria que se produce en este sector de la cuenca. La serie de aportaciones es de 57 años hidrológicos (1954-2011) de los que 3 son años incompletos.

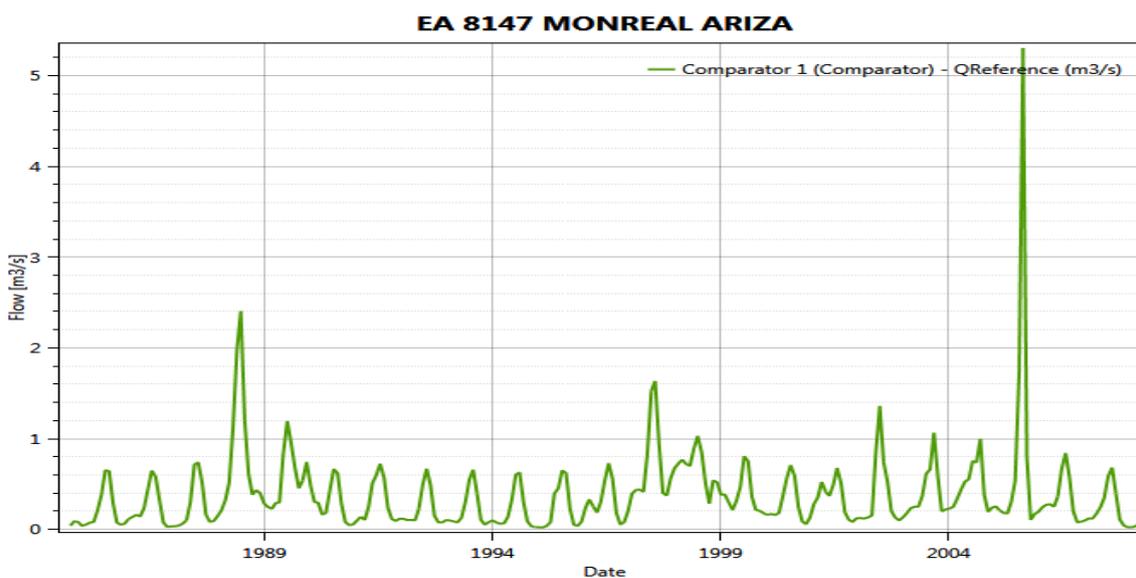


Figura 104. Estación R.O.E.A 9147 Monreal Ariza

EA 9007 CETINA

Ubicado en la municipalidad de Cetina en la provincia de Zaragoza en el cauce del río Jalón, aguas abajo de la estación de aforo EA 9147 Monreal Ariza, su cuenca receptora es de 1600 km². Esta estación recoge la aportación de una cuenca natural pero que se ve al mismo tiempo influenciado por una cuenca alterada procedente de la municipalidad de Monreal de Ariza donde se encuentra el embalse de Monteagudo de las Vicarias. La serie de aportaciones disponible en esta estación datan del año 1912-2004, de los cuales 56 años son completos y 29 incompletos.

