

Trabajo Fin de Máster

Implementación de un modelo hidrológico distribuido y análisis del impacto del cambio climático en la cuenca del Río San Nicolau: Parque Nacional de Aigüestortes y Lago de San Mauricio, España.

Intensificación: ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

**JHONY ALEJANDRO VALENCIA
OCAMPO**

Tutor:

Dr. FÉLIX FRANCÉS GARCÍA

Cotutor:

Dr. JORGE JULIAN VÉLEZ UPÉGUI

SEPTIEMBRE, 2019.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

RESUMEN DEL TRABAJO DE FIN DE MÁSTER.**Datos del proyecto.**

Título del TFM en español: Implementación de un modelo hidrológico distribuido y análisis del impacto del cambio climático en la cuenca del Río San Nicolau: Parque Nacional de Aigüestortes y Lago de San Mauricio, España.

Título del TFM en inglés: Implementation of a distributed hydrological model and analysis of the impact of climate change in the San Nicolau River basin: Aigüestortes and San Mauricio Lake National Park, Spain.

Título del TFM en Valenciano: Implementació d'un model hidrològic distribuït i anàlisi de l'impacte del canvi climàtic en la conca del Riu Sant Nicolau: Parc Nacional d'Aigüestortes i Llac de Sant Maurici, Espanya.

Alumno: Jhony Alejandro Valencia Ocampo

Tutor: Félix Francés Garcia

Cotutor: Jorge Julián Vélez Upégui

Fecha de Lectura: Septiembre, 2019

Resumen.

En español: En el presente trabajo de fin de máster se propone implementar un modelo hidrológico de tipo distribuido sobre una cuenca de alta montaña llamada San Nicolau, ubicada en el Parque Nacional de Aigüestortes y Lago de San Mauricio, que permita conocer el comportamiento del ciclo hidrológico bajo condiciones actuales, estimando los flujos de entrada, de salida y los almacenamientos; partiendo de uno ya implementado en la subcuenca del Lago Contraix como parte del proyecto ACOPLA "Acoplamiento de los ciclos hidrobiogeoquímicos del carbono y nitrógeno en cuencas lacustres de alta montaña durante episodios hidrológicos intensos, estima de su peso relativo en los organismos". Esto con la finalidad de intentar analizar como este se verá afectado en un horizonte futuro bajo condiciones de cambio climático, que para España específicamente, se espera sean adversas (disminución en las precipitaciones, incremento en las temperaturas) de acuerdo a los modelos climáticos globales (MCG) de los últimos escenarios de emisión del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) en su quinto informe (AR5).

Paralelamente, se analizará también una posible contradicción entre los resultados del modelo implementado para la cuenca del Lago Contraix (subcuenca de San Nicolau) en ACOPLA y los obtenidos en la componente hidrológica del proyecto ISOTOPOS "Uso de isótopos estables y radiactivos en seguimiento e investigaciones a largo plazo (LTER) de los ecosistemas acuáticos de los Parques Nacionales", referente a los flujos asociados al acuífero y al interflujo. Debido a que, en los resultados de ACOPLA el interflujo predomina sobre el flujo base; y en ISOTOPOS parece que prima el flujo base.

El modelo hidrológico se implementará a través del software de libre distribución TETIS en versión 9.0.1, el cual ha sido empleado exitosamente en múltiples casos de estudio previos y además, fue el programa en el que se desarrolló la hidrología de Contraix en ACOPLA. El modelo se reproducirá nuevamente para esta subcuenca a raíz de que se desarrolló en una versión anterior de TETIS (v8.0.3) y se recalibrará si es necesario, para luego ser validado en San Nicolau.

TETIS requiere para su implementación información hidrometeorológica y cartográfica. La primera de ellas necesaria para la preparación del fichero de entrada que incluye series temporales de precipitación, temperatura, evapotranspiración (estimada a partir de información de temperaturas mínimas, medias y máximas), radiación neta y caudales; ésta será proporcionada por el Centre d'Estudis Avançats de Blane (CSIC) en Blanes, España. La segunda, brinda la posibilidad de

determinar los mapas de parámetros que representan el comportamiento de la cuenca y que introducen la variabilidad espacial, entre ellos, se incluyen el almacenamiento estático (Hu), la conductividad hidráulica del suelo (Ks), la permeabilidad del acuífero (Kp), el factor de vegetación a partir del mapa de cobertura vegetal, entre otros; esta partirá de la obtenida en ACOPLA para Contraix (que incluye comprobaciones y mediciones de campo) y se completará con información secundaria para los límites que estén fuera de esta subcuenca.

Para el análisis del impacto del cambio climático a nivel de balance hidrológico en la zona de estudio, la información será la brindada por la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología de España). En este caso en particular se trabajará sobre el escenario RCP 8.5, que es el más pesimista de todos en cuanto al nivel de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI); considerando que San Nicolau es una cuenca de alta montaña y se presentan procesos de acumulación y fusión de nieve. Este análisis permitirá determinar posibles alteraciones en el comportamiento hidrológico de la cuenca para horizontes temporales futuros, que pueden traer repercusiones positivas o negativas sobre el entorno, pero especialmente sobre el régimen de caudales y la evolución nival.

En inglés: This project of master thesis proposes the implementation of a distributed hydrological model on a high mountain basin called San Nicolau, that is located in the National Park of Aigüestortes and San Mauricio Lake. which allows to know the behavior of the hydrological cycle under current conditions, estimating the entry flow, the exit flow and storage; starting from one previously model implemented in the Lake Contraix sub-basin as part of the ACOPLA project "Coupling the hydrobiogeochemical cycles of carbon and nitrogen in a high mountain lake basins during intense hydrological episodes, estimation of their relative weight in organisms". This was done in order to try to analyze how the basin will be affected in a future horizon under conditions of climate change, which for Spain specifically, is expected to be adverse (decrease in precipitation, increase in temperatures) according to global climate models (GCM) of the latest emission scenarios of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in its fifth report (AR5).

At the same time, a possible contradiction will also be analysed between the results of the model implemented for the Lake Contraix basin (San Nicolau sub-basin) in ACOPLA and those obtained in the hydrological component of the ISOTOPOS project "Use of stable and radioactive isotopes in long-term monitoring and research (LTER) of the aquatic ecosystems of the National Parks", referring to the flows associated with the aquifer and the interflux. Due to the fact, in the ACOPLA results, the interflow predominates over the base flow; and in ISOTOPOS it seems that the base flow prevails.

The hydrological model will be implemented through the free distribution software TETIS version 9.0.1, which has been successfully used in multiple previous case studies and was also the program in which the hydrology of Contraix was developed in ACOPLA. The model will be reproduced again for this subbasin because it was developed in an earlier version of TETIS (v8.0.3) and will be recalibrated if necessary, and then validated in San Nicolau.

TETIS requires hydrometeorological and cartographic information for its implementation. The first of them is necessary for the preparation of the input files that include time series of precipitation, temperature, evapotranspiration (estimated from information of minimum, mean and maximum temperatures), net radiation and discharges; this will be provided by the Centre d'Estudis Avançats de Blanes (CSIC) in Blanes, Spain. The second offers the possibility of determining the maps of parameters that represent the behaviour of the basin and that introduce spatial variability, including static storage (Hu), the hydraulic conductivity of the soil (Ks), the permeability of the aquifer (Kp), the vegetation factor from the vegetation cover map, among others; this will start from the one obtained in ACOPLA for Contraix (which includes field checks and measurements) and will be completed with secondary information for the limits that are outside this subbasin.

For the analysis of the impact of climate change referred to hydrological balance in the study area,

the information will be provided by AEMET (Agencia Estatal de Meteorología de España). In this case, work will be done on scenario RCP 8.5, which is the most pessimistic of all as regards the level of greenhouse gas (GHG) emissions; considering that San Nicolau is a high mountain basin and there are processes of snow accumulation and melting. This analysis will make it possible to determine possible alterations in the hydrological cycle of the basin for future time horizons, which may have positive or negative repercussions on the environment, but especially on the flow regime and snowfall evolution.

Palabras clave español: modelo hidrológico, cambio climático, San Nicolau, TETIS, RCP 8.5.

Palabras clave inglés: hydrological modelling, climate change, San Nicolau river, TETIS, RCP 8.5.

Palabras clave valenciano: model hidrològic, canvi climàtic, Sant Nicolau, TETIS, RCP 8.5.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, dar gracias a Dios por esta bella oportunidad brindada y porque en él encontré refugio en los momentos más difíciles.

A mi tutor, el Dr. Félix Francés, gracias infinitas por su asesoría constante, permanente y oportuna; además, porque el éxito de este trabajo no hubiese sido el mismo sin su buena gestión y disposición en la búsqueda de los medios necesarios para ofrecerme las condiciones adecuadas y de permanencia en Valencia.

A mi cotutor, el Dr. Jorge Julián Vélez, porque siempre estuvo pendiente cuando lo necesitaba, por los oportunos consejos, recomendaciones; y porque me acogió durante el tiempo que estuve en Colombia en el desarrollo de esta tesis, como uno más de sus estudiantes.

Al Dr. Lluís Camarero Galindo del Centre D'Estudis Avançats de Blanes (CSIC).

A mis padres y mi hermanito, por su amor y su apoyo brindado siempre que lo he necesitado, pero mucho más en este proceso.

A Don Freddy y Doña Nora, mis suegros, por todo el apoyo brindado a lo largo de este proceso; sin él este logro habría sido muy difícil de conseguir.

A Fergie, por ser mi motor en los momentos más difíciles, pero también por haber tomado la iniciativa para iniciar este maravilloso proceso, del que estaré orgulloso toda mi vida. Infinitas gracias por estar ahí siempre para mí, por apoyarme siempre en cada paso que doy.

Al Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA) por su acogida y apoyo brindado en todo este proceso; haciendo mención especial a Ricardo y a Claudia por brindarme su amistad y sus sabios consejos.

Por último, a la Universitat Politècnica de València y al MIHMA, por la acogida y la excelente formación impartida, que sin duda me ayudó tanto a crecer profesionalmente como personalmente.

CONTENIDO

1	INTRODUCCION	13
1.1	Introducción General	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	General	14
1.2.2	Específicos.....	14
1.3	Metodología.....	15
2	ESTADO DEL ARTE	16
2.1	Modelos Hidrológicos	16
2.1.1	Modelo Hidrológico Distribuido: TETIS	16
2.2	Cambio Climático	27
2.2.1	Sendas Representativas de Concentración	28
2.2.2	Modelos Climáticos Globales (MCG) o de Circulación General (MCCG)	30
2.2.3	Métodos de Regionalización	31
2.2.4	Corrección del Sesgo.....	32
2.3	Antecedentes	33
2.3.1	Proyecto ACOPLA	33
2.3.2	Proyecto ISOTOPOS	37
3	CASO DE ESTUDIO	41
3.1	Delimitación Geográfica	41
3.2	Información Hidroclimatológica	41
3.2.1	Precipitación, Temperatura	42
3.2.2	Evapotranspiración de Referencia (ETP).....	44
3.3	Topografía	47
3.4	Suelos	48
3.5	Información Batimétrica	49
3.6	Usos de Suelo	50
3.7	Geología y Litología.....	51
3.8	Hidrogeología	53
4	EXTRAPOLACIÓN DE MAPAS DE PARÁMETROS	55
4.1	Mapas derivados del DEM	55
4.1.1	Mapa de Pendientes	55

4.1.2	Mapa de Velocidades.....	56
4.1.3	Mapa de celdas drenantes acumuladas y direcciones de flujo	56
4.2	Factor de cultivo o vegetación (λ_v).....	58
4.3	Parámetros Espaciales.....	59
5	MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	61
5.1	Cuenca Lago Contraix.....	62
5.1.1	Calibración.....	63
5.1.2	Validación Temporal	66
5.1.3	Validación Espacio-Temporal	68
5.2	Cuenca Río San Nicolau	69
5.2.1	Modelo Hidrológico con 2 estaciones de Temperatura	70
5.2.2	Modelo Hidrológico con 13 estaciones de Temperatura	78
5.3	Discusión de resultados	85
6	SIMULACIONES CAMBIO CLIMÁTICO	87
6.1	Análisis previo de modelos de cambio climático regionalizados	87
6.1.1	Análisis gráfico de valores mensuales de precipitación y temperatura	87
6.1.2	Análisis gráfico de valores extremos en Precipitación	89
6.1.3	Análisis Estadístico: Media de los Datos.....	91
6.1.4	Análisis Estadístico: Coeficiente de Variación (CV) y Coeficiente de Asimetría de las series de precipitaciones.	92
6.1.5	Análisis Estadístico: Días sin precipitación (DsP).	93
6.2	Corrección del Sesgo	94
6.2.1	Resultados obtenidos para las proyecciones climáticas con Corrección del Sesgo	94
6.2.2	Modelos de cambio climático seleccionados	98
6.3	Resultados: Modelación hidrológica con escenario de cambio climático RCP8.5.....	100
6.3.1	Precipitación	100
6.3.2	Temperaturas.....	102
6.3.3	Evapotranspiración	103
6.3.4	Caudales.....	104
6.3.5	Almacenamiento de Nieve	107
7	CONCLUSIONES	110
8	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA	113
	ANEXOS.....	117
	ANEXO I: Curvas Cota – Capacidad de Lagos en San Nicolau	117

Lago de Contraix	118
Lago Llong	119
Lago Redó.....	120
Lago Delluí	121
Lago Estanyet de Delluí	122
Lago Corticelles	123
Lago Comat D'Amitges	124
Lago de Perdut.....	125
Lago Nere Superior	126
Lago Nere	127
Lago Granotes	128
Lago Bergús.....	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema Simplificado de una celda. Fuente: Montoya Monsalve (2008)	18
Figura 2. Esquema Conceptual de tanques a nivel de celda en TETIS modificado. Fuente: Molina Celeita (2018).	19
Figura 3. Movimiento horizontal propuesto por el modelo. Fuente: (GIHMA, 2018).	19
Figura 4. Elementos del sistema, áreas umbrales y componentes de la escorrentía en TETIS. Fuente: Montoya (2008).	20
Figura 5. Método de Laminación de embalses empleado por el método de Puls Modificado. Fuente: Chow et al. (1994).	22
Figura 6. Conceptualización parámetro efectivo uniforme implementado en TETIS.	24
Figura 7. Concentraciones de Principales GEI's desde el año 0 al 2005. Fuente: IPCC (2007).	27
Figura 8. Forzamiento radiativo del clima desde el año 1750 al 2005: Principales Componentes. Fuente: IPCC (2007)	28
Figura 9. Escenarios de trayectorias de concentración representativas (RCP). Fuente: AEMET, (n.d.)	29
Figura 10. (a) Cambio en la temperatura media en superficie y (b) cambio en la media de precipitaciones, para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, respectivamente. Fuente: IPCC, (2014a).	30
Figura 11. Esquema de anidamiento del dominio de un MCR (malla en rojo) en el dominio global de un MCGAO. Fuente: Morata Gasca (2014)	32
Figura 12. Localización geográfica de la cuenca del Lago Contraix. Fuente: Orozco Medina (2011)	34
Figura 13. Estaciones de aforo en Contraix. Fuente: Orozco Medina (2011)	34
Figura 14. Hidrograma de caudales 2010-2011 de la cuenca del Lago Contraix. Fuente: adaptado Orozco Medina (2011).	35
Figura 15. Flujos de salida de la cuenca del Lago Contraix. Fuente: adaptado Orozco Medina (2011).	36
Figura 16. Modelo de mezcla de la cuenca del lago Contraix. Fuente: Camarero et al., (2019).	38
Figura 17. Valores de δD modelados a partir de los flujos obtenidos en TETIS. Fuente: Camarero et al. (2019)	39
Figura 18. Valores de δD modelados a partir de los flujos obtenidos en TETIS. Fuente: Camarero et al. (2019)	39
Figura 19. Mapa de localización de la cuenca del Río San Nicolau.	41
Figura 20. Serie de precipitación para el año 2013-2014 de las estaciones Llebreta, Contraix y Spain02.	42
Figura 21. Serie de temperaturas medias para el año 2013-2014 de las estaciones Llebreta, Contraix y Spain02.	43
Figura 22. Series de temperaturas medias de 1971 al 2000 de las estaciones Llebreta, Contraix y Spain02.	43
Figura 23. Series de precipitaciones de 1971 al 2000 de las estaciones Llebreta, Contraix y Spain02.	44
Figura 24. Serie temporal de ETP obtenida por el método de Hargreaves en periodo de calibración 2010-2011.	46
Figura 25. Serie temporal de ETP obtenida por el método de Hargreaves en periodo de calibración 2013-2014.	46
Figura 26. ETP mensual obtenida por el método de Hargreaves en periodo histórico (1971-2000) para las estaciones de Llebreta y Contraix a partir de Spain02.	47
Figura 27. Modelo de Elevación Digital del Terreno de la cuenca del Río San Nicolau.	48
Figura 28. Mapa de suelos de la zona de estudio. Fuente: adaptado IGN (2006).	49
Figura 29. Mapa de ocupación de suelos de la zona de estudio. Fuente: IGN (2006)	50

Figura 30. Mapa de ocupación de suelos de la zona de estudio. Fuente: (IGN, 2006)	51
Figura 31. Mapa geológica escala 1:50.000 de la zona de estudio. Fuente: IGN (2006)	52
Figura 32. Litología de la zona de estudio. Fuente: adaptado (CSIC, 2018)	53
Figura 33. Mapa Hidrogeológico de la zona de estudio. Fuente: adaptado IGME (2009)	54
Figura 34. Mapa de pendientes de la cuenca del Río San Nicolau.....	55
Figura 35. Mapa de velocidades de la cuenca del Río San Nicolau.	56
Figura 36. Mapa de direcciones de flujo de la cuenca del Río San Nicolau.	57
Figura 37. Mapa de celdas drenantes acumuladas de la cuenca del Río San Nicolau.	57
Figura 38. Distribución temporal del índice de cobertura vegetal usado en la cuenca de los ríos Saja-Besaya. Fuente: (Múnera & Francés, 2008).	58
Figura 39. Mapa de almacenamiento capilar del suelo en la cuenca San Nicolau.	59
Figura 40. Mapa de capacidades de infiltración de la cuenca San Nicolau.	60
Figura 41. Mapa de capacidad de percolación/permeabilidad de acuífero de la cuenca San Nicolau.	60
Figura 42. Mapa de estaciones hidrometeorológicas de la cuenca del río San Nicolau.	61
Figura 43. Hidrograma de caudales 2010-2011 de la cuenca del Lago Contraix.	64
Figura 44. Flujos y salidas simulados por TETIS en calibración para periodo 2010-2011 de la cuenca del Lago Contraix.	64
Figura 45. Hidrograma de caudales en validación temporal de la cuenca del Lago Contraix.....	67
Figura 46. Hidrograma de caudales en validación espacio-temporal de la cuenca del Lago Contraix.	68
Figura 47. Hidrograma de caudales en calibración de la cuenca del Río San Nicolau.	71
Figura 48. Flujos y salidas simulados por TETIS en calibración de la cuenca río San Nicolau.	72
Figura 49. Almacenamientos principales simulados por TETIS en calibración de la cuenca río San Nicolau.	73
Figura 50. Hidrograma de caudales en validación temporal de la cuenca del Río San Nicolau.	75
Figura 51. Hidrograma de caudales en validación espacio-temporal de la cuenca del Río San Nicolau en CISCO1.	77
Figura 52. Hidrograma de caudales en calibración de la cuenca del Río San Nicolau.	79
Figura 53. Flujos y salidas simulados por TETIS en calibración de la cuenca río San Nicolau.	79
Figura 54. Almacenamientos principales simulados por TETIS en calibración de la cuenca río San Nicolau.	80
Figura 55. Hidrograma de caudales en validación temporal de la cuenca del Río San Nicolau.	82
Figura 56. Hidrograma de caudales en validación espacio-temporal de la cuenca del Río San Nicolau en CISCO1.	84
Figura 57. Precipitaciones medias mensuales: Método Análogos.....	88
Figura 58. Precipitaciones medias mensuales: Método SDSM.....	88
Figura 59. Temperaturas medias mensuales: Método Análogos.....	89
Figura 60. Temperaturas medias mensuales: Método SDSM.....	89
Figura 61. Precipitaciones máximas anuales: Método Análogos.....	90
Figura 62. Precipitaciones máximas anuales: Método SDSM.....	90
Figura 63. Precipitaciones medias mensuales con corrección del sesgo: Método Análogos.	95
Figura 64. Precipitaciones medias mensuales con corrección del sesgo: Método SDSM.	95
Figura 65. Precipitaciones máximas anuales con corrección del sesgo: Método SDSM.	96
Figura 66. Precipitaciones máximas anuales con corrección del sesgo: Método SDSM.	96
Figura 67. Temperaturas medias mensuales con corrección del sesgo: Método Análogos.	97
Figura 68. Temperaturas medias mensuales con corrección del sesgo: Método SDSM.	97
Figura 69. Precipitaciones medias mensuales con corrección del sesgo: Modelos Seleccionados.	99
Figura 70. Temperaturas medias mensuales con corrección del sesgo: Modelos Seleccionados	100

Figura 71. Serie de precipitación para horizonte 2071-2100.	101
Figura 72. Precipitación areal mensual en forma de lluvia para escenario de cambio climático RCP8.5 en periodo de control (azul) y periodo futuro (rojo).	102
Figura 73. Precipitación areal mensual en forma de nieve para escenario de cambio climático RCP8.5 en periodo de control (azul) y periodo futuro (rojo).	102
Figura 74. Temperaturas máximas mensuales trasladadas a Est. Cotnraix para escenario de cambio climático RCP8.5 en periodo de control (azul) y periodo futuro (rojo).	103
Figura 75. Temperaturas mínimas mensuales trasladadas a Est. Contraix para escenario de cambio climático RCP8.5 en periodo de control (azul) y periodo futuro (rojo).	103
Figura 76. ETP media mensual trasladada a Est. Contraix para escenario de cambio climático RCP8.5 en periodo de control (azul) y periodo futuro (rojo).	104
Figura 77. Caudales medios mensuales simulados en TETIS para modelación de cambio climático en periodo de control (azul) y RCP8.5 (rojo).	105
Figura 78. Periodo de retorno de los caudales simulados en TETIS para periodo de control y escenario de cambio climático RCP8.5.	106
Figura 79. Curva de caudales máximos anuales ordenados observados y simulados en periodo de control (azul) y en periodo futuro (rojo) para escenario de cambio climático RCP8.5.	107
Figura 80. SWE diaria simulada en TETIS para modelo ACCESS1-0 en periodo de control (azul) y periodo futuro (rojo) para escenario de cambio climático RCP8.5.	108
Figura 81. SWE mensual simulada en TETIS para escenario de cambio climático RCP8.5.	109

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nuevos Escenarios de Emisión del AR5. Fuente: Adaptado de Losada Rodríguez & Picatoste, (2013).	29
Tabla 2. Factores Correctores en TETIS de la modelación hidrológica de la cuenca del Lago Contraix. Fuente: (Orozco Medina, 2011)	35
Tabla 3. Estadísticos obtenidos en calibración del modelo. Fuente: (Orozco Medina, 2011).	36
Tabla 4. Balance Hidrológico de la cuenca del Lago Contraix. Fuente: Orozco Medina (2011).	37
Tabla 5. Radiación Solar incidente en MJ/m ² /día para la zona de estudio. Fuente: Allen (1998)	45
Tabla 6. Factor de conversión para la Radiación Solar incidente de MJ/m ² /día a mm/día para la zona de estudio. Fuente: Allen et al. (1998)	46
Tabla 7. Radiación Solar extraterrestre en mm/día para la zona de estudio.	46
Tabla 8. Principales Características Topográficas de la zona de estudio.	47
Tabla 9. Formaciones litológicas presentes en la zona de estudio.	51
Tabla 10. Principales Estadísticos del mapa de pendientes de la zona de estudio.	55
Tabla 11. Factores Correctores en TETIS de la modelación hidrológica de la cuenca del Lago Contraix.	63
Tabla 12. Estadísticos obtenidos en calibración del modelo.	65
Tabla 13. Balance Hidrológico de la cuenca del Lago Contraix.	65
Tabla 14. Estadísticos obtenidos en validación temporal del modelo.	66
Tabla 15. Balance Hidrológico de la cuenca del Lago Contraix en Validación Temporal.	67
Tabla 16. Estadísticos obtenidos en validación espacio-temporal del modelo.	68
Tabla 17. Balance Hidrológico de la cuenca del Lago Contraix en Validación.	69
Tabla 18. Factores Correctores en TETIS de la modelación hidrológica de la cuenca río San Nicolau.	70
Tabla 19. Estadísticos obtenidos en calibración del modelo.	73
Tabla 20. Balance Hidrológico de calibración de la cuenca del río San Nicolau.	74
Tabla 21. Estadísticos obtenidos en validación temporal del modelo.	75
Tabla 22. Balance Hidrológico de validación temporal de la cuenca del río San Nicolau.	75
Tabla 23. Estadísticos obtenidos en validación espacio-temporal del modelo.	76
Tabla 24. Balance Hidrológico de validación espacio-temporal de la cuenca del río San Nicolau en CISCO1.	77
Tabla 25. Factores Correctores en TETIS de la modelación hidrológica de la cuenca río San Nicolau con 13 estaciones de temperatura.	78
Tabla 26. Estadísticos obtenidos en calibración del modelo con 13 estaciones de temperatura.	80
Tabla 27. Balance Hidrológico de calibración de la cuenca del río San Nicolau con 13 estaciones de temperatura.	81
Tabla 28. Estadísticos obtenidos en validación temporal del modelo.	82
Tabla 29. Balance Hidrológico de validación temporal de la cuenca del río San Nicolau.	83
Tabla 30. Estadísticos obtenidos en validación espacio-temporal del modelo.	84
Tabla 31. Balance Hidrológico de validación espacio-temporal de la cuenca del río San Nicolau en CISCO1.	85
Tabla 32. Valores medios de precipitación anual para los modelos disponibles por el Método de Regresión y Análogos, Respectivamente	91
Tabla 33. Coeficiente de variación y de asimetría de modelos disponibles por el Método de Regresión y Análogos, Respectivamente	92
Tabla 34. Días sin precipitación de modelos disponibles por el Método de Regresión y Análogos, respectivamente.	93
Tabla 35. Días sin precipitación de modelos disponibles por el Método de Regresión y Análogos, respectivamente.	94

Tabla 36. Días sin precipitación de modelos disponibles por el Método de Regresión y Análogos con corrección de sesgo, respectivamente.....	98
Tabla 37. Precipitación media areal en forma de lluvia y de nieve para periodo de control y futuro.	101
Tabla 38. Temperaturas máximas y mínimas medias anuales para periodo de control y futuro.	102
Tabla 39. ETP media anual para escenario de cambio climático RCP8.5.....	103
Tabla 40. Valores medios de caudales para periodo de control y proyección de cambio climático RCP8.5. .	105
Tabla 41. Reserva de Nieve anual para escenario de cambio climático RCP8.5.	108

1 INTRODUCCION

1.1 Introducción General

El conocimiento y entendimiento del ciclo hidrológico es de vital importancia desde el punto de vista de la hidrología y haciendo énfasis en dos enfoques distintos, uno cuantitativo y otro ambiental. El primero de ellos con un enfoque más clásico y que presta especial interés en los estudios de crecidas y de evaluación de los recursos hídricos. Y el segundo, con un enfoque más interactivo, como lo es la influencia del agua en la conservación y mantenimiento del ecosistema fluvial y de vegetación de ribera; por ejemplo, los objetivos de calidad de aguas con respecto al transporte de elementos y compuestos químicos, cumplimiento de caudales ecológicos, etc.

En la hidrología, uno de los principales problemas ha sido la representación de los procesos físicos que ocurren en las cuencas hidrográficas en el proceso de transformación de la lluvia en escorrentía. Es allí donde la modelación hidrológica se ha convertido en la principal herramienta para resolver esta situación, partiendo de la simplificación de la realidad del sistema.