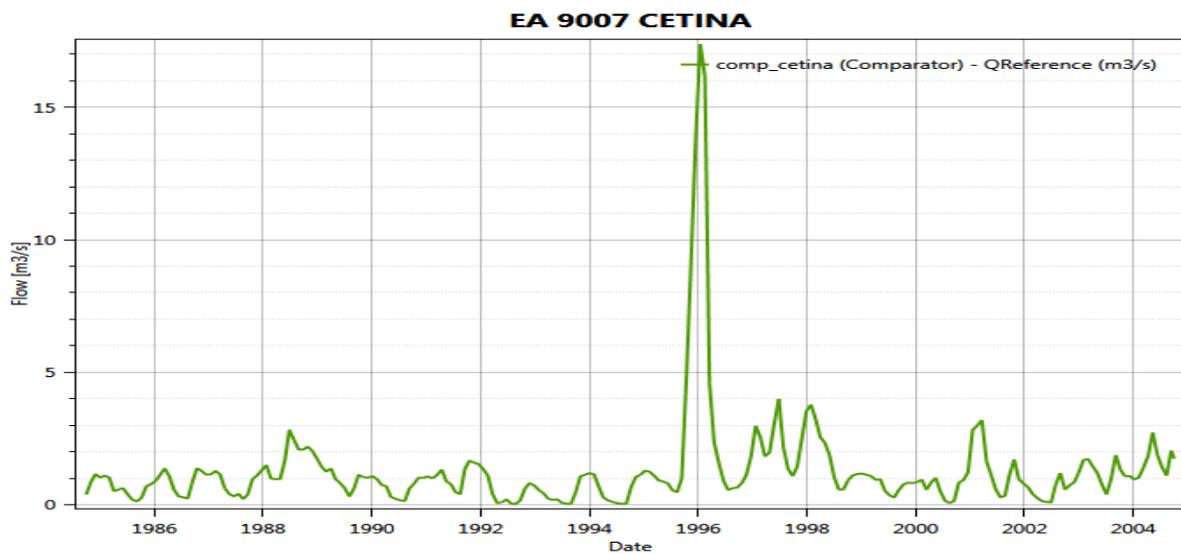


Figura 105. Estación R.O.E.A 9007 Cetina

EA 9057 EMBID ARIZA

Ubicado en la Municipalidad de Embid Ariza en la provincia de Zaragoza en el cauce del río Henar o Deza, la cuenca (cabecera) aportante es de 207 km². El régimen de caudales o aportaciones gobernante en esta cuenca es de tipo natural, a lo largo de la cuenca se tienen demandas de tipo industrial y agrario sin ser sumamente significativas. La serie de aportaciones disponible en esta estación datan del año 1931-2011, de los cuales 60 años son completos y 13 incompletos.