Esta a su vez puede ser de tipo agregada, distribuida y pseudo-distribuida, hablando en términos de discretización o escala espacial; y de tipo continua (planificación de recursos hídricos) o de evento (estudio de crecidas) en cuanto a escala temporal.

Los modelos de tipo agregado no consideran de manera adecuada la marcada variabilidad espacial de las características de interés hidrológico (edafología, litología, etc.) que describen el sistema; por esta razón y sumado a los avances en la calidad de la información disponible, cada vez se tiende más a la utilización de los modelos hidrológicos distribuidos en el espacio, de modo que se pueda reproducir de una manera mucho más acertada esta variabilidad espacial a escala de celda, ladera y cuenca.

Es en este punto, donde el conocimiento y manejo de los sistemas de información geográfica, en adelante SIG, toma especial interés gracias a que es posible conocer espacialmente mediante asignación de atributos o descripciones sectorizadas y/o puntuales geolocalizadas, características que permitan describir el territorio con propiedades o características propias, como lo son el modelo de elevación digital del terreno, el mapa de pendientes, el mapa de suelos, el mapa de permeabilidades a de formaciones hidrogeológicas, el mapa de las conductividades hidráulicas de los estratos de suelo, la vegetación, entre otros.

Es de destacar que la aplicación de un modelo hidrológico distribuido de por sí involucra una mayor complejidad si se le compara con uno agregado o pseudo-distribuido, principalmente por la conceptualización y la estimación de los parámetros que describen la realidad de la cuenca.

Anteriormente se ha hablado de conocer y entender el ciclo hidrológico dada su importancia en la vida y conservación de los ecosistemas; ahora pues, se hablará de como este podrá verse afectado frente a cambios drásticos en las principales variables hidrometeorológicas como lo son las precipitaciones y las temperaturas por periodos prolongados de tiempo.

Este fenómeno en concreto está asociado al Cambio Climático, que no es más que el cambio en el clima que se atribuye de manera directa o indirecta al desarrollo de actividades antrópicas, que de alguna manera afectan la composición de la atmósfera mundial y que se termina añadiendo a la variabilidad misma o natural del clima en periodos de tiempo comparables.

Lo anterior se traduce en que el aumento en las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) de forma antrópica y natural acelerará de manera significativa el calentamiento global, y con ello el clima de la tierra cambiará; lo que terminará acarreado implicaciones a los sistemas y actividades sensibles a los cambios de clima (recursos naturales, agricultura, silvicultura, ciclo hidrológico, etc.).

Dicho lo anterior, el ciclo hidrológico no es ajeno a sufrir cambios y alteraciones en la medida en que sus componentes lo hacen, con lo cual se hace interesante tratar de vislumbrar y predecir su comportamiento a medida que el clima cambia.

En el presente estudio entonces, se llevará a cabo la implementación de un modelo hidrológico distribuido espacialmente y el análisis del impacto del cambio climático, que será enfocado en una cuenca hidrográfica de un río de alta montaña llamado San Nicolau, ubicada en el Parque Nacional de Aigüestortes y Lago de San Mauricio en los pirineos catalanes y que incluye, además, procesos de fusión de nieve.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

El objetivo general de este trabajo de fin de máster es la implementación de un modelo hidrológico de tipo distribuido en la cuenca del río San Nicolau en el Parque Nacional de Aigüestortes y Lago de San Mauricio (España). Para ello se parte de un modelo subdiario ya realizado en la pequeña subcuenca de Contraix. Una vez implementado con discretización diaria, se evaluarán los efectos del Cambio Climático en términos de balance hidrológico en la cuenca de estudio en las condiciones del escenario de emisión RCP 8.5 para los 30 años finales de siglo (2071-2100).

1.2.2 Específicos

Los objetivos específicos de esta tesina son:

- Actualizar el modelo hidrológico de la cuenca del Lago Contraix implementado en TETIS versión 8 a la versión 9.0.1.
- Resolver la contradicción existente entre las aportaciones del interflujo y flujo base del modelo de Contraix en versión antigua con respecto a un nuevo estudio de trazabilidad de isótopos radiactivos.
- Recopilar y analizar la información hidrometeorológica nueva disponible para la cuenca de San Nicolau, que servirá como input para la modelación.
- Extrapolar los mapas de parámetros desde la cuenca del Lago Contraix a la cuenca del río San Nicolau, a partir de información cartográfica actualizada y la ayuda de sistemas de información geográfica.
- Validación del modelo de Contraix espacialmente y temporalmente en el punto AT07 correspondiente al punto de aforo en la cuenca del río San Nicolau.
- Estimar las descargas de caudal en el punto de aforo AT07 y el balance resultante.
- Implementación de los escenarios de Cambio Climático en la cuenca de San Nicolau en el punto de aforo AT07 con ventana temporal para finales de siglo (2071-2100).

1.3 Metodología

La metodología a seguir en el desarrollo de este estudio consistirá en los siguientes pasos:

1. Actualizar el modelo hidrológico previamente implementado en la cuenca del Lago Contraix en el Parque Nacional de Aigüestortes a la versión 9.0.1 del software de modelación hidrológica TETIS.
2. Para lo anterior, se utilizará la misma información disponible (hidrometeorológica, cartográfica, edafológica) para la estimación de mapas de parámetros, así como el fichero con los factores estimados en la calibración y validación del modelo, y posterior a ello se procederá a evaluar la contradicción existente entre el interflujo y flujo base entre los resultados estimados del proyecto ACOPLA y en el de ISOTOPOS.
3. Luego, se procederá con la extrapolación de los mapas de parámetros desde la cuenca del lago Contraix a la cuenca del río San Nicolau a partir de información secundaria.
4. En vista de que la cuenca de San Nicolau tiene 68 cuerpos de agua identificados como Lagos, se realizará una simplificación de estos de acuerdo a la información disponible, al área, entre otras; con el fin de realizar una modelación hidrológica lo más sencilla posible que igual deberá ser robusta.
5. Paso seguido, se procederá a evaluar los resultados del modelo de Contraix en el punto de aforo AT07 de la cuenca del río San Nicolau con el fin de validarlo espacialmente; en caso contrario, se procederá a realizar una nueva calibración en este mismo punto de aforo, pero ya en escala diaria, debido a que el objetivo final de este trabajo es modelar las condiciones de la cuenca para escenarios de cambio climático, y esta información, que se encuentra disponible en AEMET se presenta día a día.
6. Luego de validar el modelo hidrológico de la cuenca de San Nicolau, se procederá a la selección de los modelos con los que se modelarán los efectos del cambio climático. Para ello se empleará la información para el escenario de emisión RCP 8.5. Se realizará un primer análisis de esta información y se procederá a realizar la corrección del sesgo, finalmente se seleccionarán una serie de modelos tomando como criterio principal la estacionalidad y los días modelados sin lluvia en comparación con las series de Spain02 V0.5.
7. Por último, se correrá el modelo hidrológico con las proyecciones de cambio climático para horizonte temporal a finales de siglo, más concretamente desde el año 2071 hasta el año 2100; con el propósito de evaluar los efectos que se producirán en las series de precipitación, temperatura, evapotranspiración, caudal y almacenamiento de nieve en la cuenca de estudio.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Modelos Hidrológicos

La evaluación de la respuesta hidrológica de una cuenca hidrográfica (sistema), se realiza a través de la implementación de un modelo hidrológico, que no es más que la forma en cómo se intenta representar la realidad del sistema (Morelli Tucci, 1998), a través de conocer los procesos que se presentan en él en cuanto a la producción y propagación de la escorrentía (Francés, Vélez, & Vélez, 2007; Weber, Dasso, & Jorquera, 2010). De acuerdo con Chow, Maidment, & Mays (1994), un sistema es un conjunto de partes interconectadas entre sí que forman un todo; por lo que desde ese punto, el ciclo hidrológico es ese todo que se compone de agua superficial, subterránea, agua atmosférica, entre otros (Weber et al., 2010).

Los modelos hidrológicos pueden presentar en forma agregada o en forma distribuida. Del modelo agregado conceptual conocido como el Stanford Watershed Model presentado por Crawford & Linsley (1966), se plantaron las bases para el desarrollo de gran cantidad de modelos tanto lineales con parámetros invariantes, hasta no lineales con parámetros distribuidos, desarrollados para responder a diferentes propósitos (Ramírez Solano, 2012).

En general, se pueden distinguir cuatro tipos de modelos: determinísticos, probabilísticos, conceptuales y paramétricos (Ponce, 1994). Los determinísticos se formulan mediante ecuaciones diferenciales siguiendo las leyes de la física y procesos químicos. Los probabilísticos se formulan siguiendo las leyes del azar, pudiendo ser estocásticos o estadísticos. Los conceptuales que son representaciones de los procesos físicos de forma simplificada a partir de ecuaciones matemáticas y en el uso de parámetros conceptuales. Los paramétricos o de caja negra, descritos mediante ecuaciones algebraicas que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos o cualquier otra forma empírica (Ponce, 1994; Weber et al., 2010).

Debido a que los fenómenos hidrológicos son dados a cambiar espacialmente en las tres componentes direccionales, se hace difícil tener en cuenta esa variación en la representación mediante modelos, por lo que los modelos conceptuales y determinísticos se pueden clasificar en agregados y distribuidos. Los primeros, representan el sistema promediando en el espacio de interés como un punto fijo; y los segundos, que representan el sistema considerando que todos los procesos hidrológicos ocurren a lo largo y ancho del espacio, es decir, en todas las direcciones, definiendo las variables del modelo como funciones de las dimensiones espaciales (Chow et al., 1994; Weber et al., 2010).

Finalmente, según Weber et al. (2010), los modelos hidrológicos de acuerdo a la escala temporal, se pueden clasificar en: modelos de eventos aislados, de procesos continuos, de simulación mixta. Los primeros diseñados para representar el corto plazo, como lo son eventos de crecidas súbitas. Los segundos pensados más para la planificación hidrológica, ya que se representan para el largo plazo, incluyendo flujos superficiales, subsuperficiales y del acuífero. Por último, se encuentran los que intentan representar las dos escalas.

2.1.1 Modelo Hidrológico Distribuido: TETIS

El modelo hidrológico de tipo distribuido TETIS, es un modelo de lluvia – escorrentía que ha sido desarrollado por el Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIHMA) perteneciente a la Universitat

Politécnica de València (UPV) a través del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) que realiza una discretización del espacio en celdas regulares que contienen información de parámetros físicamente basados y que describen a satisfacción el entorno de modelación. Ha sido desarrollado con el propósito de simular el ciclo hidrológico en cuencas naturales, obteniendo de la mejor manera posible una respuesta ocasionada por la precipitación en forma de lluvia o de nieve (GIHMA, 2018).

La modelación hidrológica distribuida dispone de una serie de ventajas sobre los modelos hidrológicos clásicos (agregados y semidistribuidos), comenzando por una mejor representación de la variabilidad espacial de los fenómenos pertenecientes al ciclo hidrológico; luego por brindar un mejor entendimiento de los procesos a nivel de cuenca complementado con una mejor calidad de la información disponible en parte gracias al desarrollo y avance de la tecnología con los sistemas de información geográfica, cartografía digital, etc. (Vélez, Puricelli, López Unzu, & Francés, 2009)

Tetis se compone por varios módulos que operan de forma independiente y que pueden simular diversos procesos a nivel de cuenca, como lo es el módulo de sedimentos, de nitrógeno, de vegetación dinámica y cultivos (Salazar Galán, 2013). Cabe destacar que para la simulación de estos sub – modelos es indispensable contar con suficiente información, con el fin de representarlos a cabalidad.

En cuanto a procesos como tal que se pueden representar en TETIS están: fusión de nieve (homogénea o distribuida en el espacio), laminación de embalses (válido también para modelación de lagos), y fenómenos kársticos (Escamilla, Puertes, & Francés, 2017).

La lluvia y la escorrentía son los procesos físicos más importantes en la estimación y predicción de crecidas, por lo cual en este análisis el foco se encuentra asociado a los fenómenos de producción y traslación de la escorrentía; mientras que para la evaluación y planificación de recursos hídricos los fenómenos a analizar son los de evapotranspiración y de flujo subterráneo (Francés et al., 2007).

2.1.1.1 *Procesos Físicos*

Como en todos los modelos, la conceptualización de los procesos físicos tiene que ser clara y concisa, con el fin de entenderlos correctamente. En TETIS, que como se había dicho es un modelo de tipo hidrológico distribuido espacialmente, y de acuerdo con Singh (1989) se consideran los siguientes procesos:

- **Intercepción:** Es la fracción de la precipitación que es interceptada a nivel superficial ya sea por tejados de edificaciones o la cubierta vegetal. Lo normal es que parte de esta nunca alcanzará el suelo pues quedará retenida humectando estos “objetos” y posteriormente se evaporará. En eventos de crecida se puede despreciar esta fracción, pero por lo general, cuando se desea conservar el balance hídrico es mejor tenerlo en cuenta, porque puede ser un porcentaje importante.
- **Detención:** Conocido también como almacenamiento en depresión, que depende de la topografía del terreno y de los usos del suelo; el agua que se retiene no puede salir como escorrentía directa, por lo que o se evapora o se infiltra en el suelo. Este almacenamiento puede modificar la respuesta de la cuenca, puesto que puede ser significativo.
- **Infiltración:** Proceso por el cual el agua entra al suelo a través de la superficie de este. Representa el fenómeno más importante en los eventos de crecida, debido a que el agua no infiltrada es la que termina como escorrentía directa, la cual supone la fracción más alta de la escorrentía superficial.
- **Evapotranspiración:** Es el proceso mediante el cual el agua pasa de un estado sólido o líquido a una gaseosa aprovechándose de la transferencia de energía calórica. En la planificación de recursos hídricos es fundamental detallar bien este proceso, pero para el caso de analizar eventos de crecida puede ser despreciado.

- **Fusión de Nieve:** Es el proceso por el cual se obtiene el agua líquida que se produce por el derretimiento de la nieve acumulada en el manto terrestre.
- **Percolación:** Movimiento del agua que se ha infiltrado a través del perfil del suelo.
- **Recarga del Acuífero:** Es el proceso mediante el cual el agua ingresa al almacenamiento del acuífero subterráneo.
- **Escoorrentía Directa:** Fracción de lluvia que no es interceptada, detenida, evaporada o percolada y que fluye sobre las laderas.
- **Interflujo o Flujo Subsuperficial:** Es el agua que ha sido previamente infiltrada y no alcanza el almacenamiento subterráneo, es por ello que, debe ser tenida en cuenta en la escoorrentía superficial.
- **Flujo Base:** Es la porción de agua derivada del almacenamiento subterráneo o de otras aguas que se han retrasado en el tiempo y finalmente alcanzan el cauce.

2.1.1.2 Producción y Propagación de la Escoorrentía

La representación de la escoorrentía en TETIS se hace a través de esquemas conceptuales simples a escala de celda (**Figura 1**) y al intervalo de tiempo en modelación de eventos entre 10 minutos y 1 hora, o bien, en la planificación de recursos hídricos en escala temporal diaria (Francés et al., 2007; Vélez et al., 2009).

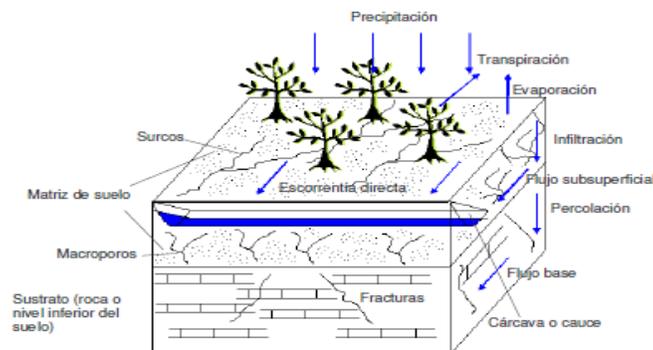


Figura 1. Esquema Simplificado de una celda. Fuente: Montoya Monsalve (2008)

Dicho lo anterior, TETIS para la producción de escoorrentía, se basa en la realización de balances hídricos a nivel de celda, y como se verá en la **Figura 2** el agua se distribuye en seis tanques conceptuales de almacenamiento que están conectados entre sí y que representan los procesos físicos que tienen lugar en la cuenca, más un séptimo que representa el cauce y el proceso de traslación de la escoorrentía.

Allí se observa, además que el flujo que viene “aguas arriba” en cada nodo está condicionado por la capacidad del proceso “aguas abajo” (color rojo) en el caso de la producción; el restante del balance sigue la ruta del flujo (color verde). En los casos de propagación del flujo los procesos involucrados se ilustran en color azul; adicionalmente, se mencionan los factores correctores de los parámetros de la cuenca, los cuales se explicarán más adelante (Molina, 2018).

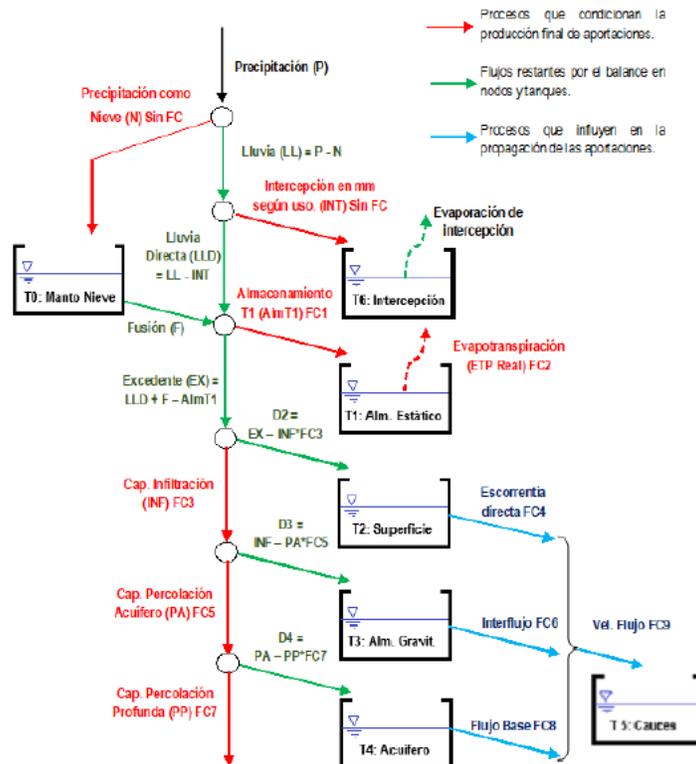


Figura 2. Esquema Conceptual de tanques a nivel de celda en TETIS modificado. Fuente: Molina Celeita (2018).

La conceptualización del modelo TETIS es una malla en 3D que está interconectada, tal y como se muestra en la **Figura 3**. Los 3 tanques inferiores, drenan al correspondiente tanque aguas abajo, siguiendo las direcciones de flujo obtenidas a partir del modelo de elevación digital del terreno (MED), hasta alcanzar la red de drenaje.

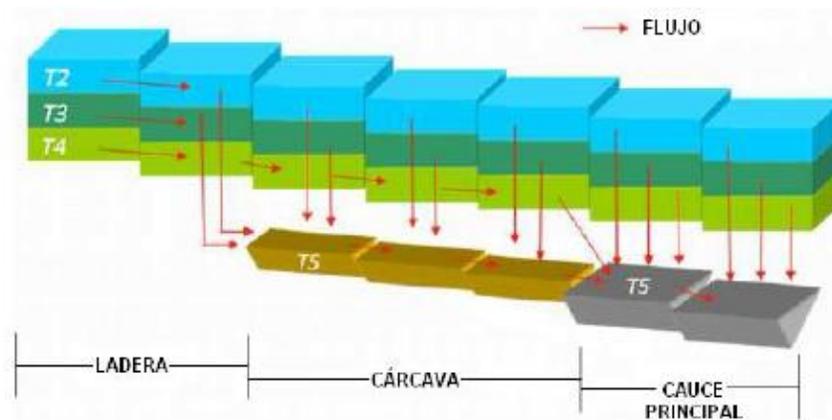


Figura 3. Movimiento horizontal propuesto por el modelo. Fuente: (GIHMA, 2018).

En la **Figura 4**, se muestra como el sistema presenta 3 elementos bien diferenciados que se encuentran definidos por sus áreas umbrales para que los diferentes componentes de la escorrentía salgan a la superficie, presentado.



Figura 4. Elementos del sistema, áreas umbrales y componentes de la escorrentía en TETIS. Fuente: Montoya (2008).

Luego de realizar el balance hidrológico en cada celda y de haber cuantificado los flujos o salidas de escorrentía directa, interflujo y flujo base, que a su vez hacen parte de la escorrentía total, el siguiente paso consiste en la propagación o traslación del agua a través de cárcavas y cauces que conforman la red de drenaje.

Para la traslación de la escorrentía TETIS presenta una formulación que incluye elementos de la geometría hidráulica, permitiendo realizar un análisis hidráulico razonable de las transferencias entre celdas sin requerir grandes volúmenes de información ni una simplificación de cuenca.

La traslación a lo largo de la cuenca se realiza considerando que el agua no abstraída circula sobre las laderas hasta alcanzar algún canal perteneciente a la red de drenaje natural de la cuenca, siguiendo por la red de drenaje en sí.

Para ello TETIS emplea el método de la "Onda Cinemática", una simplificación de las ecuaciones de Saint Venant, al desprestigiar los efectos inerciales y de presión en la ecuación de conservación de la energía. Además, las características hidráulicas de los cauces se obtienen con base a los parámetros propios de la cuenca extraídos de la información geomorfológica. El modelo emplea nueve parámetros geomorfológicos (coeficientes y exponentes) para las distintas relaciones potenciales geomorfológicas existentes y que se pueden encontrar más detalladamente en (GIHMA, 2018).

2.1.1.3 Modelación de la Fusión de Nieve

La modelación de la fusión de nieve debe tener en cuenta obligatoriamente dos componentes básicas, la acumulación y el derretimiento (fusión). Actualmente TETIS, tiene integrados dos sub modelos de fusión, el primero de ellos emplea el método índice de temperatura o grado-día que, entre otras cosas, se caracteriza por tener una representación en el espacio de tipo homogénea por utilizar factores de fusión invariantes; y el segundo de ellos es el modelo de fusión de nieve distribuido en el espacio.

- Modelo de fusión: Método Índice de Temperatura

Los inputs requeridos para este caso son la precipitación y la temperatura ya interpolados espacialmente mediante el inverso de la distancia al cuadrado (IDW). Para diferenciar entre la componente líquida y sólida de la precipitación, el modelo emplea una temperatura límite o umbral que permite realizar esta diferenciación; para efectos de TETIS esta es conocida como temperatura base, que suele oscilar de -2.0°C a $+4.0^{\circ}\text{C}$.

Para entender mejor, cuando se presenta el caso de que la temperatura del aire es menor a la temperatura umbral durante un evento de precipitación, está será en forma de nieve (precipitación sólida) y por tanto será almacenada en el tanque de nieve; en el caso contrario pasará a hacer parte de la producción de escorrentía en forma de precipitación líquida del modelo hidrológico (Orozco, 2013).

Este método es ampliamente utilizado en el campo de la hidrología debido a su gran adaptabilidad a los modelos de lluvia escorrentía ya que requiere de muy poca información. De forma general, el modelo emplea la siguiente ecuación:

$$M = M_{f1,2} * (T_a + T_b) \rightarrow T_a \geq T_b \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$M = 0 \rightarrow T_a \leq T_b \quad \text{Ecuación (2)}$$

En donde,

M = tasa de fusión de nieve [mm/día]

M_{f1} = coeficiente de fusión sin lluvia [mm/°Cdía]

M_{f2} = coeficiente de fusión con lluvia [mm/°Cdía]

T_a = temperatura media del aire en °C

T_b = temperatura base para la fusión en °C

- *Modelo de fusión de nieve distribuido en el espacio*

Este método de modelación de la fusión de nieve, al igual que la homogénea toma en cuenta un coeficiente de fusión diferenciado entre uno con lluvia y otro sin lluvia. La variabilidad espacial se introduce a partir de la variación de los factores de fusión por medio de la radiación corta en la distribución de los flujos de energía, empleando la radiación global de onda corta, de modo que se considera tanto la radiación directa como la radiación difusa de onda corta.

La siguiente ecuación representa de forma global o general la modelación para la cuantificación de la fusión de nieve:

$$M_{(i)} = [M_{f1,2} * I_{R(i)}] * [(T_{a(i)} + T_b) \rightarrow T_{a(i)} \geq T_b \quad \text{Ecuación (3)}$$

$$M_{(i)} = 0 \rightarrow T_{a(i)} \leq T_b \quad \text{Ecuación (4)}$$

En donde,

M = tasa de fusión de nieve [mm/día]

M_{f1} = coeficiente de fusión sin lluvia [mm/°Cdía] sin distribuir.

M_{f2} = coeficiente de fusión con lluvia [mm/°Cdía] sin distribuir.

I_R = valor del índice de radiación global de onda corta [adim.] para cada celda.

T_a = temperatura media del aire en °C

T_b = temperatura base para la fusión en °C

El índice de radiación (I_R) considera la pendiente, la orientación, la sombra del relieve y el ángulo cenital; y es posible calcularlo a partir del uso de sistemas de información geográfica calculando la insolación en una ubicación geográfica definida mediante un algoritmo que utiliza como partida el modelo de elevación digital del terreno que considera la topografía de la zona deseada (GIHMA, 2018).

Información más detallada para la modelación de la fusión, puede consultarse en el documento de descripción del modelo TETIS v.9.0.1 disponible en <http://lluvia.dihma.upv.es/ES/software/currentreleases.html>.

2.1.1.4 Modelación de Lagos

Los lagos en una cuenca funcionan como punto de control del hidrograma circulante por el cauce, de modo que pueden modificar completamente el hidrograma del río tanto para caudales pequeños como para eventos de crecidas, debido al efecto de laminación que provocan, que dependerá en todo caso del tamaño o volumen de la crecida.

TETIS modela los lagos como embalses de tipo lineal, de modo que es importante conocer para efectos de simulación las curvas de volumen y de capacidad de desagüe en función de la cota en el embalse. Esta simulación se realiza de forma diferente dependiendo de la cantidad y tipo de información disponible, respecto de los niveles, caudales de entrada y de salida, así como de los volúmenes de almacenamiento en función de la cota. En el caso en que se cuente con esta información, la simulación se realiza a partir de un balance estricto.

En caso contrario, es decir, que no se tenga información disponible suficiente, TETIS emplea el método del *Puls Modificado* para la laminación del embalse, tal y como se observa en la **Figura 5**, dejando en claro que se requiere obligatoriamente al menos el nivel inicial del embalse en el instante de tiempo cero.

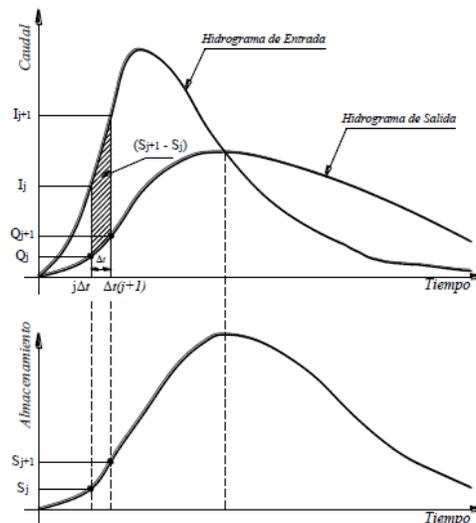


Figura 5. Método de Laminación de embalses empleado por el método de Puls Modificado. Fuente: Chow et al. (1994)

El *Puls Modificado* para el efecto de laminación se fundamenta en la expresión que se presenta a continuación.

$$\frac{2S_{j+1}}{\Delta t} + Q_{j+1} = I_j + I_{j+1} + \frac{2S_j}{\Delta t} - Q_j \quad \text{Ecuación (5)}$$

En donde,

Δt = intervalo de tiempo

S_j = volumen en el tiempo j

S_{j+1} = volumen en el tiempo $j+1$

Q_j = caudal de salida del lago en el tiempo j

Q_{j+1} = caudal de salida del lago en el tiempo $j+1$

2.1.1.5 Parámetros Espaciales

Con el fin de representar espacialmente la cuenca de estudio y además de representar las características geomorfológicas, se debe contar con la información que se detalla a continuación, obtenida a partir del modelo de elevación digital del terreno MED con la ayuda de las herramientas disponibles en el software ArcGis:

- Mapa de pendientes.
- Mapa de velocidad de flujo en ladera.
- Mapa de direcciones de flujo.
- Mapa de celdas drenantes acumuladas.