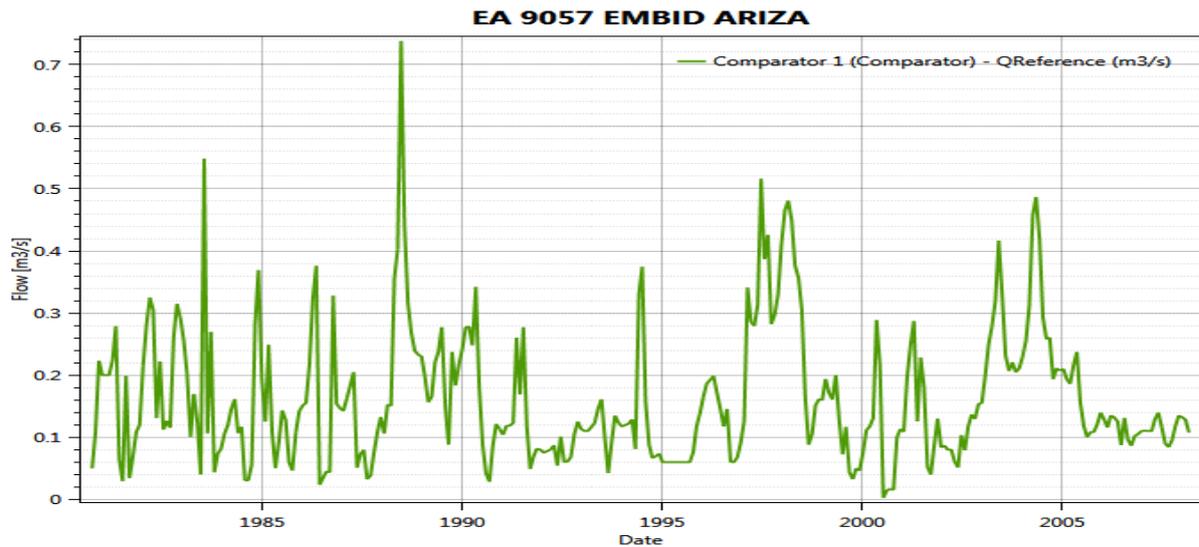


Figura 106. Estación R.O.E.A 9057 Embid Ariza

EA 9126 ATECA

Ubicado en la municipalidad de Ateca en la provincia de Zaragoza en el cauce del río Jalón, su cuenca receptora es de 3619 km², en este punto se recoge las aportaciones de gran parte del Sistema Jalón en conjunto con las sueltas del embalse de la Tranquera ubicada en el sistema Piedra. El régimen de caudales o aportaciones gobernante en esta cuenca se encuentra en régimen natural. La serie de aportaciones disponible en esta estación datan del año 1952-2011, de los cuales 54 años son completos y 6 incompletos.

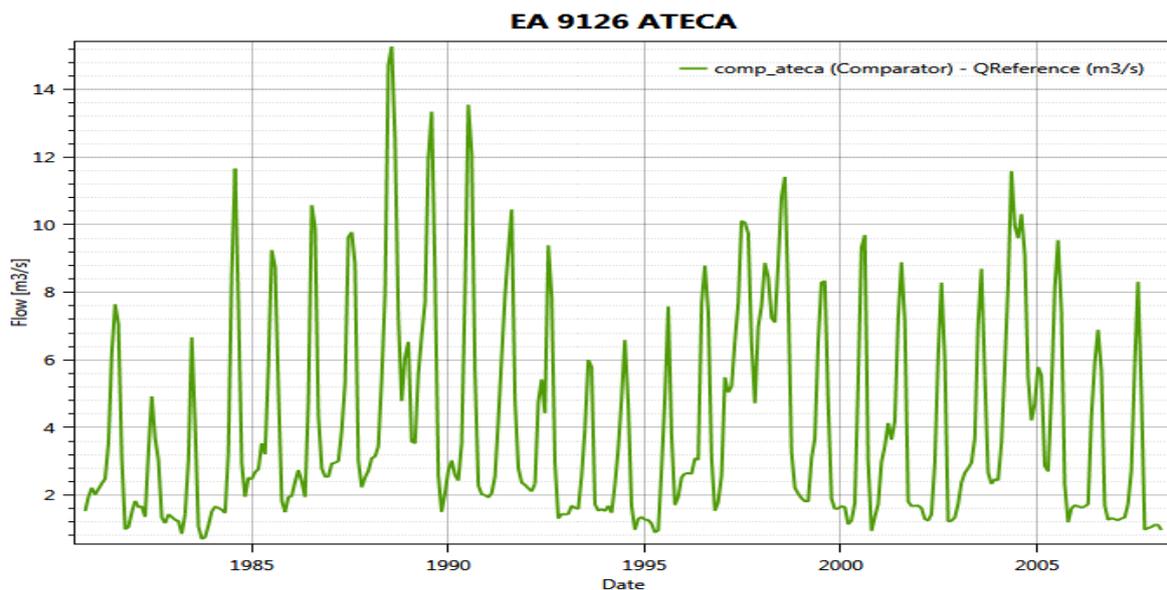


Figura 107. Estación R.O.E.A 9126 Ateca

EA 9266 CALATAYUD

Situado en la municipalidad de Calatayud en la provincia de Zaragoza, en el cauce del río Jalón, en este punto se lleva a cabo la unión de 4 sistemas de explotación, una parte del Sistema Jalón, y todo las cuencas aportantes correspondientes a los sistemas: Piedra, Manubles y Jiloca. Su cuenca receptora es de 6841 km². Tiene disponible para la modelación 19 años hidrológicos (1993-2011) 17 de ellos completos y 2 incompletos.