Es importante mencionar que estas capas deben contar con la misma resolución espacial que el modelo de elevación digital del terreno.

Debido a que TETIS es un modelo hidrológico distribuido se debe garantizar que los parámetros del sistema también lo estén, es decir, los parámetros deben repartirse de forma tal que se represente coherentemente bien la variabilidad espacial real de la cuenca y de acuerdo al tipo de geología, litología, usos de suelo, cubierta vegetal, entre otros. Para ello y a partir de esa información, se construyen los denominados mapas de parámetros del modelo, que en todo caso están sujetos al ajuste mediante factores correctores, que proporcionan el valor de lo que se considera parámetros efectivos del modelo (**Figura 6**), es decir, para los que este reproduce mejor la realidad de la cuenca (Montoya Monsalve, 2008).

Los mapas de parámetros que tiene en cuenta TETIS se describen a continuación:

- Almacenamiento estático Hu : Esta capa se obtiene a partir de la capacidad de almacenamiento capilar y de las abstracciones iniciales. Para obtener esta capa se necesitan el mapa de pendientes, el de usos del suelo, texturas del suelo y profundidades del suelo.
- Permeabilidad superficial o conductividad hidráulica saturada del suelo ks : Se utiliza para estimar la infiltración y el flujo subsuperficial. Esta capa se obtiene a partir de la textura del suelo, contenido de materia orgánica y de las funciones de pedo-transferencia.
- Capacidad de percolación o conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso kp : Se utiliza para estimar las pérdidas subterráneas y el flujo base. Esta capa se obtiene a partir del mapa de permeabilidad superficial y de la litología.
- Tipo de cubierta vegetal y su factor de vegetación a lo largo del año λv : Se utiliza para estimar el comportamiento de la evapotranspiración a lo largo del año. Esta capa se obtiene a partir del mapa

de usos de suelo y del factor de vegetación que depende del tipo y desarrollo del cultivo, así como del clima.

Las capas nombradas a continuaciones se obtienen a partir de una aproximación de las capas anteriores

- Conductividad hidráulica horizontal saturada del suelo $k_{ss} = k_s$
- Conductividad hidráulica horizontal saturada del estrato rocoso $k_{sa} = k_p$
- Capacidad de percolación profunda o conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso $k_{ps} = 0.1 \cdot k_p$

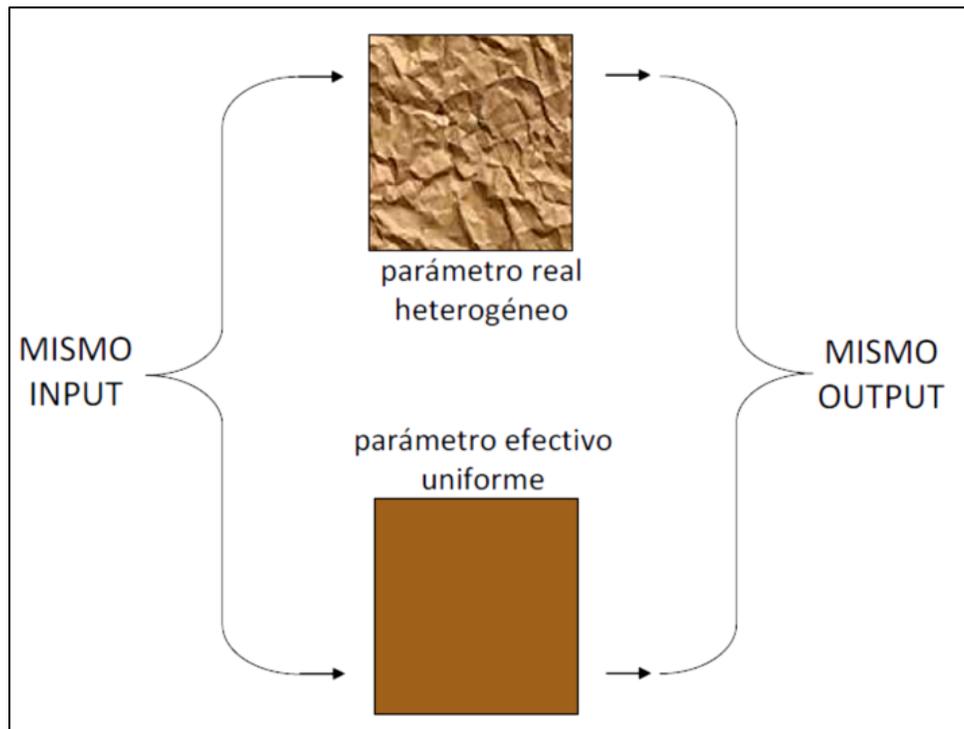


Figura 6. Conceptualización parámetro efectivo uniforme implementado en TETIS.

2.1.1.6 Factores Correctores

Los factores correctores en el modelo TETIS cumplen exclusivamente la función de ajustar los parámetros espaciales que representan el sistema, corrigiéndolos de forma global; debido a errores en la estimación inicial de los parámetros, del propio modelo, en las series hidrometeorológicas que son input del modelo y los efectos de escala espacio-temporal.

La producción de la escorrentía se ve sometida a los siguientes factores correctores:

- $FC1 = \text{Almacenamiento Estático}$
- $FC2 = \text{Evapotranspiración}$
- $FC3 = \text{Infiltración Gravitacional}$
- $FC4 = \text{Escorrentía Directa}$
- $FC5 = \text{Percolación}$

- $FC6 = \text{Interflujo}$
- $FC7 = \text{Flujo Subterráneo no conectado}$
- $FC8 = \text{Flujo Base}$

La propagación de la escorrentía a través del método de OCG, se ve modificada por el siguiente factor corrector:

- $FC9 = \text{Velocidad de onda en la red fluvial}$

Adicionalmente, se incluyen otra serie de factores correctores que en principio son entendidos como opcionales, y que en todo caso dependerán del caso de estudio, como es el caso cuando se desea modelar la fusión de nieve en una cuenca. Estos son:

- $\beta = \text{factor de interpolación de la lluvia con la cota}$
- $M_{f1} = \text{coeficiente de fusión sin lluvia [mm/°C día] sin distribuir.}$
- $M_{f2} = \text{coeficiente de fusión con lluvia [mm/°C día] sin distribuir.}$
- $T_b = \text{temperatura base para la fusión de nieve.}$

2.1.1.7 Calibración

Con la calibración de los modelos en general, lo que se busca es encontrar los mejores parámetros que representen el sistema objeto de estudio; en donde los valores óptimos de estos serán los que minimicen los errores residuales. Según Beven (2012) se requieren registros representados a través de las series temporales, que no en todos los casos están disponibles. Es así como. Unos buenos resultados en calibración dependerán de la información de entrada, de la estructura del modelo y del proceso de calibración (Escamilla et al., 2017).

En TETIS, los elementos que pueden ser calibrados son: los factores correctores de producción y traslación de flujo, los estados iniciales de los almacenamientos, los coeficientes de correlación de la altura, y los parámetros agragados del modelo de fusión.

La calibración en TETIS puede ser manual o automática, la primera de ellas muy a juicio del experto y la segunda a través de un método de optimización conocido como el "Shuffled Complex Evolution – University of Arizona", que por sus siglas en inglés se conoce como SCE-UA. Este algoritmo pertenece a la familia de algoritmos genéticos y una explicación más detallada de este método de optimización puede encontrarse en Duan & Gupta, (1992).

Los principales resultados obtenidos por el modelo hidrológico TETIS son los caudales en el punto de aforo, los cuales pueden ser comparados con la información de caudales aforados; por tanto, su eficiencia puede evaluarse de forma cualitativa y cuantitativamente, la primera de ellas a través de inspección gráfica analizando que tanto se asemeja el hidrograma de simulaciones respecto de las observaciones, de modo que se pueda identificar qué tanto se parecen. El segundo a través de la utilización de estadísticos como lo es el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe que es de gran utilidad en la evaluación de modelos hidrológicos lluvia-escorrentía, el error en volumen, el error cuadrático medio, etc.

En las siguientes 3 ecuaciones se muestra cómo se pueden obtener esos indicadores o índices de eficiencia:

- Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE): respecto a este indicador, se tiene que decir que puede tomar valores desde $-\infty$ hasta 1. Un valor igual a 1 supone que el modelo es perfecto; si es 0 quiere decir que el modelo puede ser representado con un modelo de una sola variable, y si toma

valores negativos, quiere decir que el modelo se comporta peor que si se trabajara con una sola variable (Beven, 2012).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{med})^2} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde,

Qobs = caudal observado

Qsim = caudal simulado

Qmed = caudal medio

- Error en Volumen:

$$\%errVol = \frac{V_{obs} - V_{sim}}{V_{obs}} \times 100\% \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde,

Vobs = volumen observado

Vsim = volumen simulado

- Error Cuadrático Medio:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{n}} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde,

Qobs = caudal observado

Qsim = caudal simulado

n = número de observaciones

2.1.1.8 Validación

La validación de los resultados del modelo sirve para demostrar qué tan bueno es el modelo y qué tan bien refleja la realidad del sistema. Según Klemes (1986), un principio básico en el proceso de validación es que el modelo debe ser validado para el mismo tipo de aplicación para el que fue desarrollado.

La validación de un modelo puede ser **validación temporal**, es decir, se emplea una ventana de tiempo diferente al utilizado en calibración y en el mismo punto de la cuenca; **validación espacial**, que básicamente es evaluar el modelo en un punto de localización distinto al que se usó en validación, pero conservando el mismo periodo temporal de calibración. Por último, se encuentra la **validación espacio-temporal**, en otro punto de localización y en un periodo de tiempo distinto al de calibración (GIHMA, 2018).

Finalmente, con el propósito de evaluar el rendimiento del modelo los mismos estadísticos utilizados en calibración deben ser usados en la validación y darse por válidos de acuerdo a los criterios presentados anteriormente.

2.2 Cambio Climático

Según el Panel Intergubernamental del cambio climático (IPCC en inglés) en su quinto informe (2014) el cambio climático es resultado de un desequilibrio en el balance energético de la tierra que permanece y se prolonga por largos periodos de tiempo y que es causado tanto por condiciones naturales como antropogénicas (Losada Rodríguez & Picatoste, 2013).

Los cambios que se han observado en el clima de la tierra desde 1950 no tienen precedente si se comparan con otros periodos históricos como lo mediados del siglo XIX o incluso si se estudia el paleo clima de los últimos milenios (IPCC, 2014b).

Dicho lo anterior los eventos extremos se irán incrementando progresivamente, debido a que las emisiones de gases efecto invernadero (dióxido de carbono: CO₂, metano: CH₄, óxido nitroso: N₂O, entre otros) actuales conocidos como GEI's provocarán un aumento en el calentamiento global que se reflejará en el clima (IPCC, 2007)

Debido a que en los últimos tiempos la atmósfera y los océanos se han calentado el nivel del mar ha subido, la extensión de las masas de hielo y nieve se han disminuido, las concentraciones de GEI's van en aumento (IPCC, 2014b), tal y como se puede ver en la **Figura 7** para la evolución de las concentraciones de CO₂, CH₄, N₂O desde el año 0 hasta el 2005, viéndose que a partir de mediados del siglo XIX se rompió la tendencia y empezó un crecimiento continuo y desmesurado.

En general se espera que las temperaturas aumenten progresivamente para finales de siglo (2100), las precipitaciones por su parte podrán aumentar o disminuir de acuerdo a la región geográfica del planeta y el escenario que se evalúe (Losada Rodríguez, Izaguirre Lasa, & Díaz Simal, 2014).

La cuantificación de los cambios en los flujos de energía que se originan tanto natural como antrópicamente se hace a través del forzamiento radiativo (FR). Este constituye una forma de medir cómo se comporta el equilibrio del sistema atmosférico de la Tierra cuando los factores que alteran el clima cambian.

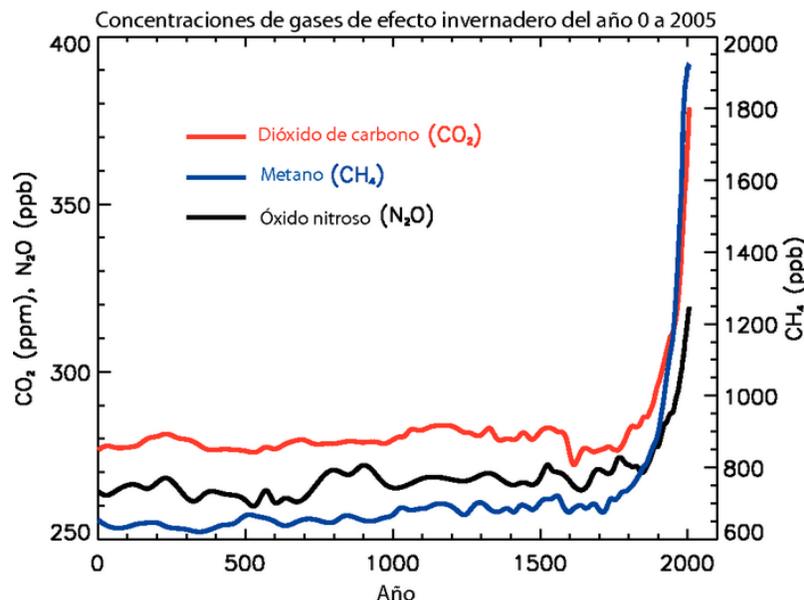


Figura 7. Concentraciones de Principales GEI's desde el año 0 al 2005. Fuente: IPCC (2007).

Si los valores en el FR son positivos significa que hay calentamiento y por el contrario si son negativos, hay enfriamiento (IPCC, 2007). En la **Figura 8** se observan las principales componentes que permiten evaluar el equilibrio del sistema a través del forzamiento radiativo; en este caso se presenta el balance para el periodo comprendido entre 1750 y 2005.

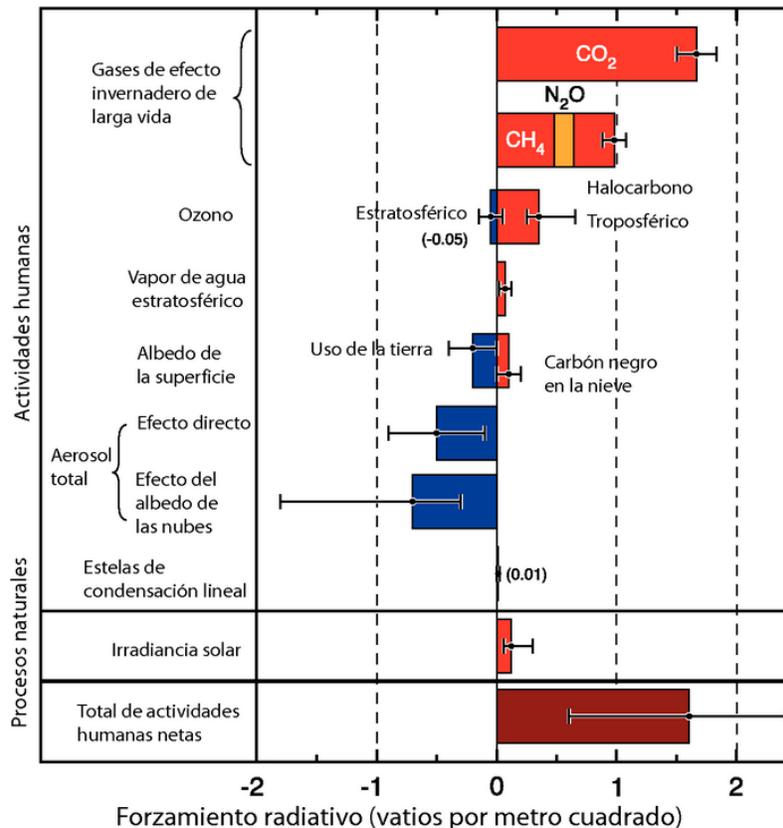


Figura 8. Forzamiento radiativo del clima desde el año 1750 al 2005: Principales Componentes. Fuente: IPCC (2007)

Como se observa en la figura anterior, la componente que representa las actividades humanas contribuye notablemente en el desequilibrio del balance energético, haciendo que se tomen valores más altos y positivos del FR, conduciendo al calentamiento del clima. Información más detallada con respecto al forzamiento radiativo puede encontrarse en: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html.

Para evaluar el impacto del cambio climático debido a las actividades humanas se usan escenarios de emisiones. Los cambios en el clima descritos en los escenarios climáticos son los principales impulsores de los cambios en los sistemas naturales y humanos (Moss et al., 2010).

2.2.1 Sendas Representativas de Concentración

De acuerdo con el quinto informe del IPCC (AR5), los escenarios que permiten modelar el impacto del cambio climático son las sendas representativas de concentración (RCP en inglés), que sirven para estudiar el efecto del cambio climático y la dinámica de sus componentes en el futuro (año 2100). Éstas van desde 2.6 a 8.5 W/m² de acuerdo a que tan pesimistas u optimistas sean; en la Tabla 1 se muestran en detalle.

El IPCC (2000) en su Informe Especial de Escenarios de Emisiones (pag.8) con respecto a la definición de escenario y su finalidad dice lo siguiente:

“Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación”.

Tabla 1. Nuevos Escenarios de Emisión del AR5. Fuente: Adaptado de Losada Rodríguez & Picatoste, (2013).

SENDA REPRESENTATIVA DE CONCENTRACIÓN	FR (W/m ²)	[CO ₂] en ppm	Tendencia FR
RCP2.6	2.6	421	Decreciente 2100
RCP4.5	4.5	538	Estable 2100
RCP6.0	6.0	670	Creciente
RCP8.5	8.5	936	Creciente

Los escenarios de emisión anteriormente mostrados van de más optimista (RCP2.6) a más pesimista (RCP8.5) y son modelados a partir de los llamados modelos climáticos de circulación general (MCG). Tal y como se puede ver en la **Figura 9**.

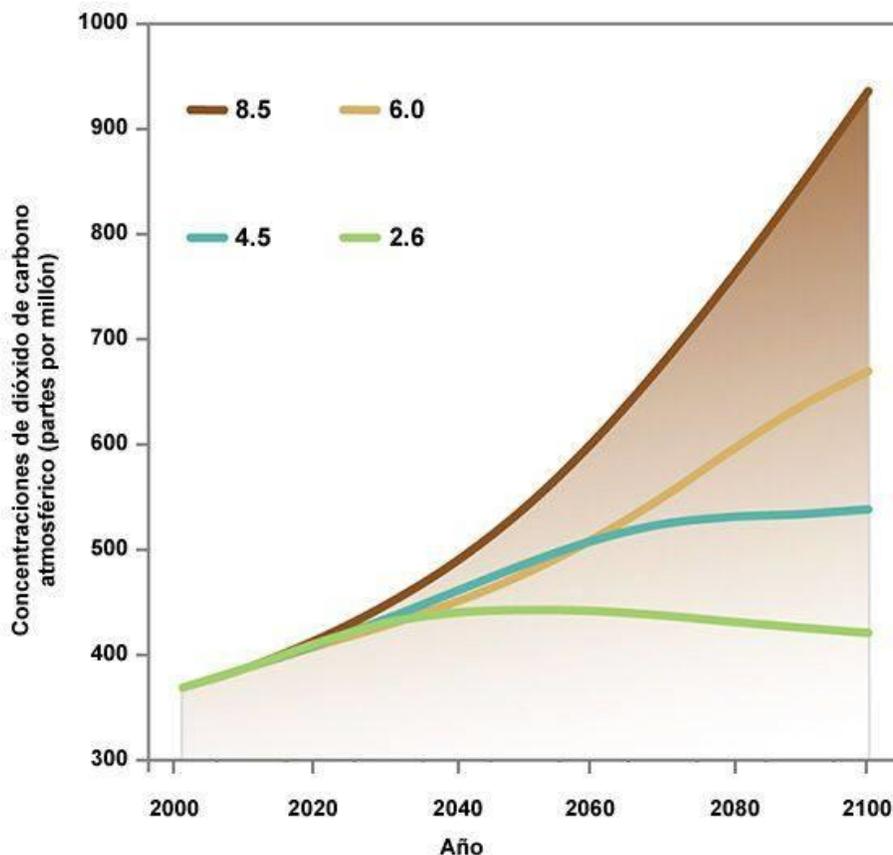


Figura 9. Escenarios de trayectorias de concentración representativas (RCP). Fuente: AEMET, (n.d.)

2.2.2 Modelos Climáticos Globales (MCG) o de Circulación General (MCCG)

Los modelos climáticos son considerados como la principal herramienta para estudiar la dinámica del clima. Estos se caracterizan por dividir a la Tierra en celdas de tamaño comprendido entre 300 o 500 km según el modelo, intentando reproducir la realidad del planeta a partir de representaciones matemáticas mediante formulaciones y ecuaciones que contemplan el funcionamiento sistema climático (Morata Gasca, 2014).

El sistema climático de la tierra se compone de 5 componentes diferentes que interactúan entre sí: la atmósfera, la hidrosfera, la criósfera, la superficie terrestre y la biosfera (Moss et al., 2010).

Estos son conocidos también como modelación de circulación general acoplados atmósfera-oceano, que permiten obtener simulaciones realistas a gran escala de diversas variables climáticas y para diferentes horizontes temporales (van Ulden & van Oldenborgh, 2006).

De acuerdo con estos modelos a escala global se esperan variaciones importantes principalmente en la precipitación y las temperaturas, sin embargo, estos cambios en el clima no se producirán de forma homogénea, sino que dependerán de la región del planeta. En general, se espera una disminución en las precipitaciones y un aumento en las temperaturas para finales de siglo. En la **Figura 10**, se muestran los porcentajes de cambio en estas dos variables para finales de siglo en comparación con el periodo temporal de 1986 a 2005.

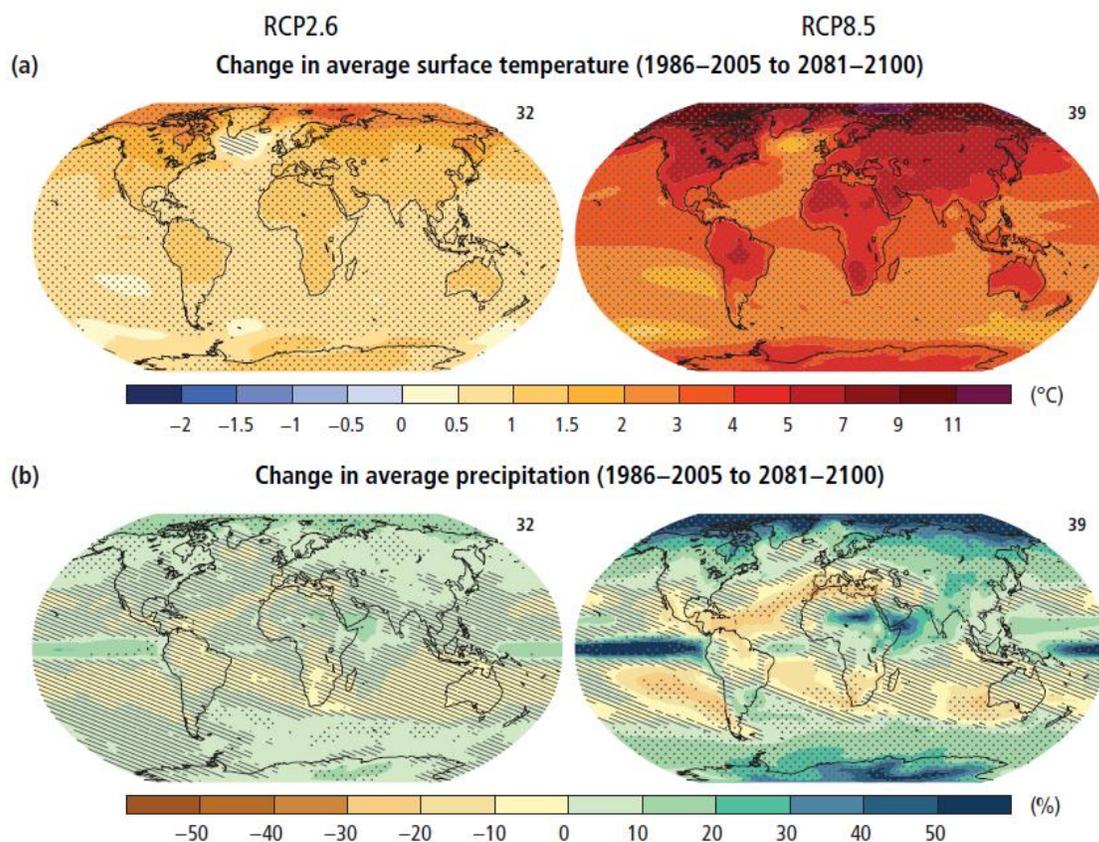


Figura 10. (a) Cambio en la temperatura media en superficie y (b) cambio en la media de precipitaciones, para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, respectivamente. Fuente: IPCC, (2014a)

Debido a que estas proyecciones del clima futuro suelen funcionar muy bien para la gran escala, más no para escalas más regionales; es necesario ajustar estos valores mediante métodos de regionalización o como es conocido este procedimiento *Downscaling*.

2.2.3 Métodos de Regionalización

Con el fin de corregir los problemas de escala asociados a los resultados de las proyecciones de cambio climático de los MCG, y poderlos utilizar a escala regional o local es necesario realizar un *Downscaling* con el fin de aumentar la resolución del píxel y mejorar los resultados esperados. Para llevar a cabo este procedimiento existen métodos estadísticos y dinámicos, en los que su aplicación dependerá de la información disponible y de las condiciones de la zona a donde se quieran llevar los resultados principalmente (Montalvo, 2017).

2.2.3.1 Regionalización Estadística: Método Análogos

El método de regionalización denominado Análogos se fundamenta en que configuraciones meteorológicas dan lugar a fenómenos meteorológicos similares (Morata, 2014). Lo que se busca es encontrar relaciones de tipo empíricas en los valores de las variables a escala global fruto de simulaciones de MCG y a escala regional con características climáticas ya conocidas.

Lo primero en este método es la selección de variables predictoras para luego ser evaluadas con formulaciones matemáticas de la medida de similitud. El éxito dependerá entonces de la selección de unas variables eficaces y del método para la evaluación de la similitud, de modo que extraiga la mayor cantidad posible de información de los campos estudiados (Morata Gasca, 2014).

2.2.3.2 Regionalización Estadística: Método SDSM

Este método de regionalización estadístico conocido como SDSM (*Statistical DownScaling Method*) se basa fundamentalmente en realizar una regresión lineal mediante relaciones empíricas entre variables predictoras de la escala regional extraídas de los modelos de circulación general y variables predictandos de la escala local como la precipitación, temperaturas extremas, entre otros (Brunet et al., 2009). Esta metodología es adecuada para zonas heterogéneas con orografía compleja (Morata, 2014).

La gran ventaja que ofrece este método de *Downscaling* es su facilidad de aplicación, sin embargo, es necesario disponer de información climática homogénea y para periodos largos de tiempo (Brunet et al., 2009). Aunque con este método de regionalización no es posible explicar toda la variabilidad climática observada, para obtener las proyecciones climáticas futuras se de aceptar la hipótesis de que el modelo paramétrico que se ajusta es válido para las condiciones futuras (Wilby, Dawson, & Barrow, 2002).

Para la obtención del modelo de regresión se consideran las características de la variable predictando, de modo que se distinguen dos modelos, condicional y no condicional. El primero supone que existe una relación directa entre los predictores y los predictandos; el segundo por su parte la relación se puede obtener a partir de una tercera variable como lo es la probabilidad de ocurrencia del fenómeno a predecir (Morata, 2014).

En cuanto a la estimación de los parámetros de la regresión lineal múltiple existen dos formas, por un lado, se encuentra la minimización de la suma del error absoluto y por el otro el método de mínimos cuadrados de acuerdo con Narula y Wellington (1977).

2.2.3.3 Regionalización Dinámica

La regionalización dinámica se caracteriza por brindar una descripción de la atmósfera considerando todas las variables del modelo. El resultado de hacer el *Downscaling* de los MCG son los modelos climáticos regionales (MCR), los cuales mejoran los resultados de las simulaciones globales en aquellas zonas donde hay presencia de orografías complejas, diferentes usos de suelos, interfases tierra-mar; proporcionando resultados con una mayor resolución espacial y temporal (Morata Gasca, 2014).

Otra de las cosas que permiten mejorar los MCR y que son de gran importancia a escala local son el forzamiento radiativo de las nubes, los procesos convectivos y además procesos de superficie que no han sido considerados en los MCG (Barros & Hwu, 2002).

La metodología con la que se hace la regionalización dinámica se conoce como *Anidamiento*, es decir, los MCR generan representaciones de clima realistas de los MCGAO, gracias a que trabajan en un dominio de menor resolución comparado con los segundos, que incluso funcionan como condición de frontera en función del tiempo. En la **Figura 11** se puede observar un esquema de anidamiento típico en forma de puntos de rejilla de un MCR con un MCGAO.

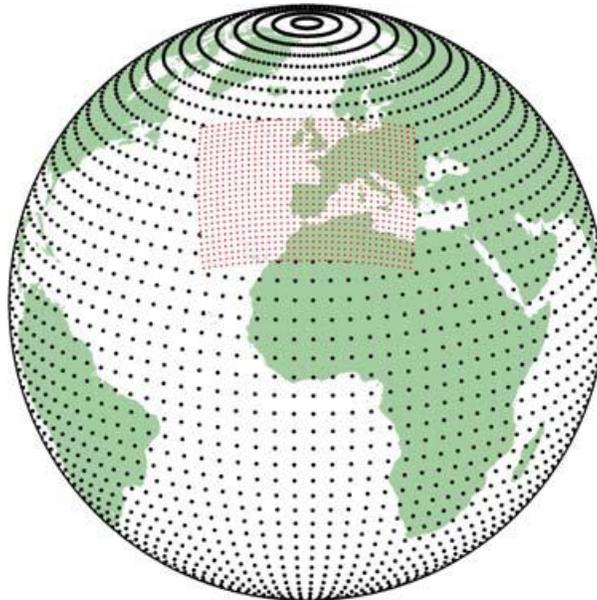


Figura 11. Esquema de anidamiento del dominio de un MCR (malla en rojo) en el dominio global de un MCGAO. Fuente: Morata Gasca (2014)

2.2.4 Corrección del Sesgo

Debido a los MCG y los MCR pueden presentar grandes errores sistemáticos como lo es la diferencia entre valores observados y simulados (Mearns et al., 2012; Sillmann, Kharin, Zhang, Zwiers, & Bronaugh, 2013), se hace necesario corregir el sesgo mediante alguno de los métodos disponibles si se les quiere llevar a la escala local o puntual; estos métodos generalmente están basados en realizar transformaciones estadísticas (Marcos García & Pulido Velazquez, 2017).

En este caso en particular se describirá la metodología que implementa el método de cuantil a cuantil o “*Quantile Mapping*” en particular (Li, Sheffield, & Wood, 2010).

Esta técnica de corrección consiste en tratar de ajustar una función de distribución de tipo acumulativa para el periodo futuro, tomando como base la diferencia que existe entre las funciones de distribución de las observaciones y simulaciones en el periodo común conocido como control (Cannon, Sobie, & Murdock, 2015).

Este método de corrección de sesgo viene implementado en la herramienta estadística de R conocida como “qmap” (Gudmundsson, Bremnes, & Haugen, 2012). Esta herramienta permite encontrar un ajuste para la serie de observaciones y proyecciones mediante la transformación cuantil a cuantil para las series de precipitación y temperaturas máximas y mínimas que se encuentran disponibles en AEMET (Marcos García & Pulido Velazquez, 2017).

2.3 Antecedentes

La cuenca del Lago Contraix que hace parte de la cuenca del río San Nicolau y que será objeto de estudio en esta investigación ha sido previamente estudiada con diversos propósitos. El primero de ellos como caso de aplicación para el desarrollo de una nueva metodología para la cuantificación y modelación del proceso de fusión de nieve, como se encuentra contenido en Orozco Medina (2013).

El segundo, como parte del proyecto ACOPLA: “Acoplamiento de los ciclos hidrobiogeoquímicos del carbono y nitrógeno en cuencas lacustres de alta montaña durante episodios hidrológicos intensos, estima de su peso relativo en los organismos”: Parques Nacionales (ref.: OAPN 011/2008). Director de proyecto Dr. Lluís Camarero, Centre d’ Estudis Avançats de Blanes, CSIC, Blanes y el Dr. Félix Francés, por parte de la Universidad Politècnica de València. En este caso en concreto de investigación los objetivos fueron la estimación de las tasas de secuestro de CO₂ en reacciones de meteorización, establecer las conexiones entre los ciclos del carbono © y el nitrógeno (N), etc.

Por último, como parte del Proyecto ISOTOPOS: “Uso de isótopos estables y radiactivos en seguimiento e investigaciones a largo plazo (LTER) de los ecosistemas acuáticos de los Parques Nacionales” también a cargo del CSIC y cuyo objetivo central era llevar a cabo un muestreo de isótopos radiactivos y estables con el fin de modelar el comportamiento hidrológico de la cuenca a partir de la transferencia de partículas en la ruta atmósfera-cuenca-lago (Camarero et al., 2019).

Esta cuenca se caracteriza por ser netamente de alta montaña e involucrar procesos de acumulación y fusión de nieve, su extensión es de 4.46 km² y su elevaciones mínimas y máximas rondan entre los 1900 y los 3000 msnm, respectivamente. En la **Figura 12** se presenta la ubicación de la cuenca en el contexto de España, específicamente en el Parque Nacional de Aigüestortes y Lago de San Mauricio en la provincia de Lléida, Cataluña.

2.3.1 Proyecto ACOPLA

Los objetivos fundamentales del proyecto ACOPLA eran: estimación de las tasas de secuestro de CO₂ en reacciones de meteorización, encontrar y establecer las relaciones entre los ciclos del C y el N en la cuenca; así como la implementación de un modelo hidrológico de tipo distribuido en TETIS que permitiera adaptar y mejorar las características de propias de las cuencas de alta montaña.

La modelación hidrológica se llevó a cabo en el punto CISCO1 en la desembocadura de la cuenca. La particularidad de esta estación de medición de caudal es que se determinó mediante diferencia de caudales observados en un punto de aforo antes de la confluencia (C1) del cauce proveniente de Contraix con el río

San Nicolau y otro después de la confluencia (CISCO), tal y como se observa en la **Figura 13**. Por este motivo, en la modelación no se consideran las pérdidas subterráneas que pudieran existir.

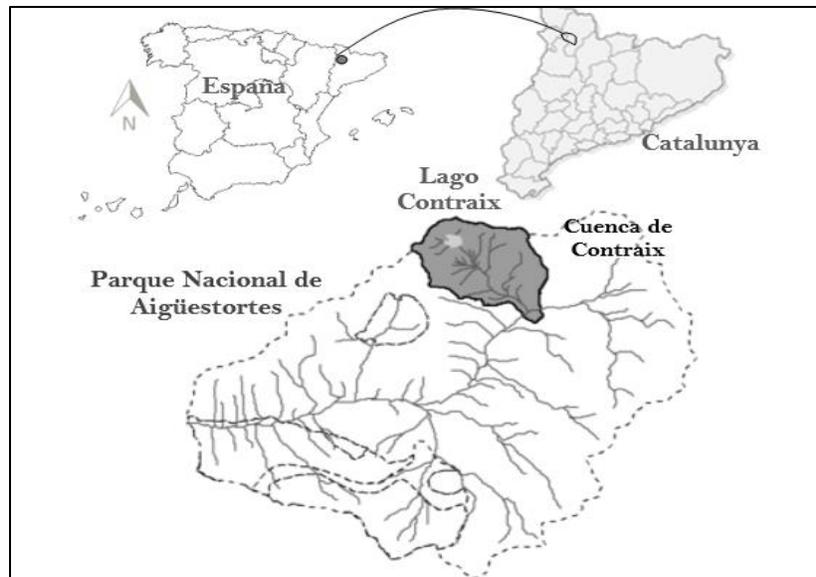


Figura 12. Localización geográfica de la cuenca del Lago Contraix. Fuente: Orozco Medina (2011)

En cuanto a la modelación de lagos, de 6 cuerpos de agua existentes, se trabajó solo con el de mayor envergadura y el que le da el nombre a la cuenca, el Lago Contraix. Esta simplificación consideraba acumular los otros 5 lagos en uno sólo que los representara a todos, debido a que no se contaba con suficiente información que pudiese describirlos (datos de profundidades y volúmenes).

La modelación del proceso de acumulación y fusión de nieve se ha realizado de forma distribuida con el método grado-día a partir de la estimación de factores de fusión de nieve homogéneos y con ayuda de mapas de radiación solar de onda corta, cuya función es representar la variabilidad espacial; de acuerdo a la nueva metodología desarrollada por Orozco (2013). **Figura 13.** Estaciones de aforo en Contraix

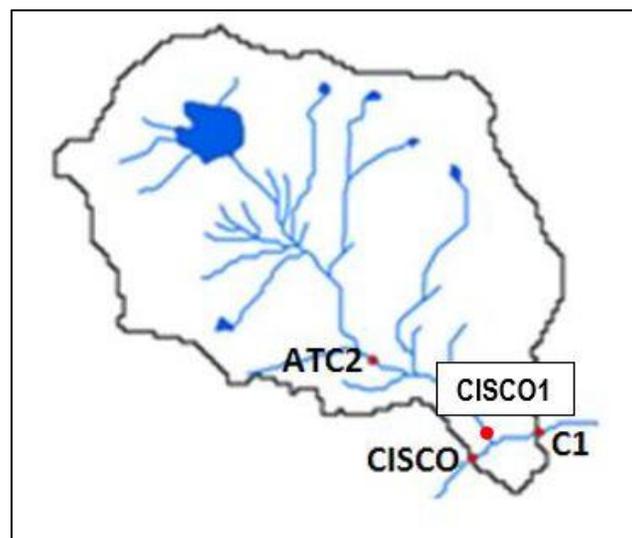


Figura 13. Estaciones de aforo en Contraix. Fuente: Orozco Medina (2011)

En la **Figura 14** se presenta el hidrograma de caudales obtenido para el punto CISCO1 en la desembocadura de la cuenca del Lago Contraix, en donde, además, se incluye la precipitación media simulada para la cuenca.

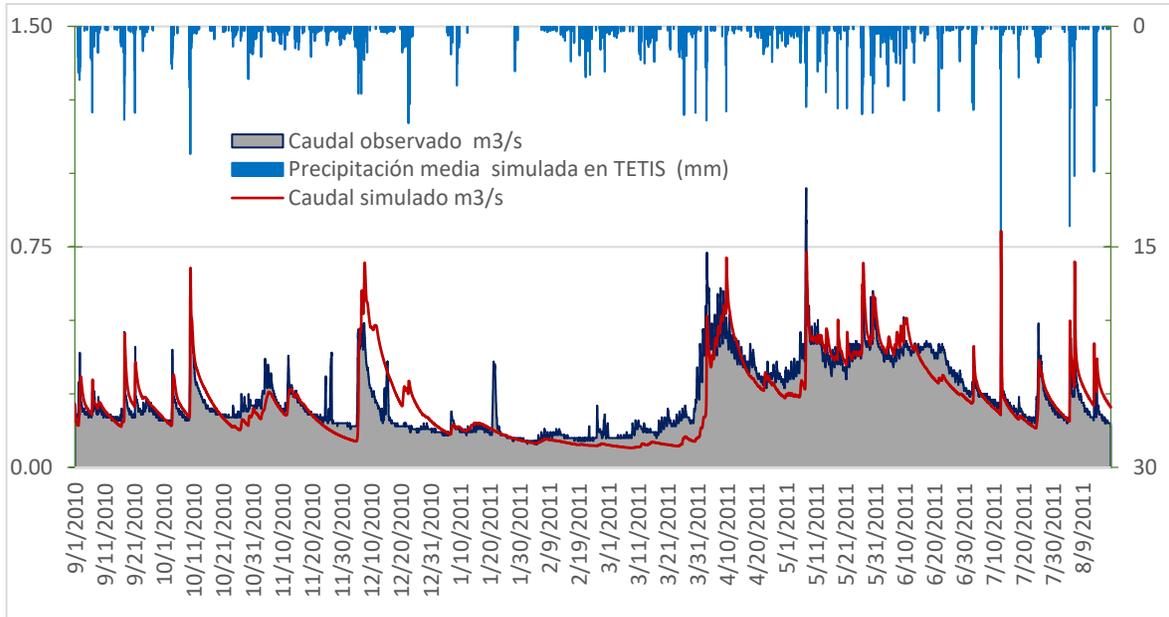


Figura 14. Hidrograma de caudales 2010-2011 de la cuenca del Lago Contraix. Fuente: adaptado Orozco Medina (2011).

En cuanto a las componentes que conforman el caudal de salida en el punto de desagüe de la cuenca, los resultados se pueden apreciar en la **Figura 15**; y como se observa predomina el interflujo sobre el flujo base, la fusión por su parte se presenta mayormente en los meses desde marzo a mayo asociado a la primavera; por último, la componente de la escorrentía directa muestra un flujo con una respuesta muy brusca con picos puntuales, pero que la mayor parte del año toma valores de cero.

Los factores correctores de los parámetros que caracterizan la cuenca obtenidos en la calibración del modelo de Contraix, se presentan en la Tabla 2, y los principales estadísticos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 2. Factores Correctores en TETIS de la modelación hidrológica de la cuenca del Lago Contraix. Fuente: (Orozco Medina, 2011)

FC's	Valor
Almacenamiento estático	1.5599
Evapotranspiración	0.2898
Infiltración	1.9968
Escorrentía directa	8.7611
Percolación	0.2010
Interflujo	800.65
Pérdidas subterráneas	0.00
Flujo base	24.55
Velocidad del cauce	0.1059
Beta	0.00014

Factor de fusión sin lluvia	3.5742
Factor de fusión con lluvia	4.1766
Temperatura base	-1.400

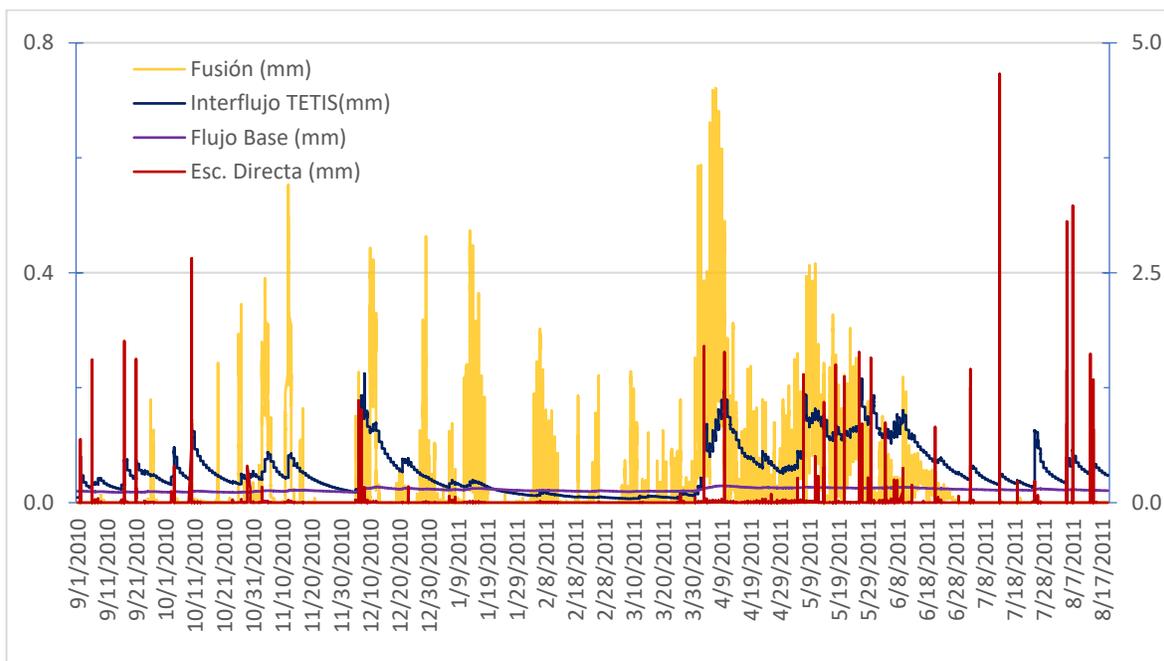


Figura 15. Flujos de salida de la cuenca del Lago Contraix. Fuente: adaptado Orozco Medina (2011).

El índice de Nash obtenido en calibración del modelo hidrológico de Contraix fue de 0.65, considerándose como un indicador bueno de la reproducción de caudales respecto a los observados.

Tabla 3. Estadísticos obtenidos en calibración del modelo. Fuente: (Orozco Medina, 2011).

Estadísticos calibración	
Caudal máximo observado (m ³ /s)	0.950
Caudal máximo simulado (m ³ /s)	0.976
RMSE	0.068
Tiempo al pico observado	5972.50
Tiempo al pico simulado	7563.50
Error al tiempo al pico (%)	26.639
Volumen observado (Hm ³)	7.086
Volumen simulado (Hm ³)	7.080
Error en volumen (%)	-0.082
NSE	0.6510

El balance hidrológico resultado de la calibración del modelo en la desembocadura de la cuenca se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Balance Hidrológico de la cuenca del Lago Contraix. Fuente: Orozco Medina (2011).

Balance hidrológico calibración	
Precipitación observada (mm)	1494.320
Precipitación simulada (mm)	1685.635
ETP (mm)	682.925
ETR (mm)	196.538
Descarga observada (mm)	1479.588
Descarga simulada (mm)	1472.406
Escorrentía directa (mm)	103.044
Interflujo (mm)	952.067
Flujo base (mm)	417.295
Pérdidas (mm)	0.00
Alm. en el sistema (mm)	16.691
Error (%)	-0.0144

En términos de balance hidrológico, los resultados obtenidos para el punto de desagüe CISCO1, muestran que el interflujo es de 952.067 mm, que es aproximadamente el doble que el flujo base con una aportación de 417.295 mm. Así mismo, la escorrentía directa es mucho menor que la anterior con 103.044 mm, la ETR es de 196.538 mm que equivale a un 28% de la ETP.

2.3.2 Proyecto ISOTOPOS

La componente hidrológica del proyecto de ISOTOPOS tenía como principal objetivo dilucidar la influencia de las aguas subterráneas en la generación del flujo superficial a partir del estudio de la biogeoquímica del agua y de su comportamiento a lo largo y ancho del sistema, mediante el uso de isótopos estables y radiactivos en seguimiento e investigaciones a largo plazo (LTER) de los ecosistemas acuáticos de los Parques Nacionales.

Para ello, se tomaron muestras de precipitaciones mensuales en las estaciones de Llebreta y Contraix a 1683 msnm y 2584 msnm, respectivamente; mediante la medición de la composición isotópica de deuterio (D) y de oxígeno disuelto (O^{18}).

Con el fin de realizar el análisis respectivo, se realizó un modelo de mezcla partiendo de la simplificación del modelo hidrológico implementado en TETIS en el proyecto ACOPLA para la cuenca del lago Contraix. Esta simplificación consistió en realizar una agregación temporal de la información cada 30 minutos a diaria (24 horas), no se consideró la ETR porque las mediciones de deuterio y oxígeno disuelto no mostraron que hubiera un efecto significativo de la evaporación, no se consideraron pérdidas ni el almacenamiento superficial, y finalmente en un solo tanque se cuenta el almacenamiento capilar y el subsuperficial. En la **Figura 16**, se presenta el modelo de mezcla implementando en ISOTOPOS.

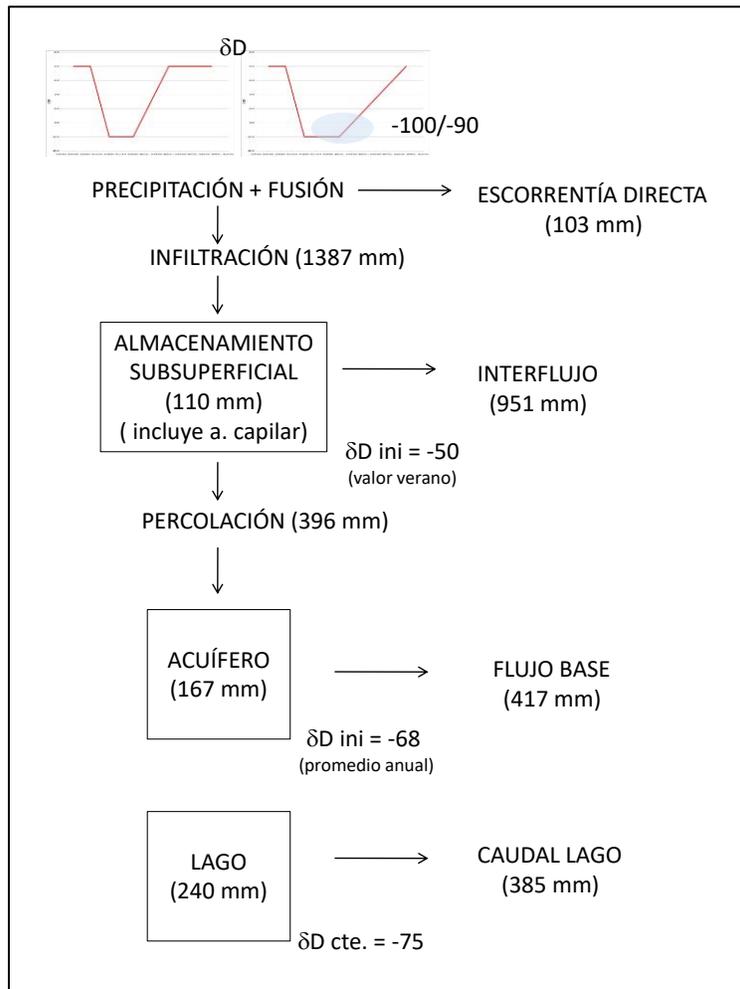


Figura 16. Modelo de mezcla de la cuenca del lago Contraix. Fuente: Camarero et al., (2019)

Paso seguido se calculó la composición isotópica del deuterio de la precipitación, observándose que estos variaban estacionalmente desde -50% en verano hasta -100% en invierno, y además se produce un comportamiento que tiende a ser lineal en los meses de transición. Estos resultados se muestran en la **Figura 17**.

La δD (composición isotópica del deuterio) para la escorrentía directa y la infiltración se calcula a partir de la media ponderada de la composición en la precipitación líquida y sólida por los volúmenes en cada Δt . La δD correspondiente a la percolación y al almacenamiento subsuperficial se estima a partir de la mezcla que se produce entre el agua que se infiltra y el agua contenida en el tanque de almacenamiento gravitacional, siendo entonces la δD del interflujo, la percolación y el almacenamiento subsuperficial la media ponderada del volumen de infiltración y del volumen del tanque gravitacional menos la percolación y el interflujo en cada Δt ; de esta misma forma la δD del flujo base resulta de la mezcla entre el agua que percola y la almacenada en el tanque del acuífero. Por último, la δD del río en cada lapso de tiempo se promedian las respectivas δD ponderando por el flujo de cada componente que provee el modelo en TETIS.

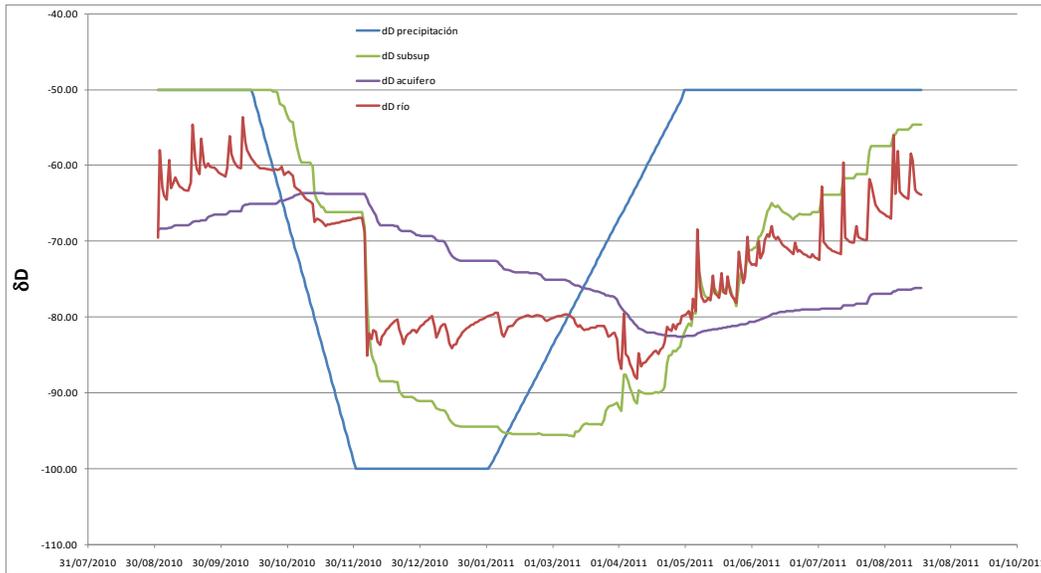


Figura 17. Valores de δD modelados a partir de los flujos obtenidos en TETIS. Fuente: Camarero et al. (2019)

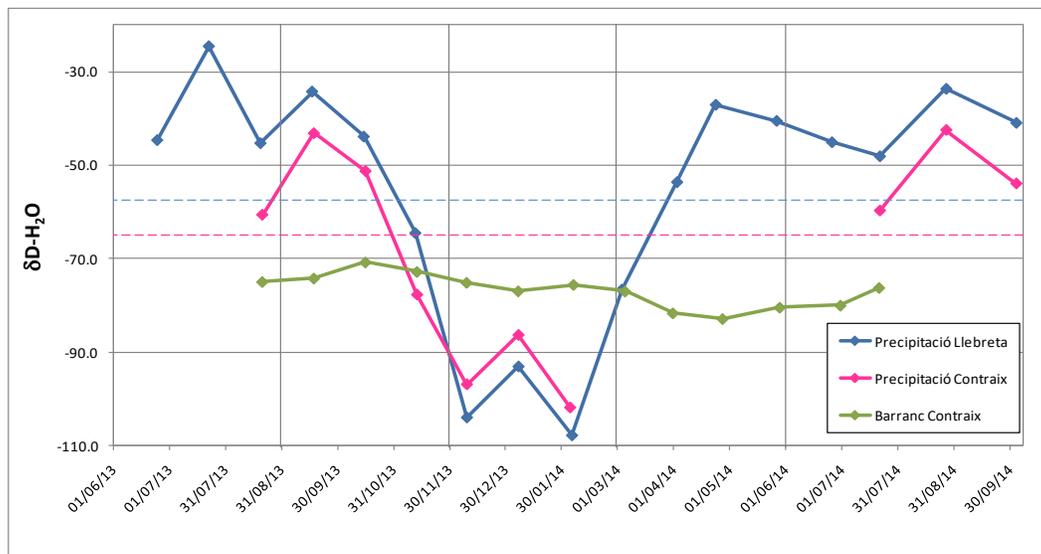


Figura 18. Valores de δD modelados a partir de los flujos obtenidos en TETIS. Fuente: Camarero et al. (2019)

Como se había mencionado en ACOPLA, la componente dominante en términos de balance hidrológico era el interflujo, llegando incluso a duplicar las aportaciones del acuífero. De acuerdo con esos resultados de TETIS, los valores modelados de la composición isotópica del deuterio que se observan en la **Figura 17**, muestran que el acuífero es el tanque que presenta la composición más suavizada.

Sin embargo, cuando se realizan las mediciones en campo de la δD en el río que proviene de la cuenca del lago Contraix en la **Figura 18**, se observa que estas difieren bastante en comparación con las δD modeladas a partir del modelo de mezcla de los flujos de TETIS. En realidad, lo que se observa es que el patrón de variación real en el río se asemeja mucho más al comportamiento del acuífero.