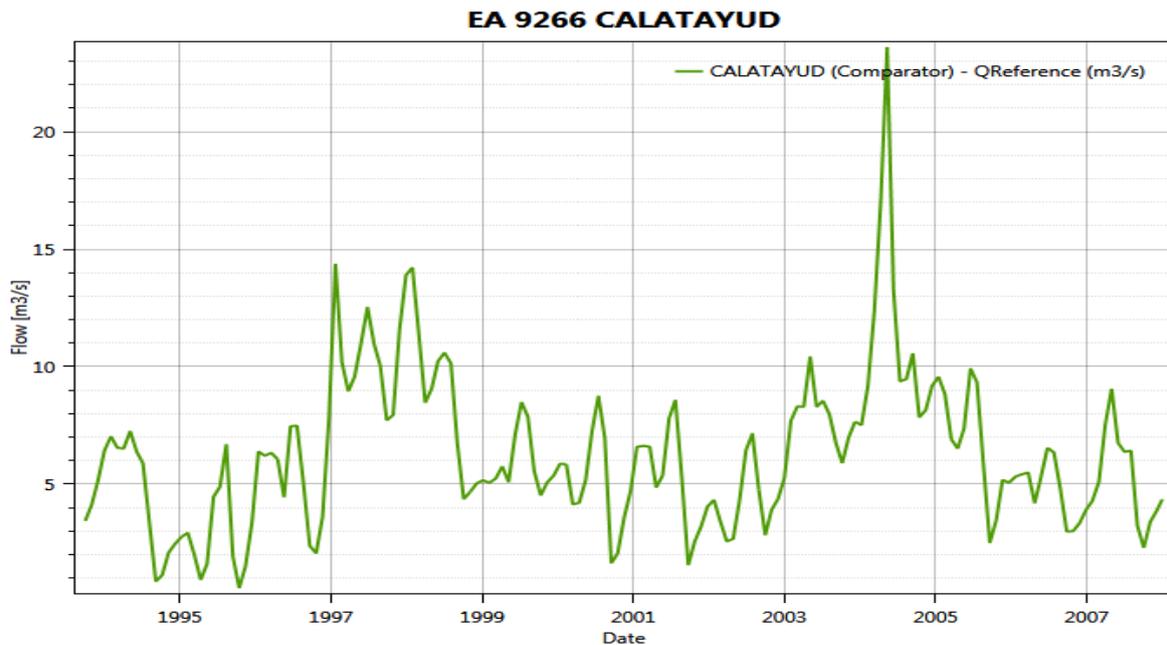


Figura 108. Estación R.O.E.A 9266 Calatayud

EA 9009 HUÉRMADA

Localizado en la municipalidad de Calatayud en la provincia de Zaragoza, aguas abajo de la EA 9266 Calatayud en el cauce del río Jalón, su cuenca aportante es de 7164 km². Tiene disponible para la modelación 83 años hidrológicos (1993-2011) de los cuales 55 años son completos mientras que en los otros 28 no cuentan con las series completas.