Esto se refuerza con que la amplitud de la variación que se mide en el río es menor a la que se modela con los flujos resultantes de TETIS, además, los valores de la δD siempre se encuentran por debajo de las δD de las precipitaciones tanto de Llebreta como de Contraix.

Como conclusión final, los resultados obtenidos a través de la composición isotópica de las componentes del flujo en el ciclo hidrológico sugieren que se subestima la aportación del flujo base con respecto a la aportación del interflujo.

3 CASO DE ESTUDIO

3.1 Delimitación Geográfica

La cuenca del río San Nicolau, se encuentra ubicada dentro del Parque Nacional de Aigüestortes y Lago de San Mauricio en los pirineos catalanes, en la provincia de Lleida, España (Aigüestortes.info, 2019). En la **Figura 19** se presenta el mapa de localización de la cuenca del río San Nicolau en la provincia de Lleida, Cataluña (España). Es de destacar, que esta cuenca está influenciada fuertemente por los procesos de fusión de nieve; asimismo, es una cuenca que está poco instrumentada y por tanto la información hidrometeorológica con que se cuenta está bastante limitada.

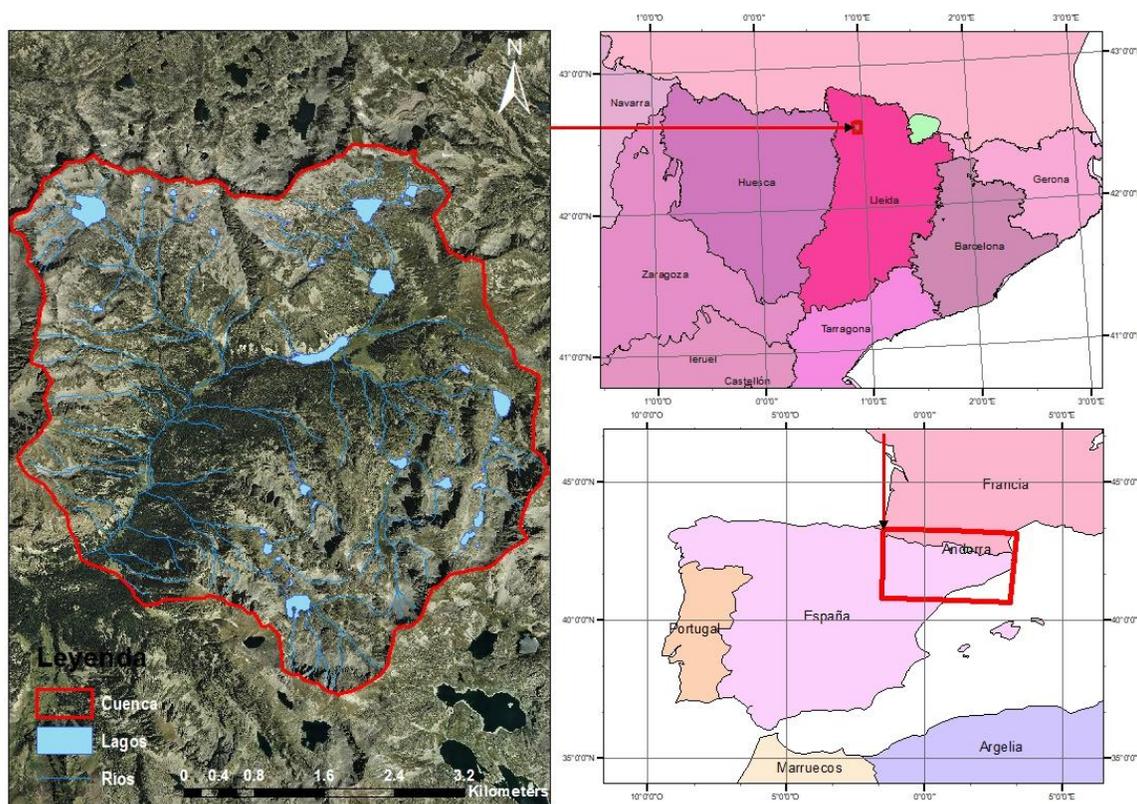


Figura 19. Mapa de localización de la cuenca del Río San Nicolau.

3.2 Información Hidroclimatológica

El clima en la zona de estudio es de tipo atlántico de alta montaña. En la cuenca, la climatología se encuentra condicionada por diversos factores, como lo son la elevación, que va desde los 1801 a los 2943 msnm; y la formación y orientación de sus valles, esto se explica así: los que se encuentran abiertos al norte y al oeste presentan una marcada influencia oceánica, por el contrario, los que miran al sur y al este una influencia de tipo mediterránea; con lo cual en la región se generan diversos microclimas (Aigüestortes.info, 2019).

En la modelación hidrológica de la cuenca de estudio se ha utilizado información de precipitación, temperaturas, evapotranspiración potencial, caudal y altura equivalente de agua (SWE en inglés), proporcionada por el CSIC, pero también por Spain02 V0.5, disponible en el sitio web de AEMET (<http://www.aemet.es/es/portada>).

3.2.1 Precipitación, Temperatura

Las precipitaciones anuales acumuladas son mayores a los 1000 mm, siendo en invierno, en forma de nieve. En las zonas de mayor altitud el clima tiende a ser más uniforme, por lo que las precipitaciones anuales suelen ser del orden de los 1500 mm. En cuanto a las temperaturas, en invierno, la temperatura media mensual no supera los 0°C durante los meses más fríos para las zonas más elevadas, y para las zonas más bajas puede estar entre los 0°C y los 5°C (Aigüestortes.info, 2019).

Para el caso de la precipitación y temperatura se dispone de información a escala de 30 minutos, para las estaciones de Llebreta (1683 msnm) y Contraix (2584 msnm) para dos periodos comunes de tiempo, primero uno comprendido entre el 01/09/2010 y el 19/08/2011, y segundo, comprendido entre 01/03/2013 al 31/08/2014. La precipitación acumulada para el año 2010-2011 y 2013-2014 en Llebreta es 990 mm y 2240 mm, respectivamente; por otro lado, en Contraix es de 1494 mm y 2613 mm para el 2010-2011 y 2013-2014, respectivamente.

En la **Figura 20** y en la **Figura 21** se presentan las series temporales de las variables precipitación y temperatura media, respectivamente, para la estación de Llebreta y Contraix para el periodo 2013-2014, agregados a escala diaria de 7:00 a.m. a 7:00 a.m. de modo que sea compatible con las series presentadas en Spain02.

En este punto, se debe mencionar que para la modelación de la cuenca del Lago Contraix, la escala temporal en la que se presentarán los resultados será la treinta-minutal. Esto, debido a que como se presentó en los resultados del proyecto ACOPLA para la misma cuenca la información estaba en esta escala subdiaria. Asimismo, como el objetivo principal de este trabajo es la modelación de los efectos del cambio climático en la cuenca del río San Nicolau, es preciso tener las series en escala diaria, porque esta es la escala que emplean los modelos de cambio climático de los que dispone AEMET.

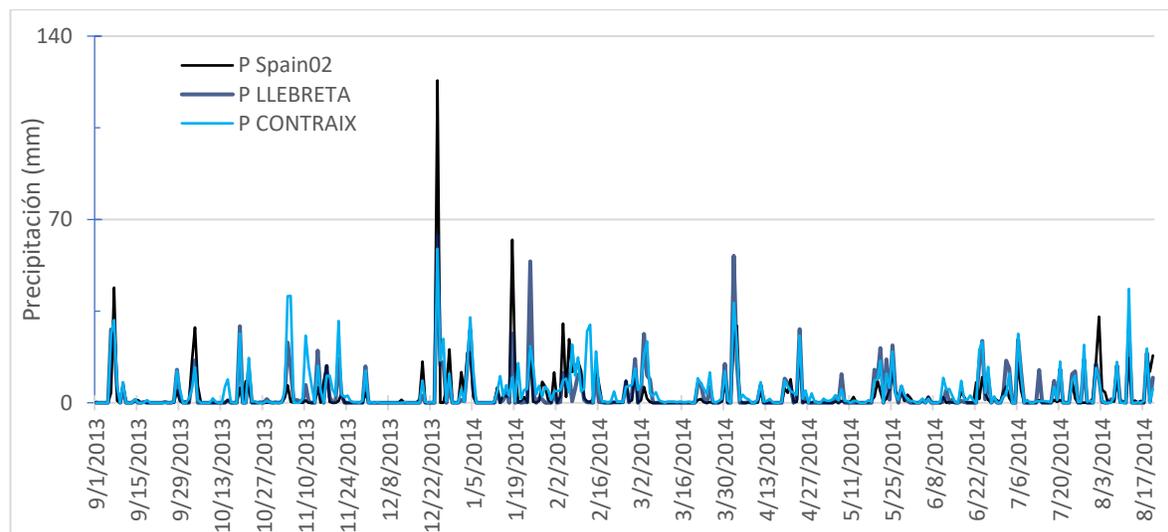


Figura 20. Serie de precipitación para el año 2013-2014 de las estaciones Llebreta, Contraix y Spain02.

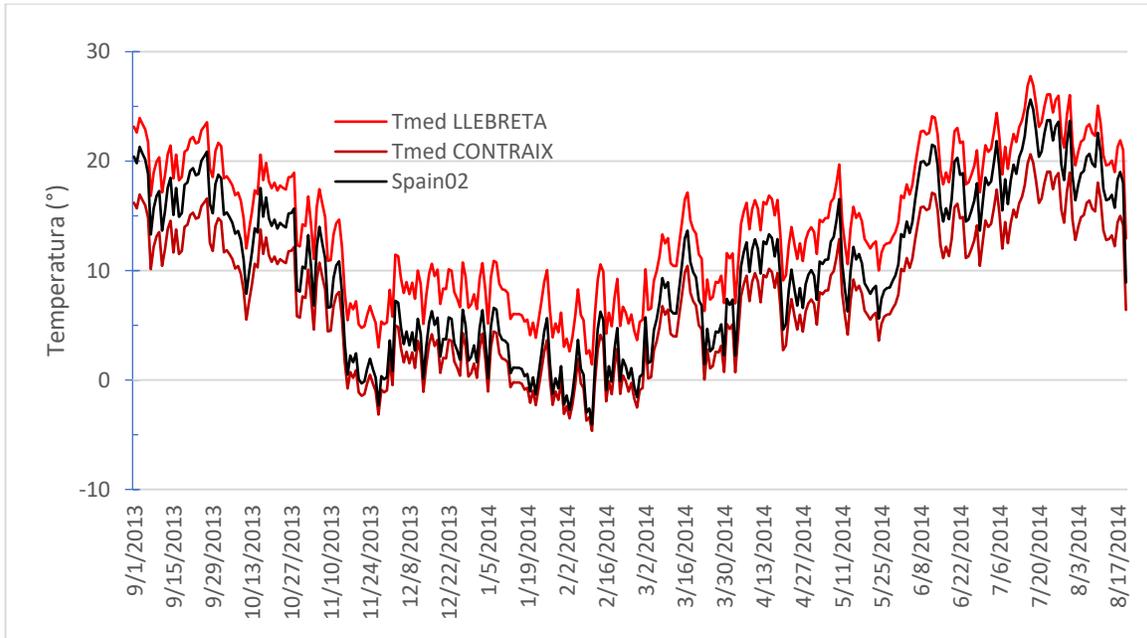


Figura 21. Serie de temperaturas medias para el año 2013-2014 de las estaciones Llebreta, Contraix y Spain02.

Debido a que las series provenientes de las bases de datos de Spain02 son representativas para un píxel de tamaño $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, es necesario realizar una corrección mediante un factor de reducción areal, o bien, mediante la correlación que existe entre las series observadas en Spain02 y las estaciones meteorológicas con observaciones puntuales de una zona en concreto; como es el caso de la cuenca del río San Nicolau, al disponer de 2 estaciones meteorológicas.

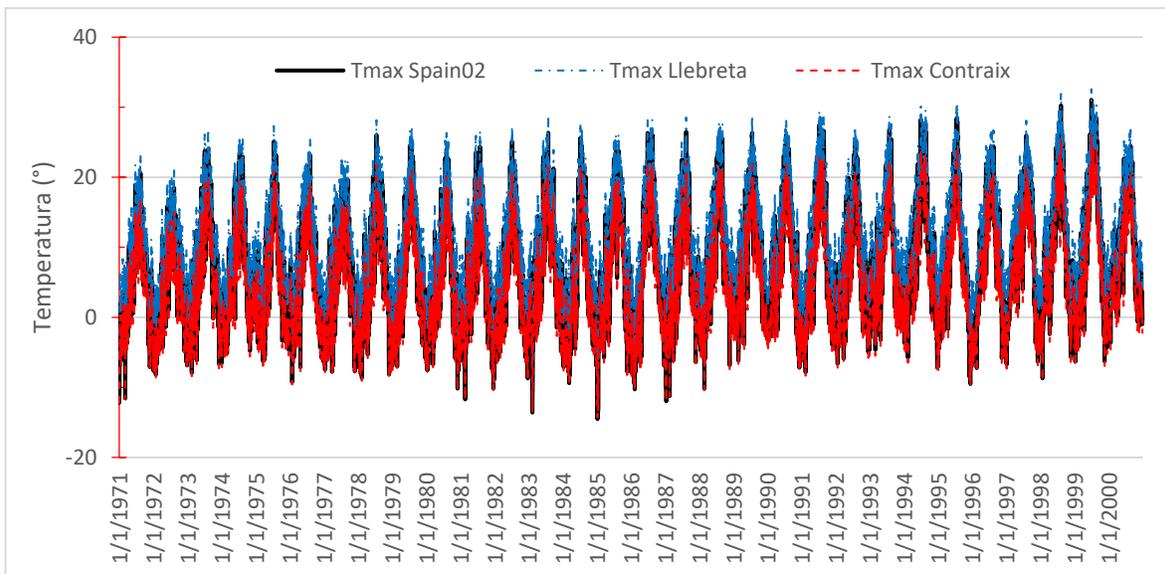


Figura 22. Series de temperaturas medias de 1971 al 2000 de las estaciones Llebreta, Contraix y Spain02.

Dicho lo anterior, con la finalidad de corregir las observaciones provenientes de Spain02 con las mediciones de las estaciones de Llebreta y Contraix, se trabajó con el periodo común entre ambas informaciones

comprendido entre el 01/09/2013 y el 31/08/2014. De forma que mediante correlación de las temperaturas y posterior regresión lineal se obtuvieron las series históricas desde el año 1971 hasta el año 2015 de esta variable ajustadas a las estaciones de Llebreja y Contraix como se observa en la **Figura 22** para las temperaturas medias.

Para el caso de las precipitaciones, se determinó un factor de incremento tanto para las 2 estaciones meteorológicas y no una regresión lineal, debido a que si se hacía de esta forma no se captarían adecuadamente los días sin precipitación. Finalmente, en la gráfica mostrada en la **Figura 23** se presentan las series de precipitación tanto de Spain02, como de las estaciones Llebreja y Contraix a partir de la información proveniente de esta base de datos trasladada a esos puntos específicos para el periodo comprendido entre enero de 1971 a diciembre del año 2000.

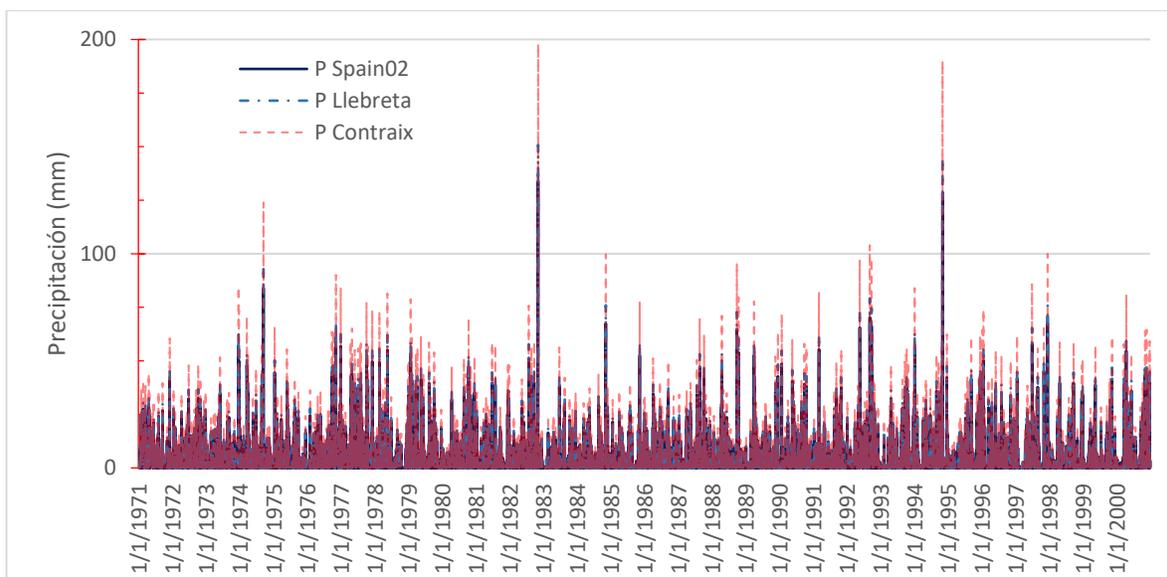


Figura 23. Series de precipitaciones de 1971 al 2000 de las estaciones Llebreja, Contraix y Spain02.

3.2.2 Evapotranspiración de Referencia (ETP)

La variable ETP a diferencia de las series de precipitaciones y temperaturas no puede ser medida de manera directa, sino, que debe calcularse a partir de información secundaria como lo es la radiación solar, la humedad relativa, la velocidad del viento, etc.

Para este caso en particular, se decidió estimar el valor de esta variable por el método desarrollado por Hargreaves para el cálculo de la ETP, debido a la gran ventaja que presenta de poderse aplicar en cualquier caso siempre que se tenga información de datos de temperaturas mínimas, máximas y medias; así como también de información de radiación solar extraterrestre (Hargreaves & Samani, 1985).

La ecuación utilizada entonces para calcular la evapotranspiración potencial desarrollada por Hargreaves se presenta a continuación.

$$ETP = 0.0135 * (T_{med} + 17.78) * R_s \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde,

T_{med} : temperatura media ($^{\circ}\text{C}$)

R_s : radiación solar incidente (mm/día)

Sin embargo, esta ecuación requiere que se estime por aparte la radiación solar incidente a partir de formulaciones adicionales. Para ello, la FAO en su paper No. 56 propone una ecuación simplificada de Hargreaves, para el cálculo de la ETP, tal y como se muestra a continuación en la ecuación (10) (Allen, Pereira, Raes, Smith, & Ab, 1998).

$$ETP = 0.0023 * (T_{med} + 17.78) * (T_{max} - T_{min})^{0.5} R_s \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde,

ETP: evapotranspiración potencial diaria (mm/día)

T_{med} : Temperatura diaria media ($^{\circ}\text{C}$)

T_{max} : Temperatura diaria máxima ($^{\circ}\text{C}$)

T_{min} : Temperatura diaria mínima ($^{\circ}\text{C}$)

R_s : Radiación solar extraterrestre (mm/día) (tabulada)

Para la cuenca del río San Nicolau, que se encuentra ubicada en latitud norte a 42° , los valores mensuales de radiación solar extraterrestre en MJ/m²/día, se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Radiación Solar incidente en MJ/m²/día para la zona de estudio. Fuente: Allen (1998)

Northern Hemisphere												Lat. deg.
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
0.0	2.6	10.4	23.0	35.2	42.5	39.4	28.0	14.9	4.9	0.1	0.0	70
0.1	3.7	11.7	23.9	35.3	42.0	38.9	28.6	16.1	6.0	0.7	0.0	68
0.6	4.8	12.9	24.8	35.6	41.4	38.8	29.3	17.3	7.2	1.5	0.1	66
1.4	5.9	14.1	25.8	35.9	41.2	38.8	30.0	18.4	8.5	2.4	0.6	64
2.3	7.1	15.4	26.6	36.3	41.2	39.0	30.6	19.5	9.7	3.4	1.3	62
3.3	8.3	16.6	27.5	36.6	41.2	39.2	31.3	20.6	10.9	4.4	2.2	60
4.3	9.6	17.7	28.4	37.0	41.3	39.4	32.0	21.7	12.1	5.5	3.1	58
5.4	10.8	18.9	29.2	37.4	41.4	39.6	32.6	22.7	13.3	6.7	4.2	56
6.5	12.0	20.0	30.0	37.8	41.5	39.8	33.2	23.7	14.5	7.8	5.2	54
7.7	13.2	21.1	30.8	38.2	41.6	40.1	33.8	24.7	15.7	9.0	6.4	52
8.9	14.4	22.2	31.5	38.5	41.7	40.2	34.4	25.7	16.9	10.2	7.5	50
10.1	15.7	23.3	32.2	38.8	41.8	40.4	34.9	26.6	18.1	11.4	8.7	48
11.3	16.9	24.3	32.9	39.1	41.9	40.6	35.4	27.5	19.2	12.6	9.9	46
12.6	18.0	25.3	33.5	39.3	41.9	40.7	35.9	28.4	20.3	13.9	11.1	44
13.8	19.2	26.3	34.1	39.5	41.9	40.8	36.3	29.2	21.4	15.1	12.4	42
15.0	20.4	27.2	34.7	39.7	41.9	40.8	36.7	30.0	22.5	16.3	13.6	40
16.2	21.5	28.1	35.2	39.9	41.8	40.8	37.0	30.7	23.6	17.5	14.8	38
17.5	22.6	29.0	35.7	40.0	41.7	40.8	37.4	31.5	24.6	18.7	16.1	36
18.7	23.7	29.9	36.1	40.0	41.6	40.8	37.6	32.1	25.6	19.9	17.3	34
19.9	24.8	30.7	36.5	40.0	41.4	40.7	37.9	32.8	26.6	21.1	18.5	32
21.1	25.8	31.4	36.8	40.0	41.2	40.6	38.0	33.4	27.6	22.2	19.8	30
22.3	26.8	32.2	37.1	40.0	40.9	40.4	38.2	33.9	28.5	23.3	21.0	28
23.4	27.8	32.8	37.4	39.9	40.6	40.2	38.3	34.5	29.3	24.5	22.2	26
24.6	28.8	33.5	37.6	39.7	40.3	39.9	38.3	34.9	30.2	25.5	23.3	24
25.7	29.7	34.1	37.8	39.5	40.0	39.6	38.4	35.4	31.0	26.6	24.5	22
26.8	30.6	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.3	35.8	31.8	27.7	25.6	20
27.9	31.5	35.2	38.0	39.0	39.1	38.9	38.2	36.1	32.5	28.7	26.8	18
28.9	32.3	35.7	38.1	38.7	38.6	38.5	38.1	36.4	33.2	29.6	27.9	16
29.9	33.1	36.1	38.1	38.4	38.1	38.1	38.0	36.7	33.9	30.6	28.9	14
30.9	33.8	36.5	38.0	38.0	37.6	37.6	37.8	36.9	34.5	31.5	30.0	12
31.9	34.5	36.9	37.9	37.6	37.0	37.1	37.5	37.1	35.1	32.4	31.0	10
32.8	35.2	37.2	37.8	37.1	36.3	36.5	37.2	37.2	35.6	33.3	32.0	8
33.7	35.8	37.4	37.6	36.6	35.7	35.9	36.9	37.3	36.1	34.1	32.9	6
34.6	36.4	37.6	37.4	36.0	35.0	35.3	36.5	37.3	36.6	34.9	33.9	4
35.4	37.0	37.8	37.1	35.4	34.2	34.6	36.1	37.3	37.0	35.6	34.8	2
36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6	0

Debido a que la ecuación simplificada de Hargreaves utiliza la información de la radiación solar extraterrestre en mm/día, se debe realizar la conversión de unidades desde MJ/m²/día a partir de un factor de conversión para la radiación, tal y como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Factor de conversión para la Radiación Solar incidente de MJ/m²/día a mm/día para la zona de estudio. Fuente: Allen et al. (1998)

TABLE 3
Conversion factors for radiation

	multiplier to obtain energy received on a unit surface per unit time				equivalent evaporation
	MJ m ⁻² day ⁻¹	J cm ⁻² day ⁻¹	cal cm ⁻² day ⁻¹	W m ⁻²	mm day ⁻¹
1 MJ m ⁻² day ⁻¹	1	100	23.9	11.6	0.408
1 cal cm ⁻² day ⁻¹	4.1868 10 ⁻²	4.1868	1	0.485	0.0171
1 W m ⁻²	0.0864	8.64	2.06	1	0.035
1 mm day ⁻¹	2.45	245	58.5	28.4	1

Finalmente, en la Tabla 7 se presentan los valores obtenidos de la radiación solar extraterrestre en mm/día.

Tabla 7. Radiación Solar extraterrestre en mm/día para la zona de estudio.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ra (mm/día)	5.63	7.83	10.73	13.91	16.12	17.10	16.65	14.81	11.91	8.73	6.16	5.06

En la **Figura 24** y **Figura 25** se muestran las gráficas de las series temporales calculadas para la variable ETP por el método de Hargreaves con su ecuación simplificada para el periodo de calibración en la cuenca del Lago Contraix y para la validación espacio-temporal de la cuenca del río San Nicolau, respectivamente.

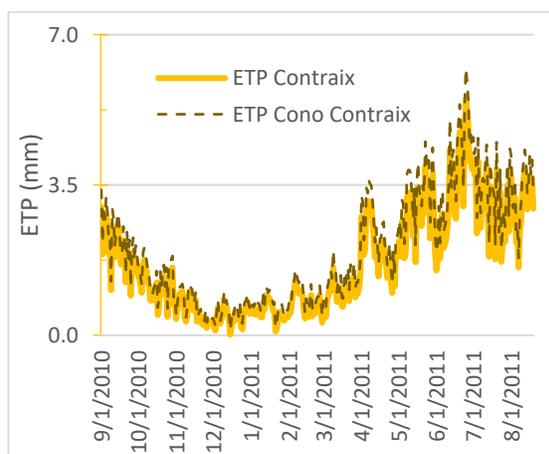


Figura 24. Serie temporal de ETP obtenida por el método de Hargreaves en periodo de calibración 2010-2011.

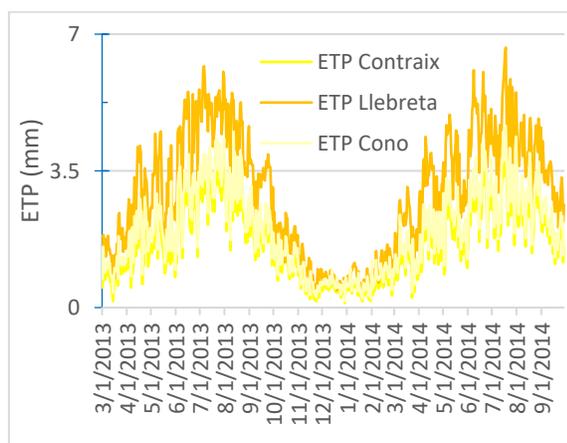


Figura 25. Serie temporal de ETP obtenida por el método de Hargreaves en periodo de calibración 2013-2014.

A partir de las observaciones de temperaturas de Spain02 y posterior traslación de la serie a las estaciones de Llebreta y Contraix, se estimaron los valores de ETP por el método de Hargreaves, dando como resultado que los valores medios de esta variable para Spain02, Estación Llebreta y Estación Contraix son 815mm, 905 mm y 702 mm, respectivamente. El gráfico de los valores mensuales de la ETP para estos 3 puntos se presenta en la **Figura 26**.

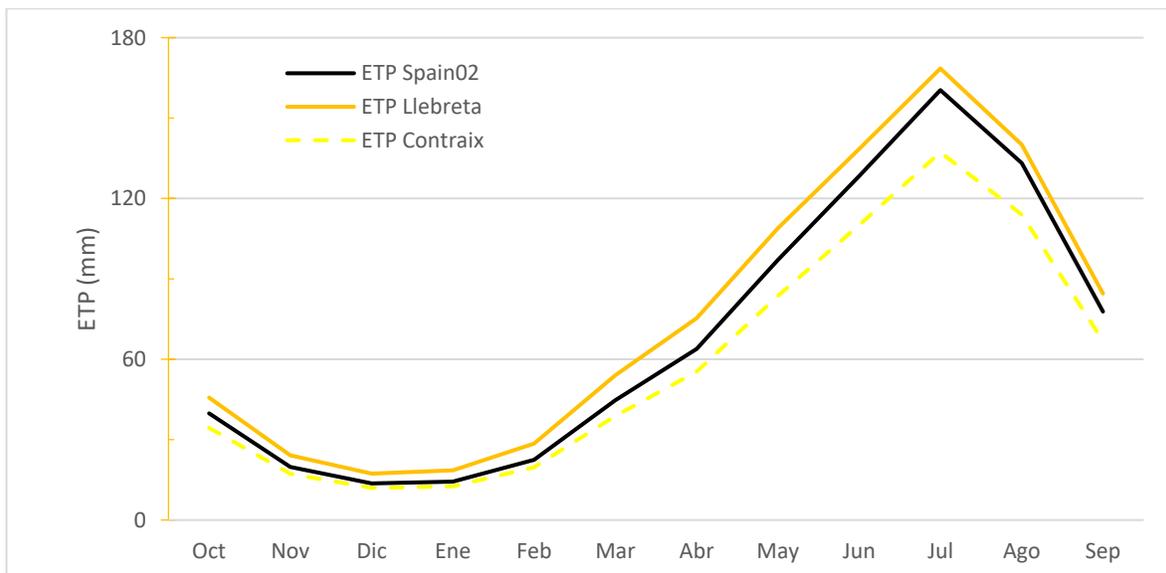


Figura 26. ETP mensual obtenida por el método de Hargreaves en periodo histórico (1971-2000) para las estaciones de Llebreta y Contraix a partir de Spain02.

3.3 Topografía

En cuanto a la topografía y como se ha mencionado antes, la cuenca del río San Nicolau se caracteriza por ser una cuenca de alta montaña con una orografía compleja si se quiere, así como tiene zonas muy montañosas también dispone de una zona de valle a pesar de su tamaño tan pequeño de 26,42 km². Las principales características topográficas en cuanto a elevaciones se pueden observar en la Tabla 8.

Tabla 8. Principales Características Topográficas de la zona de estudio.

Área (km ²)	Elevación Mínima (msnm)	Elevación Máxima (msnm)	Elevación Media (msnm)	STD
26.42	1801	2950	2365.952	242.953

Como se puede observar la elevación mínima es de 1801 msnm, la máxima es 2950 msnm y la elevación media 2365.952 msnm.

En la **Figura 27** se muestra el mapa del modelo de elevación digital del terreno recortado para la zona de estudio con tamaño de celda de 30 m x 30 m.

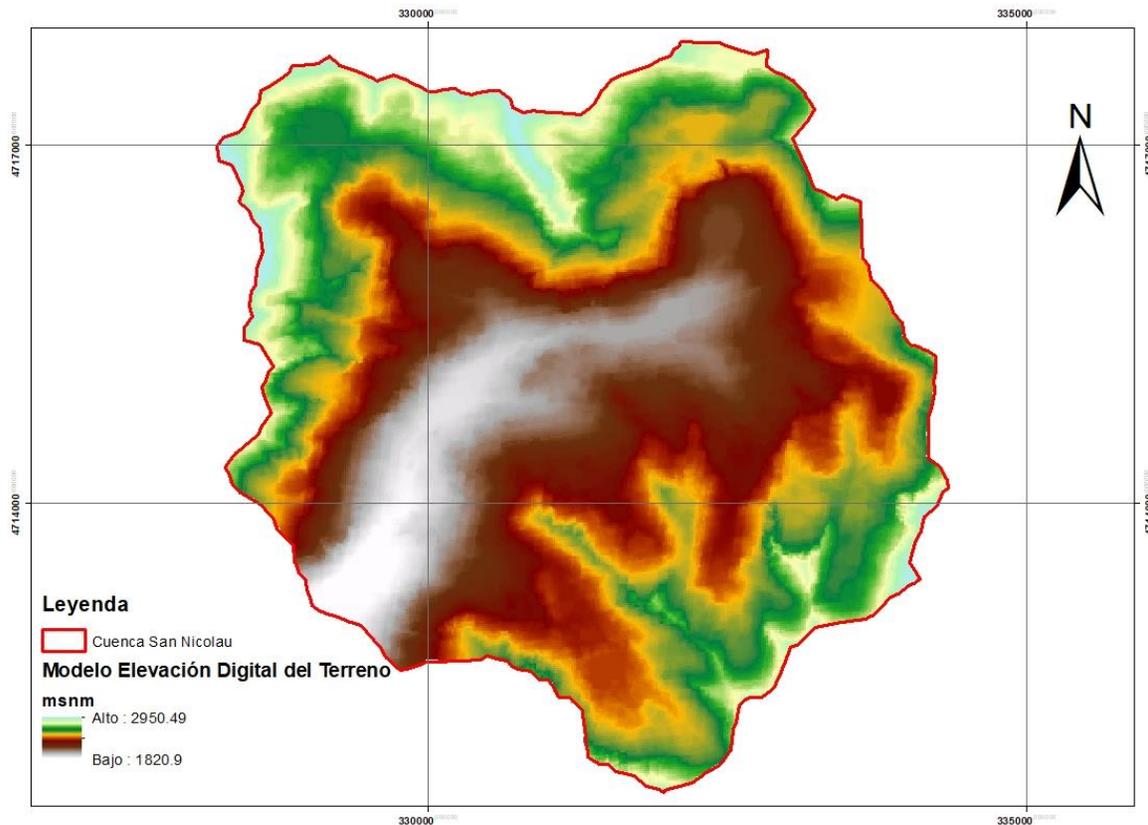


Figura 27. Modelo de Elevación Digital del Terreno de la cuenca del Río San Nicolau.

3.4 Suelos

El tipo de suelos predominante en la cuenca del río San Nicolau son los Litosoles o Leptosoles de acuerdo con el mapa de tipos de suelos de España del Instituto Geográfico Nacional (IGN) 1:1'000.000 de acuerdo a la nomenclatura y clasificación edafológica establecida por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (IGN, 2006).

Los litosoles o leptosoles se caracterizan por ser suelos muy poco profundos, genéticamente jóvenes, que generalmente se encuentran sobre formaciones rocosas duras o material calcáreo; pero también sobre suelos gravosos y pedregosos con grandes profundidades. Adicionalmente, estos suelos son comunes de zonas o regiones montañosas (FAO, 2019).

Debido a que la profundidad de los perfiles de este tipo de suelos es restringida, es habitual encontrar en el suelo fragmentos de roca. Los litosoles tienen la capacidad de desarrollarse en diferentes condiciones climáticas y litologías; en general, son suelos que drenan bien y tienen una buena aireación. Asimismo, las propiedades tanto físicas como químicas y biológicas suelen determinarse por las características del clima y del material parental (Jordanova, 2017).

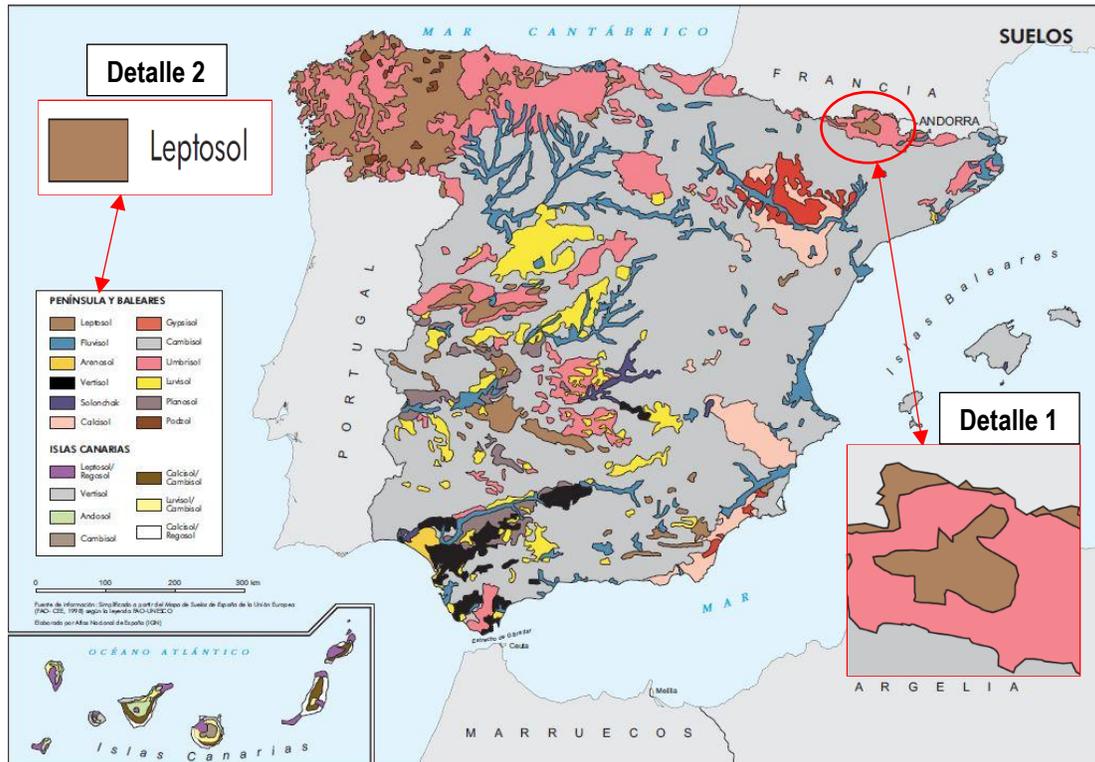


Figura 28. Mapa de suelos de la zona de estudio. Fuente: adaptado IGN (2006)

En la **Figura 28** se presenta la clasificación de suelos para la zona de estudio donde se encuentra la cuenca del río San Nicolau, en donde se detalla de que acuerdo al mapa en la región predomina el litosol.

3.5 Información Batimétrica

En la cuenca del río San Nicolau, de acuerdo con información cartográfica y de imágenes satelitales existen 68 cuerpos de agua categorizados como lagos. De esos 68, sólo se cuenta con información de su área de extensión y en algunos casos de su profundidad máxima.

Partiendo de esta premisa y de filtrar por los que más información aportaran y que pudieran utilizarse, se seleccionaron en total 12 lagos como representativos para realizar la modelación hidrológica y poder construir la curva de descarga (cota-capacidad) de forma aproximada, a partir de asumir la ecuación 11 del aliviadero de sección trapezoidal. Las curvas de cota-capacidad de los 12 lagos se presentan en el ANEXO 1. Es indispensable mencionar, que no se conocen cuáles pueden ser las filtraciones reales de los lagos y que tanto se puede afectar la modelación hidrológica a raíz de este déficit de información.

$$Q = 1.86 * b * h^{\frac{2}{3}} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde,

Q: caudal m³/s

B: base (solera) en m

H: altura lámina de agua en m

3.6 Usos de Suelo

Para determinar los usos de suelo de la cuenca del río San Nicolau se ha utilizado la información disponible del proyecto CORINE LAND COVER 2006 desarrollado por la Comisión Europea, a partir de imágenes satelitales y registros cartográficos (European Environment Agency, 2006). Esta información se encuentra disponible en el Centro Nacional de Información Geográfica de España. En la **Figura 29**, se muestra en detalle los tipos de cobertura de suelo que ocupan la zona de estudio.

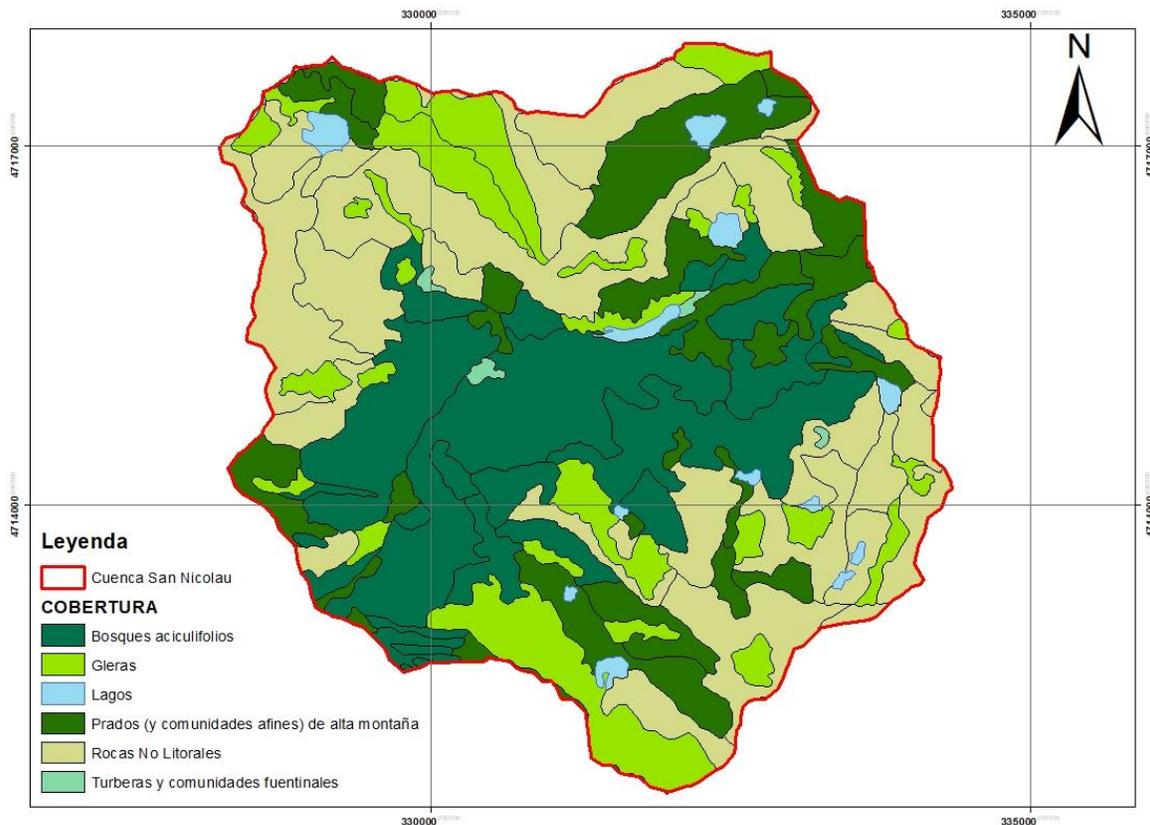


Figura 29. Mapa de ocupación de suelos de la zona de estudio. Fuente: IGN (2006)

De acuerdo con lo anterior, en la cuenca del río San Nicolau se presentan las siguientes categorías de coberturas de suelo con su respectivo porcentaje de área ocupada con respecto a la zona analizada (**Figura 30**):

- Bosques Aciculifolios: 29%
- Gleras: 15%
- Lagos: 2%
- Prados y comunidades afines de alta montaña: 18%
- Rocas no litorales: 35%

- Turberas y comunidades fuentinales: 1%

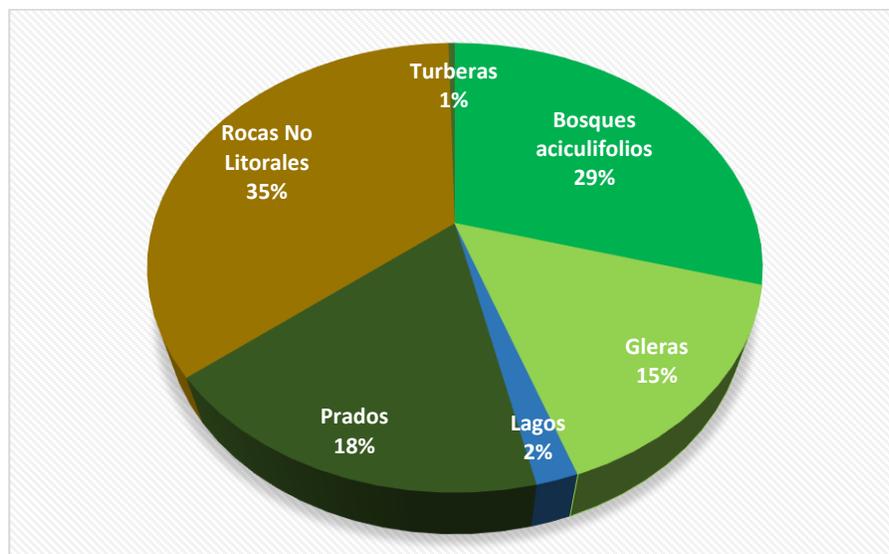


Figura 30. Mapa de ocupación de suelos de la zona de estudio. Fuente: (IGN, 2006)

Como se puede observar en la información presentada anteriormente, la cuenca se compone mayoritariamente de lo que serían rocas no litorales o suelo desnudo, seguido por bosques, prados, gleras, lagos y por último, turberas.

3.7 Geología y Litología

La geología de la zona de estudio en la cuenca del río San Nicolau se conforma de estructuras litológicas generalmente que tienden a ser muy homogéneas, principalmente por biotitas granodioritas con algunas variantes. En la **Figura 31** se presenta el mapa geológico de la zona de estudio en escala 1:50.000 (IGME, 2016). En él se reconocen 15 formaciones litológicas diferentes, y como se había dicho anteriormente con predominancia de formaciones granodioríticas.

En la Tabla 9 se presentan las formaciones presentes en la cuenca del río San Nicolau, con su código identificador de acuerdo a la leyenda presentada en el mapa geológico nacional escala 1:50.000.

Tabla 9. Formaciones litológicas presentes en la zona de estudio.

Código Identificador Mapa Geológico Nacional 1:50.000	Formación Litológica
9	Granodioritas y monzogranitos biotíticos con anfíbol, de grano medio grueso de La Maladeta y Barruera.
10	Granodioritas y monzogranitos biotíticos con anfíbol, de grano medio grueso, con megacristales de la Maladeta.
11	Granitos biotíticos +/- Ms, +/-Cd de grano medio de Travessany-Estany Gerber y Artles

24	Alternancia de pizarras, pizarras carbonatadas y calizas. Fm Rueda.
35	Bloques, arenas con clastos masivos, gravas, arenas, limos y lutitas. Depósito glaciario o till
36	Bloques, clastos con arenas y limos. Morrenas y morrenas de nevero.
37	Limos, lutitas y arenas. Depósitos glaciolacustres.
38	Bloques angulosos con cordones. Glaciario de rocas.
39	Arenas, gravas y limos. Abanicos fluvio-deltaicos. Abanicos Torrenciales.
40	Bloques, clastos con arenas masivos. Conos de avalancha o aludes y otros depósitos de ladera: canchales y conos de derrubios.
42	Arenas, limos, grupos y bloques. Fondo de valle y llanuras de inundación fluvial.

En cuanto a las fallas y otros procesos geológicos y de acuerdo a la información aportada por el mapa mostrado en la **Figura 31**, se ve que por lo general predomina el contacto discordante entre estratos, hay cabalgamientos reales y otros supuestos en la zona del valle del río San Nicolau y hasta el punto desembocadura, más exactamente en la zona central; asimismo, se aprecian algunos ejes de pliegue de primera fase tanto con buzamiento invertido como normal (IGME, 2016).

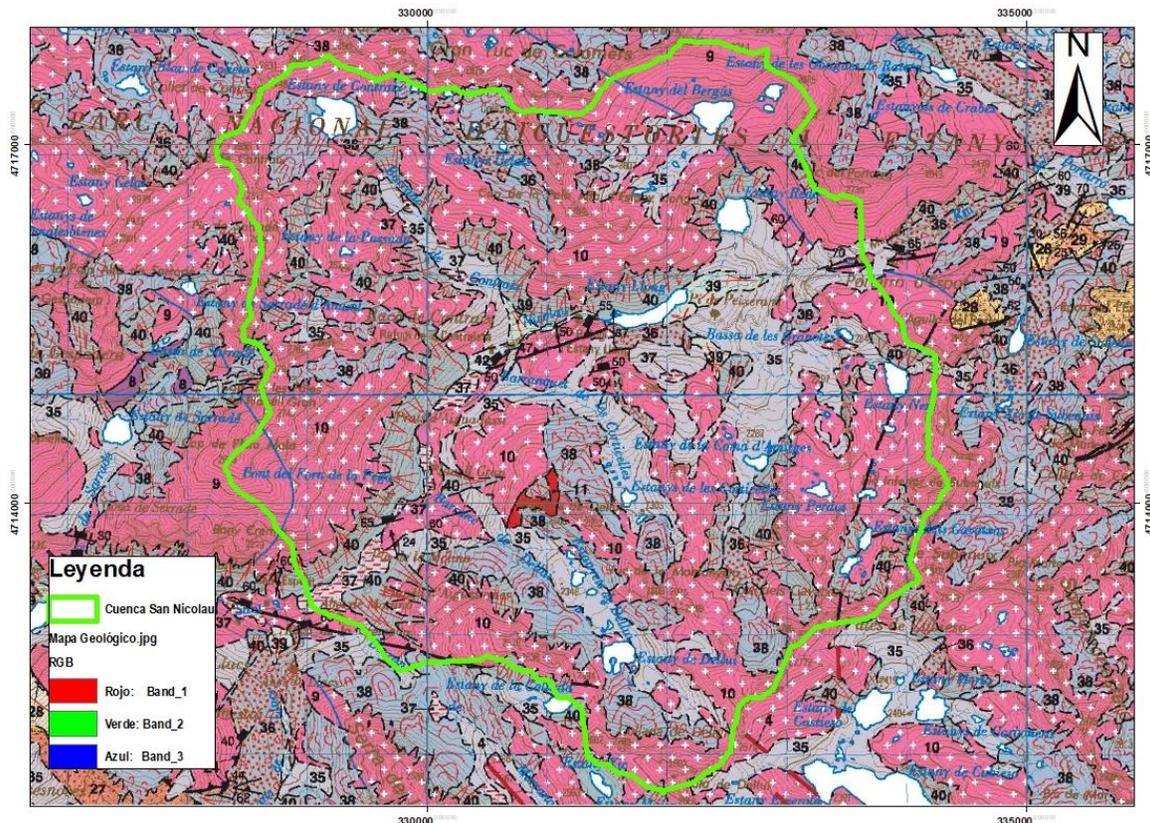


Figura 31. Mapa geológica escala 1:50.000 de la zona de estudio. Fuente: IGN (2006)

En la cuenca del río San Nicolau el mapa de litología muestra que el 4.2% equivalente a 1.11 km² se corresponde con formaciones de depósitos glaciares, piedemonte y superficial; y que la biotita granodiorita

que es un tipo de roca plutónica de formación lenta, representando el 95.8% de la cuenca y equivalente a 25.31 km².

El mapa que se muestra en la **Figura 32** a partir de información disponible y proporcionada por el Centro de Estudios Avanzados de Blanes, asociado al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y de información consultada en el IGME con respecto al mapa litoestratigráfico de España en escala 1:200.000 (IGME, 2009).

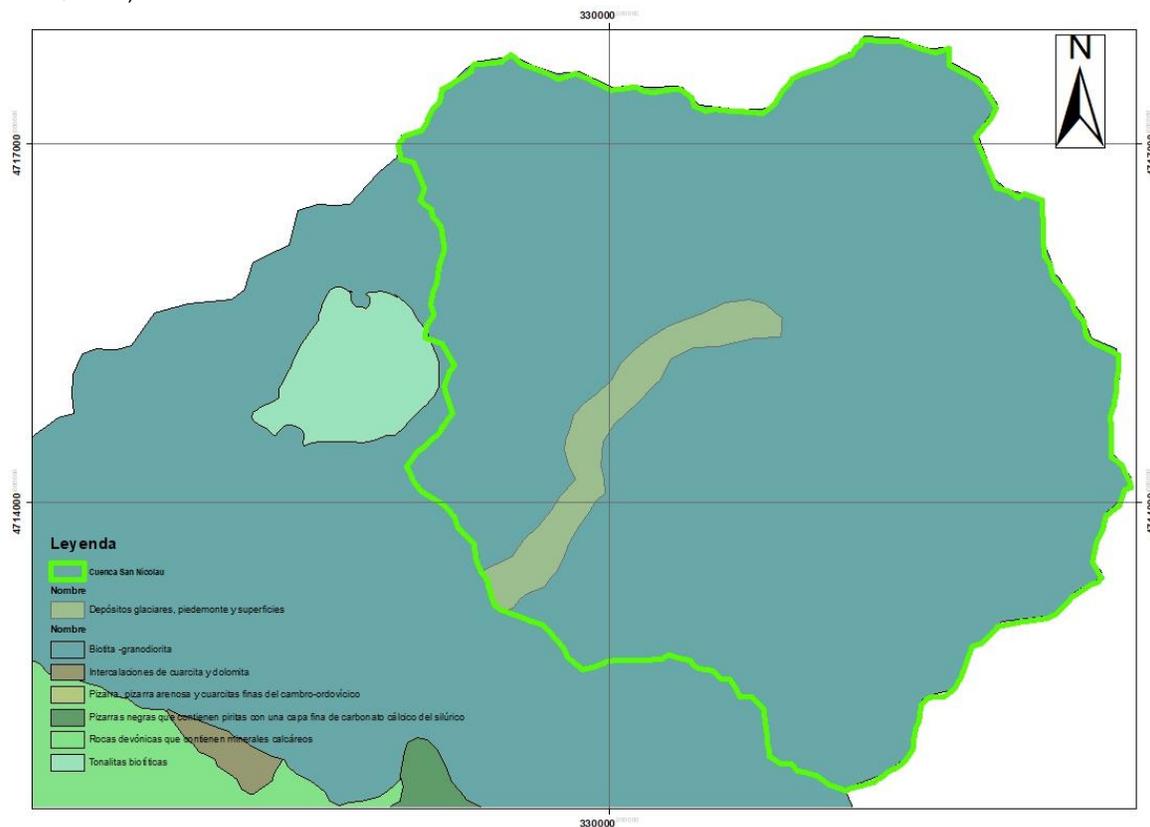


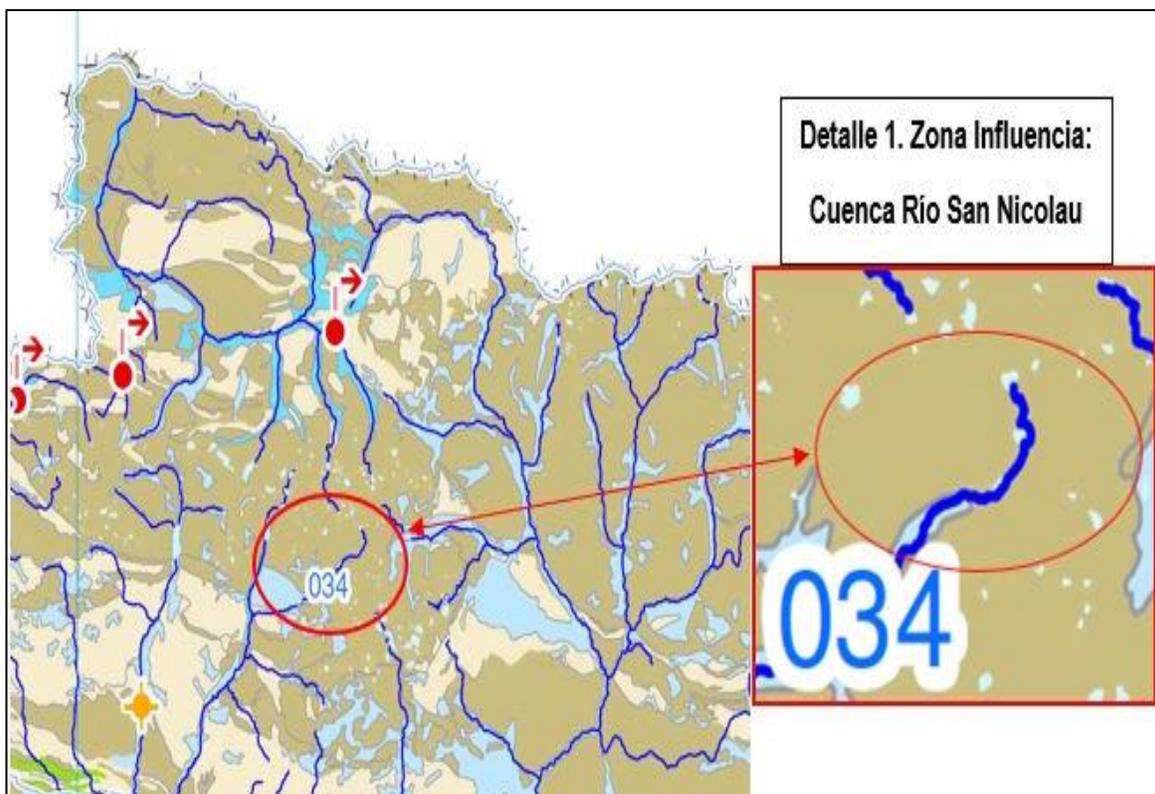
Figura 32. Litología de la zona de estudio. Fuente: adaptado (CSIC, 2018)

3.8 Hidrogeología

Las formaciones hidrogeológicas en la zona de la cuenca del río San Nicolau se ven condicionadas por las formaciones litológicas presentes, es decir, debido a la existencia de una formación rocosa que predomina en toda el área (biotita granodiorita), la zona es catalogada como una impermeable o de muy baja permeabilidad, tal y como se refleja en el mapa hidrogeológico de la zona de estudio en escala 1:200.000 (IGME, 2009).