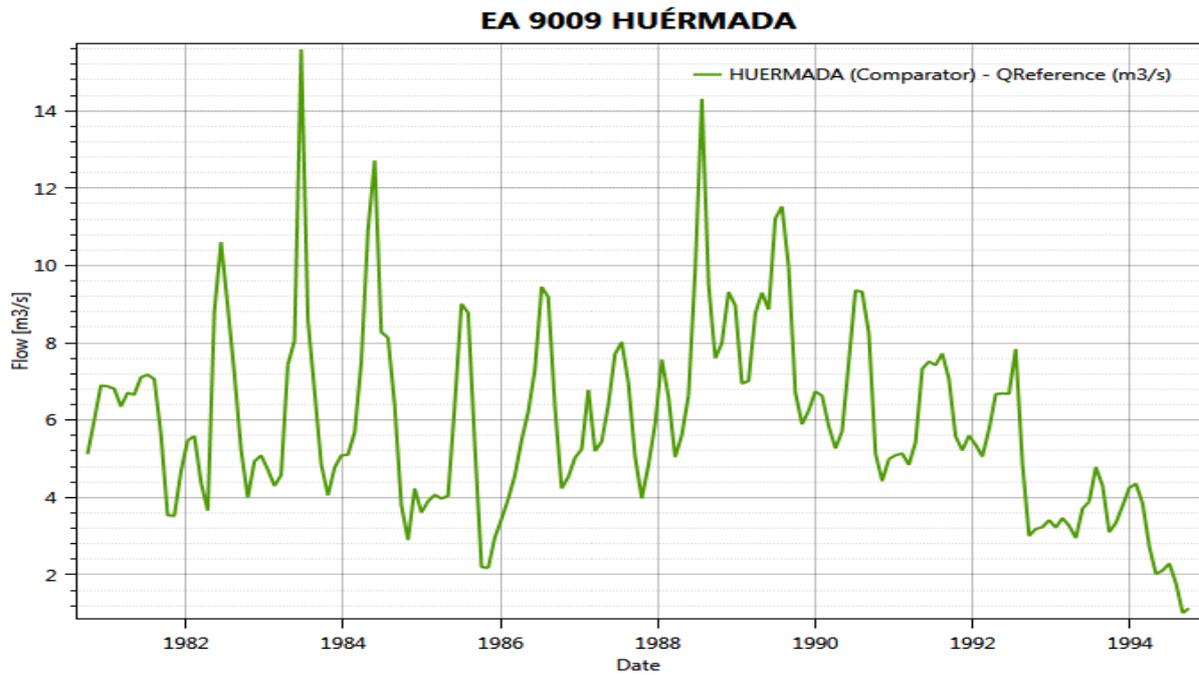


Figura 109. Estación R.O.E.A 9009 Huérmada

EA 9278 CHODES

Situado en la municipalidad de Arándiga en la provincia de Zaragoza, aguas abajo de la estación EA 9009 Huérmada en el cauce del río Jalón, las cuencas aportantes suman en conjunto un total de 7561 km². La serie de aportaciones disponible en esta estación datan del año 1999-2011, de los cuales 10 años son completos y 3 incompletos.