De igual modo, se refleja la presencia de una formación un poco más permeable en la zona central de la cuenca, justo en la formación del valle de ribera del río San Nicolau con la presencia de formaciones detríticas y cuaternarias.

Lo dicho anteriormente se observa en la **Figura 33**, que ha sido una adaptación del mapa hidrogeológico nacional a escala 1:200.000 con detalle para la zona de interés en el presente estudio.



Leyenda

- Ia. Formaciones carbonatadas de permeabilidad alta o muy alta.
- Ib. Formaciones carbonatadas y volcánicas de permeabilidad media.
- IIa. Formaciones detríticas y cuaternarias de permeabilidad alta o muy alta, así como formaciones volcánicas de permeabilidad muy alta.
- IIb. Formaciones detríticas y cuaternarias de permeabilidad media. Formaciones volcánicas de alta permeabilidad.
- IIIa. Formaciones metadetríticas de alta permeabilidad. Formaciones detríticas, volcánicas, carbonatadas y cuaternarias de permeabilidad baja.
- IIIb. Formaciones generalmente impermeables o de muy baja permeabilidad y formaciones metadetríticas, ígneas y evaporíticas de permeabilidades baja y media.

Figura 33. Mapa Hidrogeológico de la zona de estudio. Fuente: adaptado IGME (2009)

4 EXTRAPOLACIÓN DE MAPAS DE PARÁMETROS

4.1 Mapas derivados del DEM

4.1.1 Mapa de Pendientes

El mapa de pendientes para la zona de estudio se muestra en la **Figura 34**, allí se observa que las pendientes se muestran en m/m, siendo la pendiente mínima 0 y la máxima 2.59. El valor medio de las pendientes en la cuenca del río San Nicolau es de 0.56 m/m tal y como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Principales Estadísticos del mapa de pendientes de la zona de estudio.

Pendiente Mínima (m/m)	Pendiente Máxima (m/m)	Pendiente Media (m/m)	STD
0	2.59	0.56	0.303

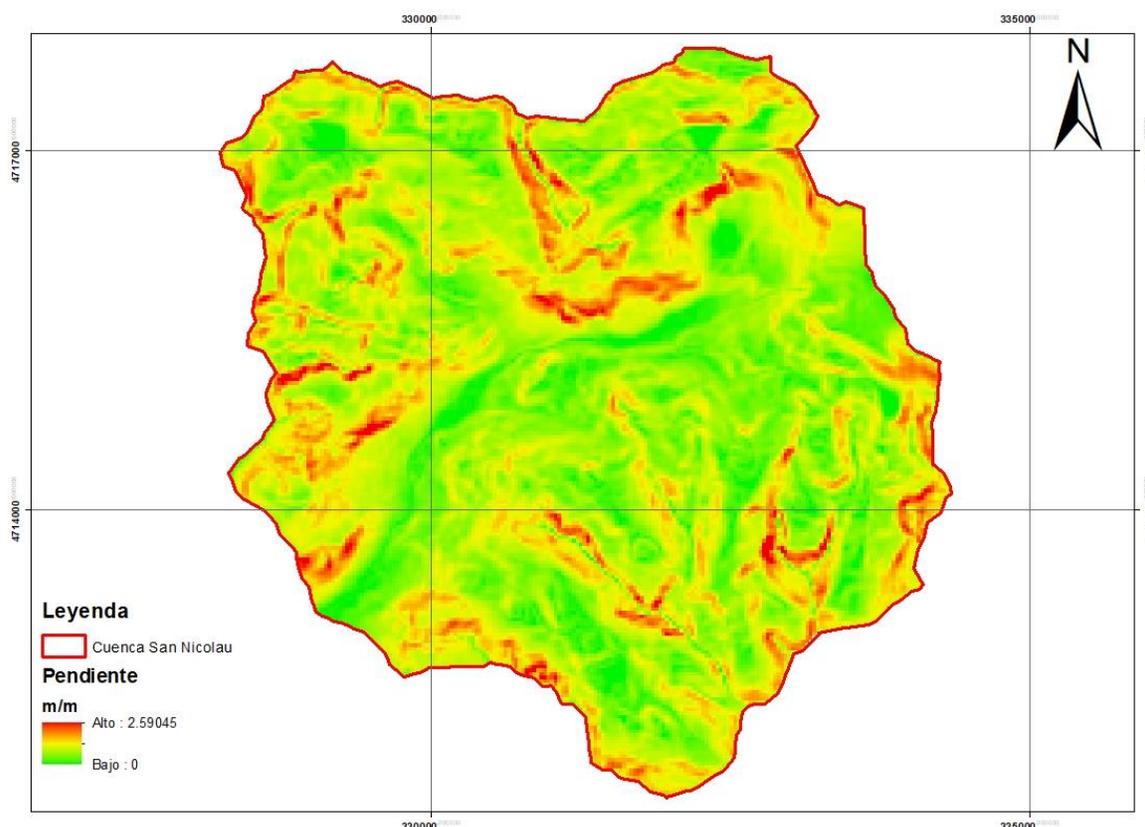


Figura 34. Mapa de pendientes de la cuenca del Río San Nicolau.

4.1.2 Mapa de Velocidades

A partir del mapa de pendientes se determina el mapa de velocidades del flujo en ladera, calculada a partir de la ecuación mostrada a continuación.

$$v = 1.414 * S_o^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde,

V: velocidad del flujo en ladera en m/s

So: pendiente en m/m

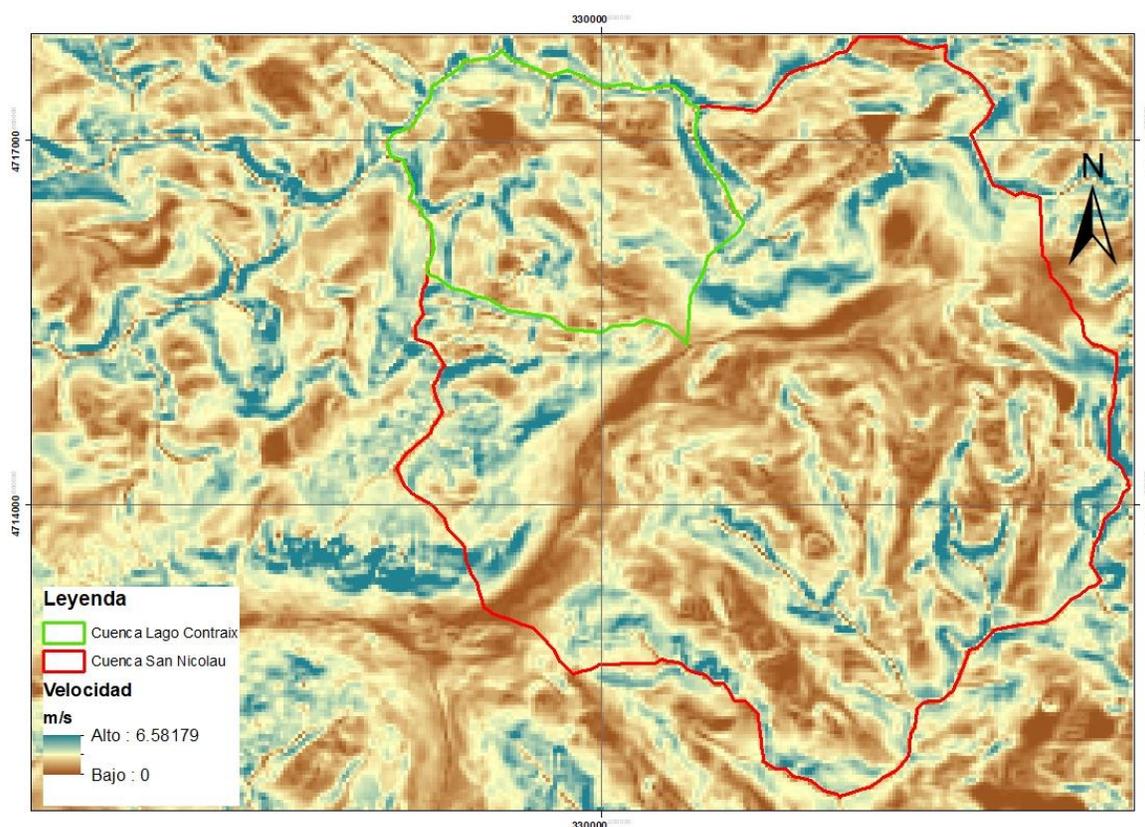


Figura 35. Mapa de velocidades de la cuenca del Río San Nicolau.

4.1.3 Mapa de celdas drenantes acumuladas y direcciones de flujo

A partir del DEM, surgen entre otros el mapa de direcciones de flujo y el mapa de celdas drenantes acumuladas, que representa la forma en como el flujo fluye por la ladera y posterior a ello como se acumula el flujo proveniente de celdas aguas arriba en una celda específica aguas abajo. La utilidad de estos mapas radica principalmente en que permiten delimitar cual es el área aferente de la cuenca de estudio, así como también la red de cauces que fluye en ella. En la **Figura 36** y **Figura 37** se muestran los mapas de direcciones de flujo y celdas drenantes acumuladas para la cuenca del río San Nicolau (rojo) y sub cuenca del lago Contraix (verde).

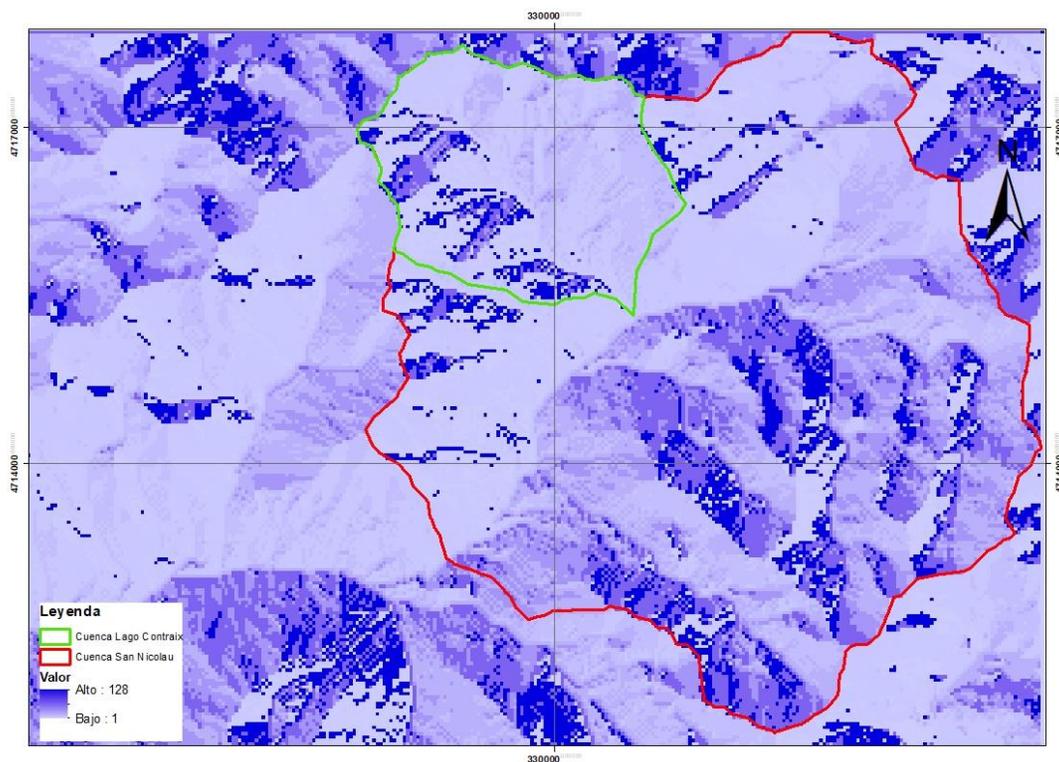


Figura 36. Mapa de direcciones de flujo de la cuenca del Río San Nicolau.

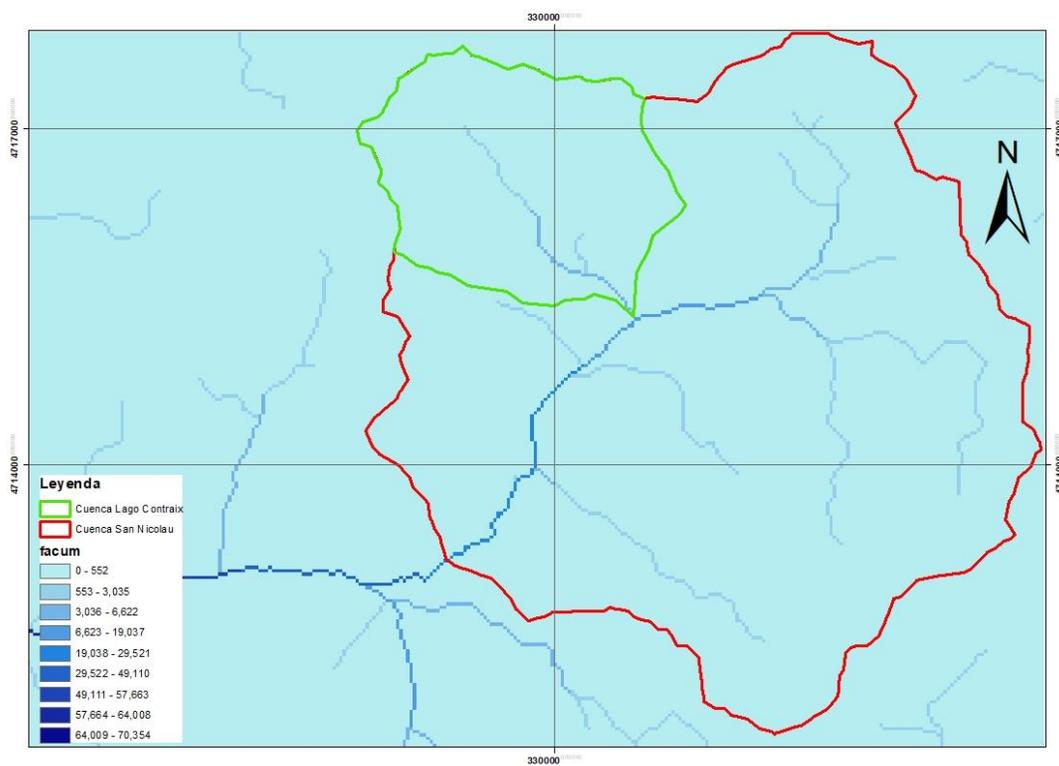


Figura 37. Mapa de celdas drenantes acumuladas de la cuenca del Río San Nicolau.

4.2 Factor de cultivo o vegetación (λ_v)

Con el objetivo de evaluar la variabilidad de la ETP en el ciclo anual debida al cambio en las fases de crecimiento de la vegetación, también conocido como ciclo vegetativo, se hace necesario recurrir a adoptar un índice asociado a la cobertura vegetal y que afecte la ETP y la intercepción por vegetación clasificándolas en perennes, semi - caducifolias y caducifolias (Orozco Medina, 2011).

Para ello, en TETIS se opta por aplicar la metodología que describe la FAO en su paper N°56 en donde se integra a través del coeficiente de cultivo, la variabilidad mencionada. Esta metodología consiste en la adopción y posterior construcción de una curva con base en 4 etapas de crecimiento 3 valores distintos de este coeficiente al comienzo, al medio y al final de cada una de estas etapas (Pacheco Rios, 2017).

Finalmente, para su determinación se correlaciona el mapa de ocupación de suelos y los valores empleados en Múnera & Francés, (2008) mostrados en la **Figura 38**, tal y como se implementó en ACOPLA (Orozco Medina, 2011).

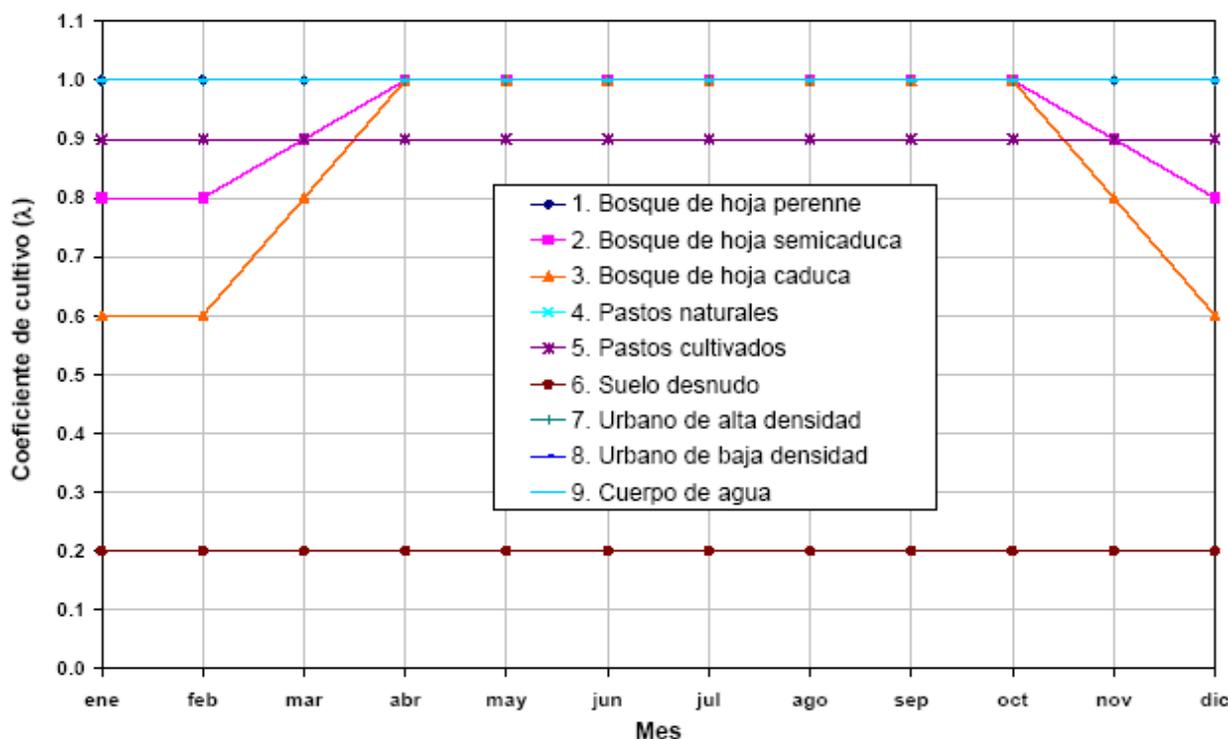


Figura 38. Distribución temporal del índice de cobertura vegetal usado en la cuenca de los ríos Saja-Besaya. Fuente: (Múnera & Francés, 2008).

Es necesario mencionar que como las categorías de vegetación de la cuenca de Contraix son válidas en su totalidad para la cuenca de San Nicolau, se emplean las mismas curvas con los factores de vegetación para la modelación de la segunda

4.3 Parámetros Espaciales

Los parámetros que representan la variabilidad espacial en TETIS como lo son el almacenamiento capilar del suelo (Hu), la capacidad de infiltración (Ks) y la capacidad de percolación/permeabilidad del acuífero (Kp) se estimaron y se generaron a partir de los mapas existentes en el proyecto ACOPLA utilizados por Orozco Medina, 2011.

A partir de esta información, se realizó la extrapolación a la zona restante de la cuenca del río San Nicolau que faltaba por cubrir, partiendo primero por validar los mapas de parámetros previamente establecidos para Contraix.

Este proceso de validación, consistió en búsqueda bibliográfica y de antecedentes provenientes tanto del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para los mapas de litologías, estratigrafías, permeabilidades cualitativas, entre otros; pero también, de consultar en la base de datos de la European Soil Data Base (ESDB) la información referente a la edafología de los suelos (ESDAC, 2019). Encontrándose que en general los mapas establecidos previamente tendían a seguir la distribución espacial del mapa de coberturas y ocupación del suelo, por lo que con esto bastó para realizar la extrapolación a la parte de la cuenca restante siguiendo la información de coberturas de CORINE (European Environment Agency, 2006).

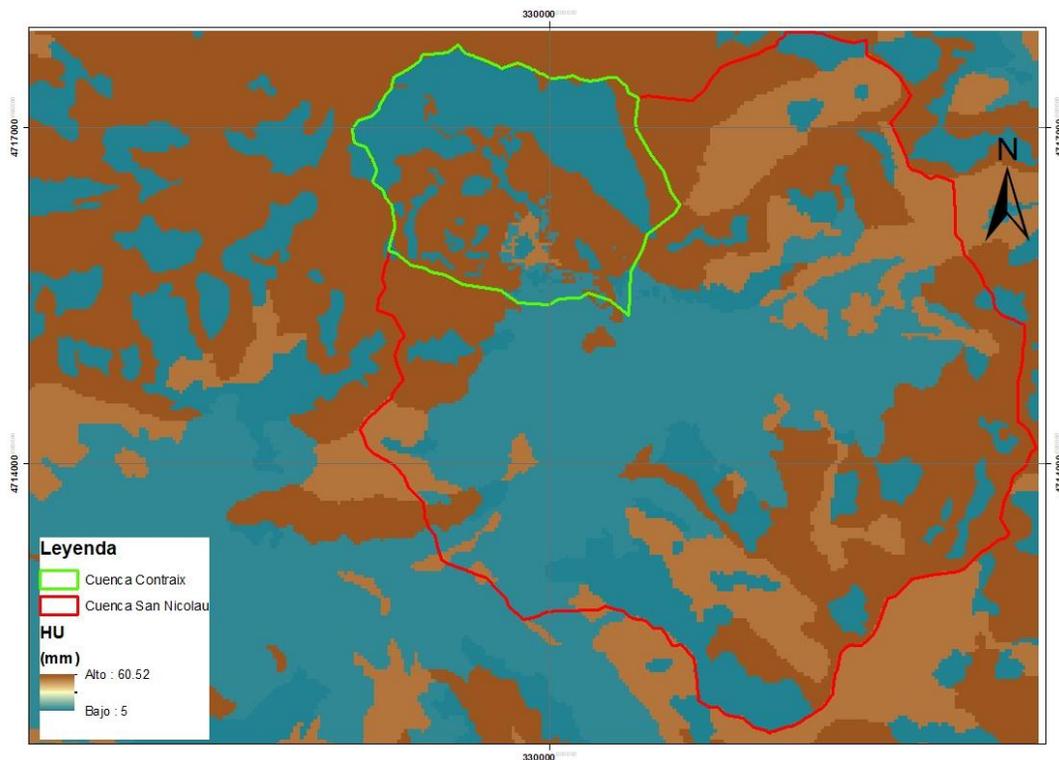


Figura 39. Mapa de almacenamiento capilar del suelo en la cuenca San Nicolau.

En la **Figura 39**, la **Figura 40** y la **Figura 41** se presentan los mapas de almacenamiento estático del suelo, capacidad de infiltración y capacidad de percolación o permeabilidad del acuífero respectivamente, para la cuenca de estudio.

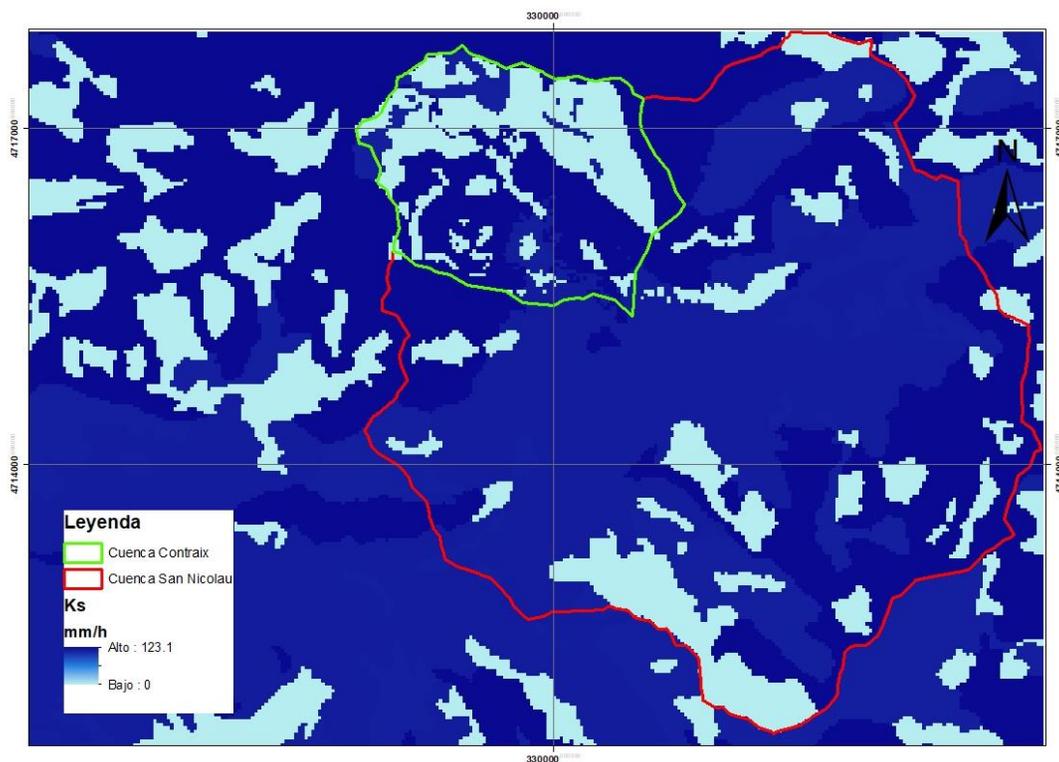


Figura 40. Mapa de capacidades de infiltración de la cuenca San Nicolau.