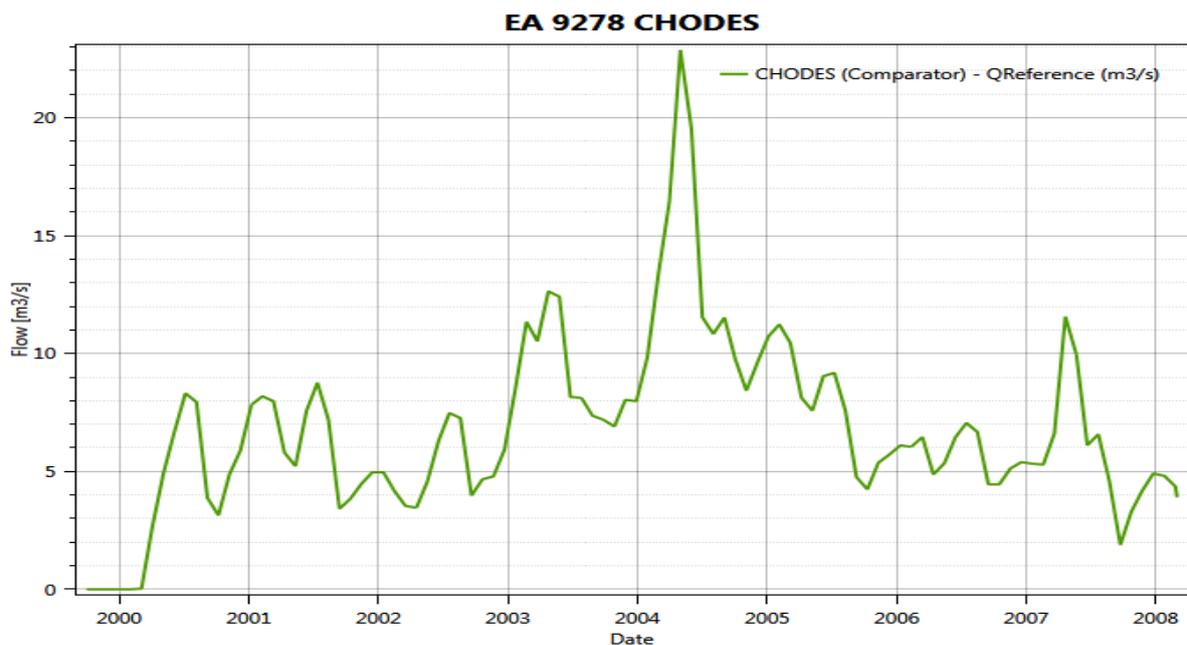


Figura 110. Estación R.O.E.A 9278 Chodes

EA 9087 GRISEN

Situado en la municipalidad de Bárboles en la provincia de Zaragoza, aguas abajo de la estación EA 9278, en la desembocadura del Jalón el cual está siendo objeto de estudio, por tanto corresponde al tramo final donde se evaluará la funcionalidad del modelo a desarrollar. La cuenca aportante hasta su desembocadura tiene una superficie de 9694 km². La serie de aportaciones disponible en esta estación datan del año 1934-2011, sin embargo no se realizaron mediciones en todo los años de tal modo que se cuenta con 36 años son completos y 8 incompletos.

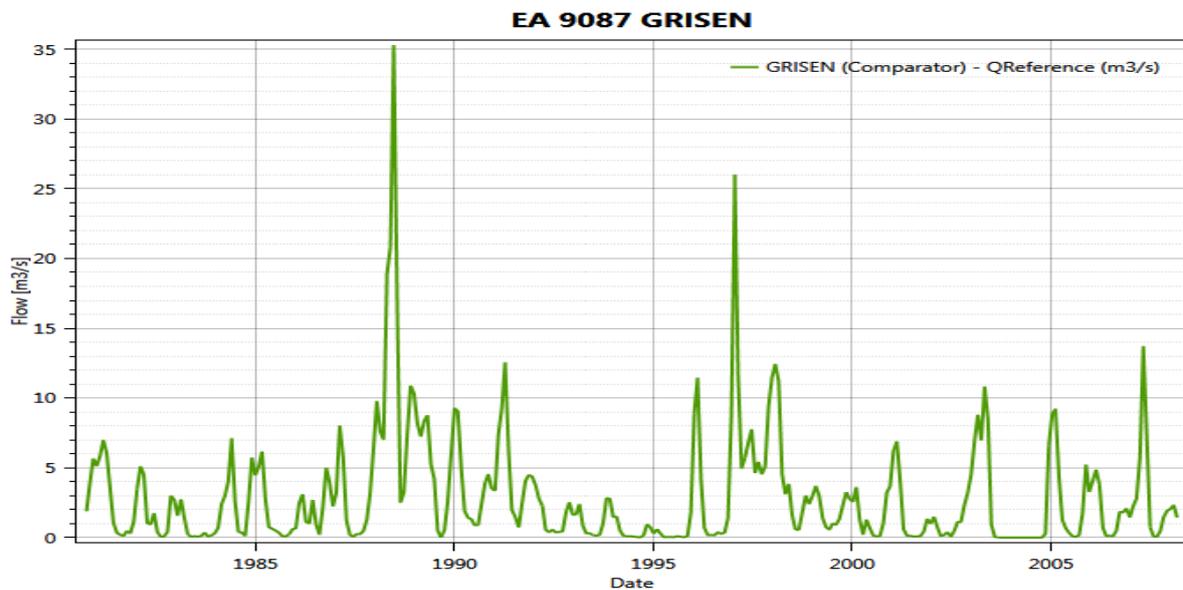


Figura 111. Estación R.O.E.A 9087 Grisen