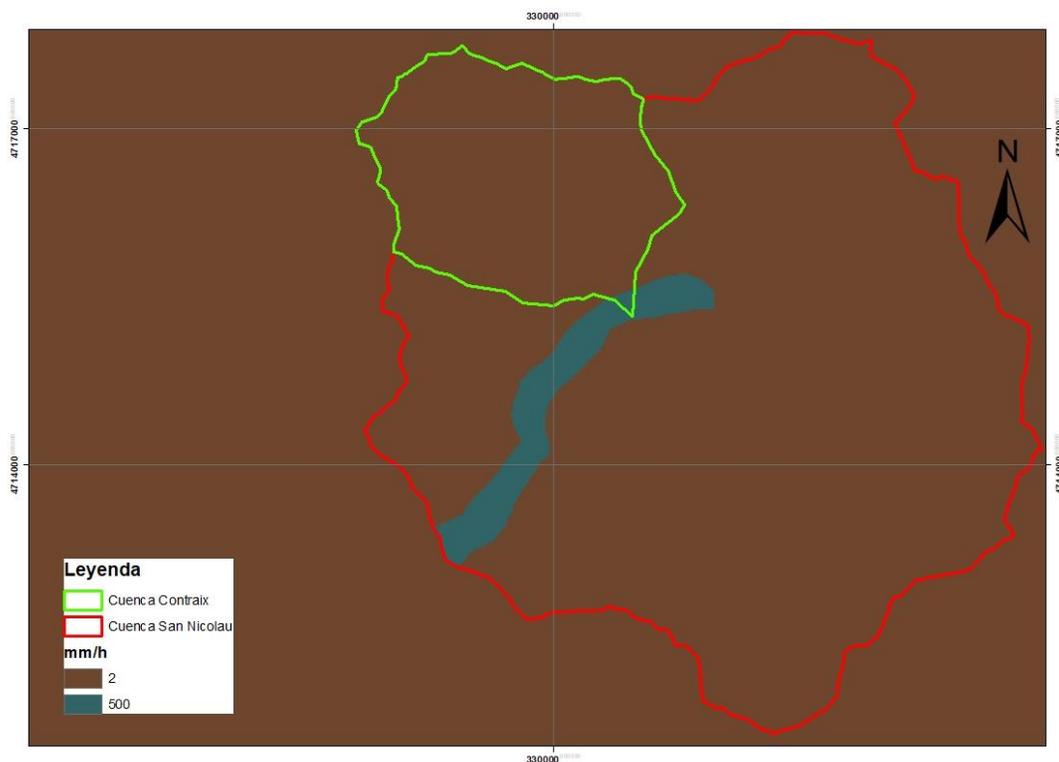


Figura 41. Mapa de capacidad de percolación/permeabilidad de acuífero de la cuenca San Nicolau.

5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Como se ha introducido, la modelación hidrológica de tipo distribuida para el presente estudio se realizará con la finalidad de determinar el hidrograma de caudales en la cuenca del río San Nicolau, más exactamente en la estación de aforo AT07, como se puede observar en la **Figura 42**. Esto a partir de la implementación del modelo hidrológico en la cuenca del Lago Contraix y su posterior validación espacial en el punto AT07 sobre el río San Nicolau.

El modelo se realizará para dos escalas temporales diferentes, la primera de ellas con pasos de tiempo cada 30 minutos, porque el objetivo es tratar de encontrar las posibles causas de la contradicción entre los resultados de ACOPLA y los resultados de ISOTOPOS en términos del interflujo y flujo base. La segunda a escala diaria, ya que como se ha comentado previamente, uno de los objetivos fundamentales es la modelación del cambio climático bajo los escenarios de proyección del IPCC en la cuenca, y esta información viene dada en resolución temporal diaria a través de la página web de AEMET.

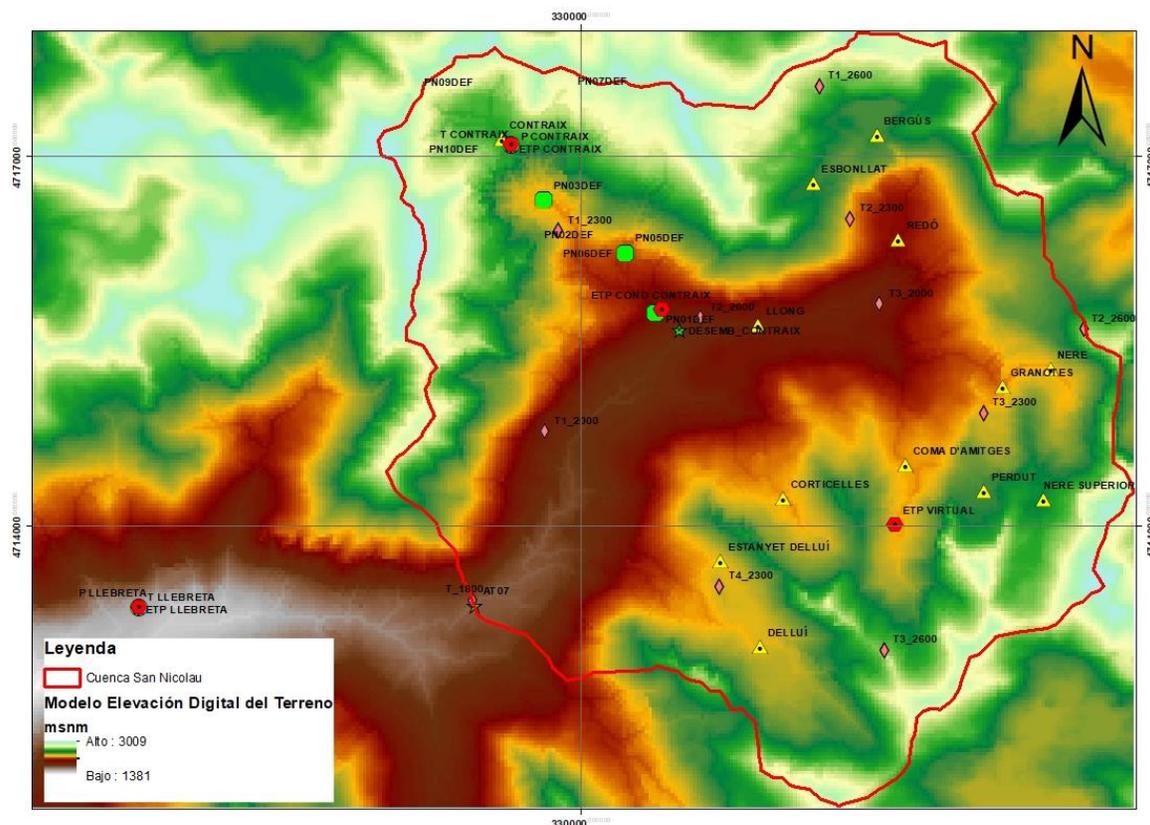


Figura 42. Mapa de estaciones hidrometeorológicas de la cuenca del río San Nicolau.

Una vez se han realizado los pasos previos para correr el modelo hidrológico, se procede a ejecutar o correr el modelo bajo esas condiciones definidas, ajustando y calibrando los factores correctores que afectan los parámetros descriptores de la cuenca.

Posterior a ello, el modelo se debe validar temporalmente, con el fin de asegurar y corroborar que los valores de esos parámetros son invariantes en el tiempo y por tanto describen bien las características de la zona. Lo

segundo, sería realizar una validación espacio-temporal, con el fin de determinar si el modelo puede ser extrapolable o no a otras cuencas con características y condiciones similares a la que se estudia inicialmente.

Por lo general, el proceso de validación espacio-temporal es habitual que se realice en varios puntos de la misma cuenca en donde se aplica el modelo, porque es probable que, al estar contenidos en ella, la representen de una manera conveniente.

Sin embargo, para que un modelo sea extrapolable incluso de una subcuenca que hace parte de una cuenca específica a esa misma cuenca (como será en el caso de este trabajo), se tienen que tener en cuenta muchos factores, no sólo de tipo hidrológicos, sino también geomorfológicos y de otros procesos como lo es la modelación del proceso de fusión y acumulación de nieve, la modelación de lagos y/o embalses, etc.

5.1 Cuenca Lago Contraix

En este punto, es importante resaltar que traer el modelo implementado en ACOPLA a la versión más reciente de TETIS no fue posible, a pesar de que se trabajó con la misma información de partida y se tuvieron en cuenta las mismas hipótesis. Esto a lo mejor se puede explicar porque junto con el cambio de versión se introdujeron cambios importantes en el código fuente de TETIS escrito en lenguaje de programación FORTRAN, como por ejemplo el separar el tanque de almacenamiento capilar en dos, uno de intercepción relacionado con las abstracciones iniciales de la cobertura vegetal del suelo y el otro, como el almacenamiento estático. Lo que hace que los factores correctores encontrados en el modelo de ACOPLA deban volverse a calibrar para ajustar esos pequeños cambios.

La modelación de la cuenca del lago Contraix con un área aferente de 4.56 km² en la nueva versión de TETIS se realizó a partir de la información disponible del proyecto ACOPLA, esto significa que se conservan los mapas de parámetros, las mismas hipótesis y en general se trabaja con toda la información disponible que el modelo implementado previamente, salvo en el caso de la ETP; que como se describió anteriormente se calcula por el método de Hargreaves a partir de información de temperaturas mínimas, máximas y medias y de información de radiación. Este cambio supone una mejora sustancial, ya que el anterior modelo trabaja con información de ETP mensual calculada por el método Penman-Monteith de la FAO.

Adicional a ello, en vez de trabajar con una única estación de ETP, se trabajará con la de Llebreta y una adicional que se ha denominado como Cono Contraix, ubicada antes de la desembocadura en la estación CISCO1, como se observa en la **Figura 42**. En la **Figura 24** se presenta la nueva serie de ETP obtenida para la implementación del modelo en condiciones actuales de TETIS.

Otro de los cambios realizado en el modelo actual es la traslación de la estación de precipitación de Contraix del punto de desembocadura en CISCO1 a su ubicación real en el punto del lago Contraix a 2586 msnm. La ubicación de esta estación influye en la cantidad de precipitación modelada porque si se ubica en el punto más bajo y si además se le aplica un factor de corrección de incremento con la altitud como es el caso en ACOPLA, lloverá más y por ende los volúmenes y salidas serán más altos.

La decisión de corregir la ubicación de la estación de precipitación se fundamenta en que si se quiere trasladar una estación de un punto A a otro punto B deben ser corregidos los valores de la variable, y no simplemente ser llevados a B tan sólo cambiando las coordenadas del punto.

5.1.1 Calibración

La calibración del modelo hidrológico de la cuenca del lago Contraix se realizó de forma semiautomática, es decir, una parte consistió en calibración manual retocando los factores correctores de los parámetros hidrológicos a juicio del experto, con el fin de tratar de encontrar la incongruencia existente con el proyecto ISOTOPOS en cuanto a las aportaciones del flujo base. La otra parte, consistió en la aplicación del método de calibración automática en TETIS con ayuda del algoritmo de optimización SCEUA, con el fin de ajustar de forma adecuada los parámetros que describen la cuenca evitando caer en resultados óptimos locales, sino más bien encontrando el óptimo global.

Los factores correctores de los parámetros que caracterizan la cuenca que se obtuvieron en la calibración del modelo de Contraix, se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Factores Correctores en TETIS de la modelación hidrológica de la cuenca del Lago Contraix.

FC's	Valor
Almacenamiento estático	1.049
Evapotranspiración	0.198
Infiltración	19.645
Escorrentía directa	1.211
Percolación	0.939
Interflujo	46.838
Pérdidas subterráneas	0.00
Flujo base	171.954
Velocidad del cauce	0.2468
Beta	0.0001
Factor de fusión sin lluvia	3.38
Factor de fusión con lluvia	3.53
Temperatura base	-2.74

- Hidrograma de Caudales

En la **Figura 43**, se presentan los resultados obtenidos de la modelación hidrológica para la cuenca del Lago Contraix, observándose caudal observado versus caudal simulado y la información de las precipitaciones tanto en componente líquida (lluvia) como sólida (nieve).

Con respecto a los resultados obtenidos se puede decir que en general son buenos, se están representando de manera acertada los valores máximos, aunque son subestimados casi todos. La tendencia que siguen los caudales observados es seguida por los simulados adecuadamente. Del 10/06/2011 al 03/07/2011 se observa que existe en general una infravaloración de los caudales simulados, esto puede deberse en parte a que la cantidad de lluvia simulada por el modelo en ese periodo de tiempo no es lo suficientemente alta como para provocar un incremento de ese tipo.

- Flujos y salidas simulados por TETIS

En cuanto a los flujos y salidas simulados por TETIS para la cuenca del Lago Contraix que se muestran en la **Figura 44**, se deduce que en la cuenca es bastante importante las aportaciones provenientes de la fusión de nieve en especial en los meses de primavera. En cuanto a la escorrentía directa, se observa que esta tiende a tener una respuesta rápida en los meses en donde hay presencia de precipitación en forma de lluvia principalmente, porque como se observa en los meses de otoño, invierno la precipitación tiende a ser en forma de nieve, lo que hace que de algún modo se dificulte la formación de escorrentía.

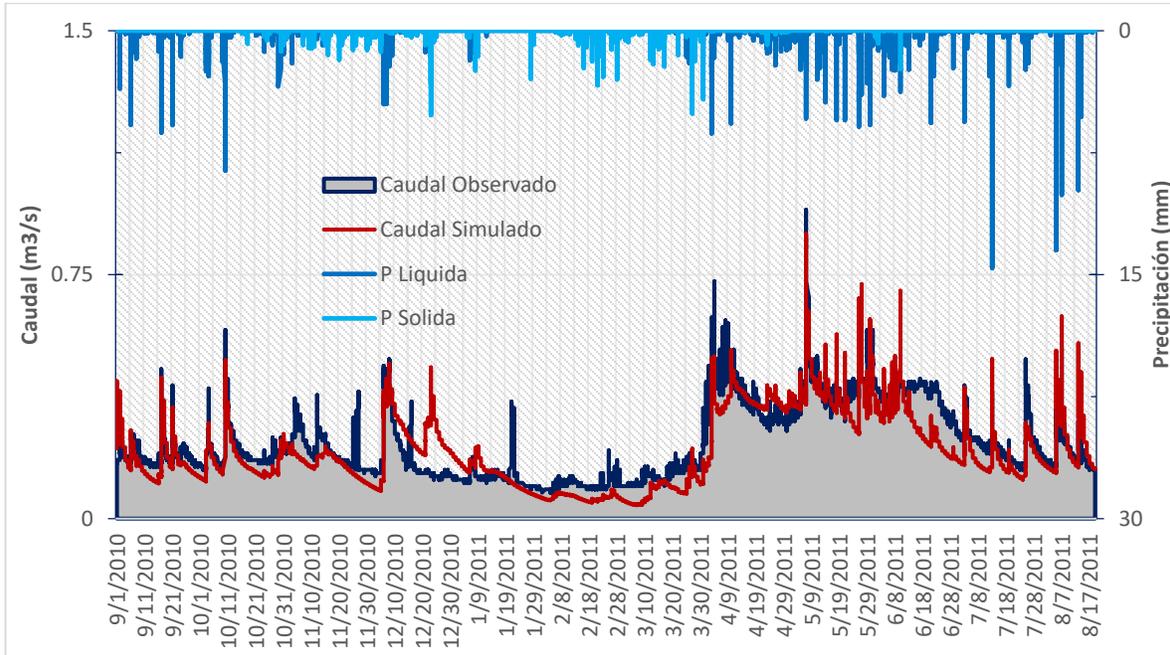


Figura 43. Hidrograma de caudales 2010-2011 de la cuenca del Lago Contraix.

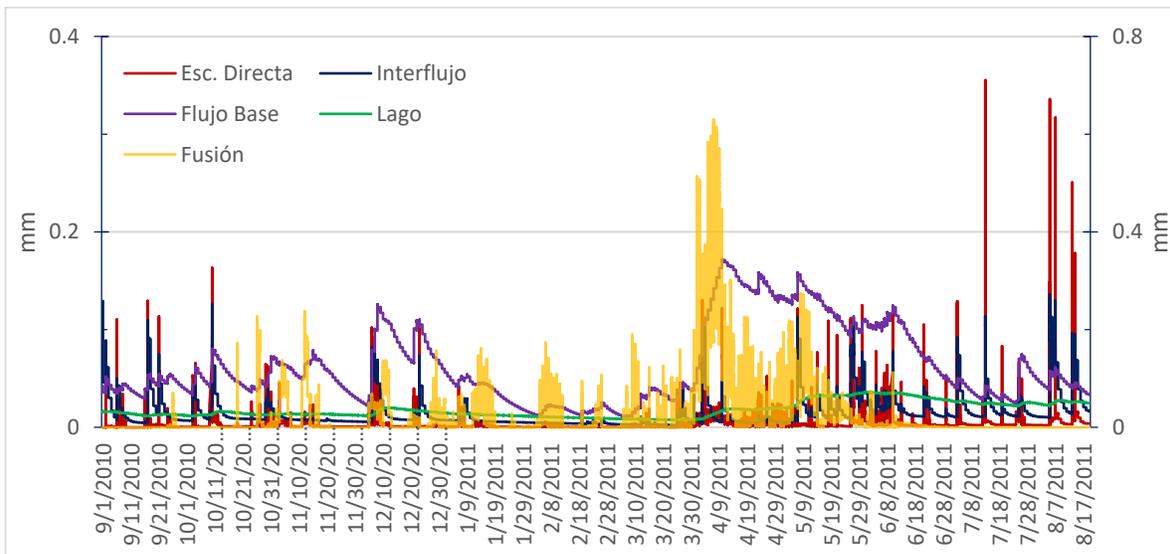


Figura 44. Flujos y salidas simulados por TETIS en calibración para periodo 2010-2011 de la cuenca del Lago Contraix.

La aportación del lago Contraix en este caso tiende a tener un comportamiento muy estable a lo largo del año, salvo en los meses donde comienza el deshielo y empiezan a aumentar las descargas del mismo, gracias en parte a las aportaciones por fusión que recibe de su cuenca aferente y al derretimiento del cuerpo de agua como tal.

En términos de salidas por flujo subsuperficial o interflujo, su comportamiento tiende a parecerse bastante al de la escorrentía directa en cuanto a la formación de valores máximos, aunque con una marcada respuesta más lenta una vez se presenta el pico tal y como se ve en la **Figura 44**.

Finalmente, remontándose nuevamente a la **Figura 44**, el flujo base es la componente que tiende a predominar a lo largo del año con la mayor aportación de caudal en la salida de la estación CISCO1. Se ve que en los meses finales de otoño y en los meses de invierno es la componente que mantiene el caudal que fluye por la desembocadura. En primavera cuando se han presentado los procesos de fusión de nieve y se ha recargado el acuífero gracias a esa agua adicional, el caudal aportado al río aumenta de la misma forma. Esta condición sumada a lo demás que se ha dicho con respecto a los flujos de salida, ratifican que en esta cuenca los procesos de acumulación y fusión de nieve son los que influyen en el aumento y en el decremento de las aportaciones de caudal en CISCO1; eso por lo menos para el periodo de calibración.

- Estadísticos

Los estadísticos de la calibración del nuevo modelo hidrológico de la cuenca del Lago Contraix se presenta en la Tabla 12. El índice de eficiencia NSE fue de 0.6678, considerándose como un indicador bueno de la reproducción de caudales respecto a los observados.

Tabla 12. Estadísticos obtenidos en calibración del modelo.

Estadísticos calibración	
Caudal máximo observado (m ³ /s)	0.950
Caudal máximo simulado (m ³ /s)	0.749
RMSE	0.066
Tiempo al pico observado	5972.50
Tiempo al pico simulado	5973.50
Volumen observado (Hm ³)	7.086
Volumen simulado (Hm ³)	6.353
Error en volumen (%)	-8.967
NSE	0.6678

- Balance Hidrológico

El balance hidrológico resultado de la calibración del modelo en el punto de aforo CISCO1 en la desembocadura de la cuenca se presenta en la Tabla 13.

Tabla 13. Balance Hidrológico de la cuenca del Lago Contraix.

Balance hidrológico calibración	
Precipitación observada (mm)	1494.320
Precipitación simulada (mm)	1483.042
ETP (mm)	628.376

ETR (mm)	81.119
Descarga observada (mm)	1479.588
Descarga simulada (mm)	1390.735
Escorrentía directa (mm)	62.215
Interflujo (mm)	290.485
Flujo base (mm)	1039.619
Pérdidas (mm)	0.00
Alm. en el sistema (mm)	121.197
Error (%)	-0.109

En términos de balance hidrológico, los resultados obtenidos para el punto de desagüe CISCO1, muestran que el interflujo es de 290.485 mm, resultando menor que el flujo base con una aportación de 1039.619 mm. Así mismo, la escorrentía directa es de 62.215 mm y la ETR es de 81.119 mm que equivale a un 13% de la ETP.

5.1.2 Validación Temporal

La validación temporal del modelo de la cuenca del Lago Contraix se realizó para el periodo comprendido entre el 1/11/2009 al 16/08/2010, utilizando la información de la estación hidrometeorológica de Llebreta para la serie de precipitaciones, debido a que la estación Contraix no contaba con información para este periodo temporal.

- Hidrograma de Caudales

En la **Figura 45** se presentan los resultados para la serie de caudales simulados versus los observados, que de acuerdo con los estadísticos que se muestran en la Tabla 14 resulta un índice de eficiencia de Nash – Sutcliffe de 0.4931, que aun así se puede considerar como bueno a pesar de la alta incertidumbre en la información de los input, ya que como se comentó no se cuenta con información real de la estación ubicada en inmediaciones del Lago Contraix.

Tabla 14. Estadísticos obtenidos en validación temporal del modelo.

Estadísticos calibración	
Caudal máximo observado (m ³ /s)	6.18
Caudal máximo simulado (m ³ /s)	8.456
RMSE	0.289
Tiempo al pico observado	5308.5
Tiempo al pico simulado	6330.5
Volumen observado (Hm ³)	8.486
Volumen simulado (Hm ³)	7.655
Error en volumen (%)	-9.801
NSE	0.4931

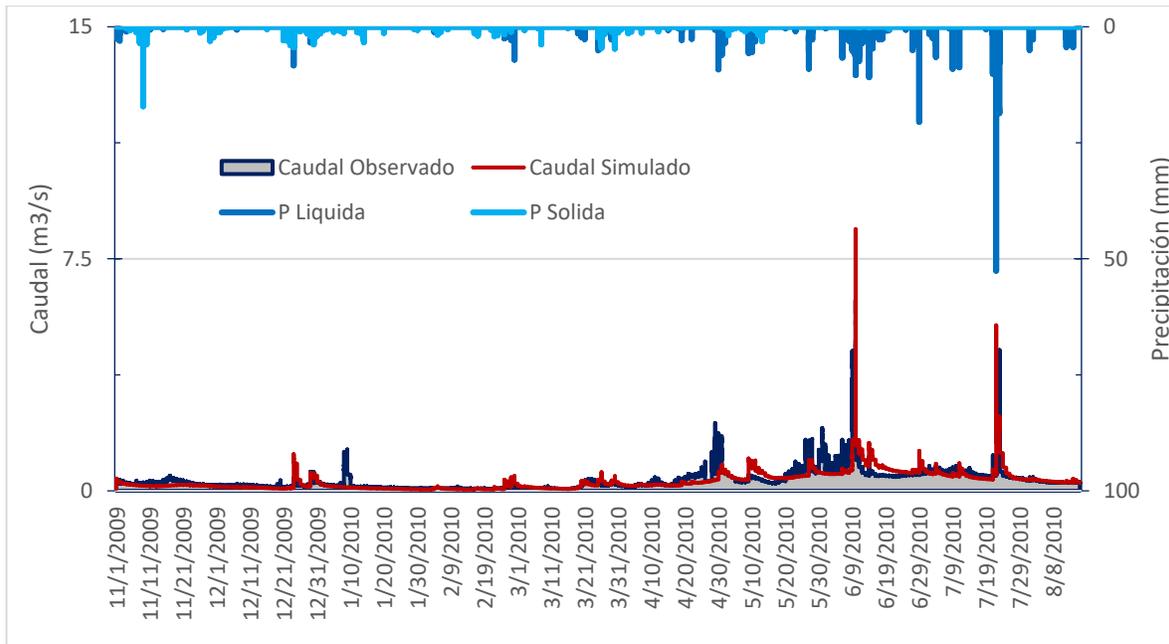


Figura 45. Hidrograma de caudales en validación temporal de la cuenca del Lago Contraix.

El balance hidrológico resultado de la calibración del modelo en el punto de aforo CISCO1 en la desembocadura de la cuenca se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15. Balance Hidrológico de la cuenca del Lago Contraix en Validación Temporal.

Balance hidrológico calibración	
Precipitación observada (mm)	1796.250
Precipitación simulada (mm)	1860.108
ETP (mm)	487.290
ETR (mm)	96.239
Descarga observada (mm)	1689.995
Descarga simulada (mm)	1704.517
Escorrentía directa (mm)	73.750
Interflujo (mm)	538.988
Flujo base (mm)	1093.113
Pérdidas (mm)	0.00
Alm. en el sistema (mm)	166.693
Error (%)	-0.0739

En términos de balance hidrológico, los resultados obtenidos para el punto de desagüe en CISCO1, muestran que el interflujo es de 538.988 mm, resultando menor que el flujo base con una aportación de 1093.113 mm. Así mismo, la escorrentía directa es de 73.750 mm y la ETR es de 96.239 mm que equivale a un 19.7% de la ETP.

5.1.3 Validación Espacio-Temporal

De igual modo, se realizó validación espacio-temporal en la estación de aforo ATC2 como se puede ver en la **Figura 14**, para el periodo comprendido entre el 12/16/2009 al 08/12/2010, cuya área aferente corresponde a 3.23 km².

- Hidrograma de Caudales

En la **Figura 46** se presentan los resultados para la serie de caudales simulados versus los observados, de lo que se puede decir que es una simulación acorde pero que aún así falta mejorar. Los picos se están representando más o menos bien, y en general tiende a seguir el comportamiento de respuesta acorde con las precipitaciones que se observan.

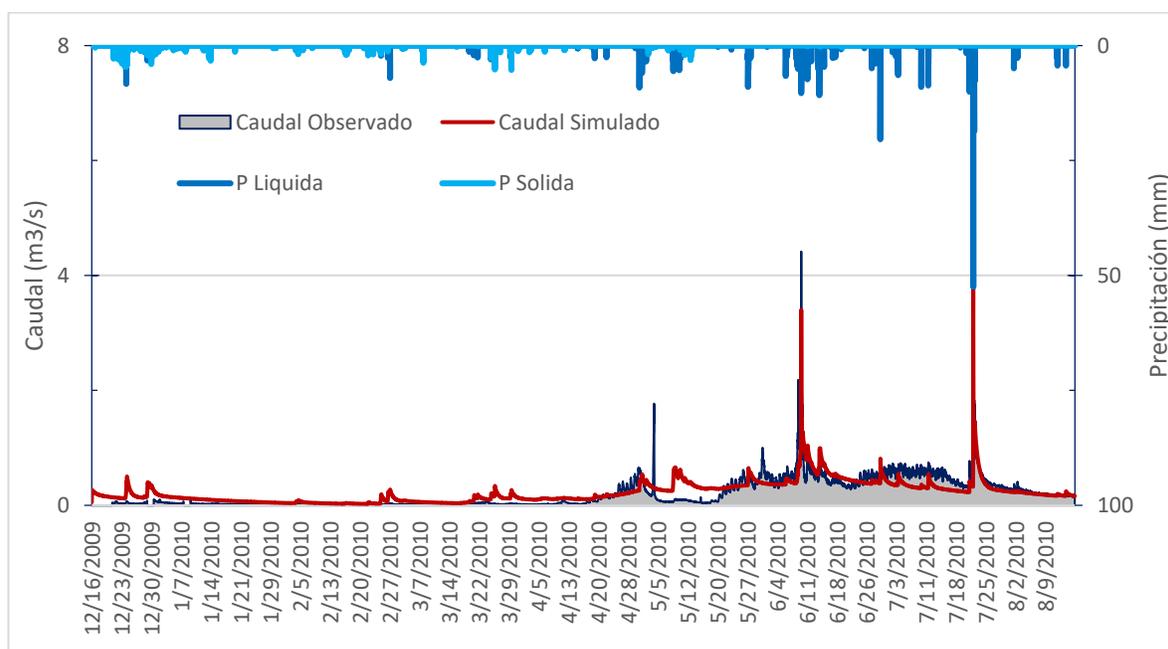


Figura 46. Hidrograma de caudales en validación espacio-temporal de la cuenca del Lago Contraix.

Los estadísticos de la validación espacio-temporal del nuevo modelo hidrológico de la cuenca del Lago Contraix se presenta en la Tabla 16. El índice de eficiencia NSE fue de 0.4643, considerándose como indicador bueno a pesar de la alta incertidumbre en la información de entrada.

Tabla 16. Estadísticos obtenidos en validación espacio-temporal del modelo.

Estadísticos calibración	
Caudal máximo observado (m3/s)	4.410
Caudal máximo simulado (m3/s)	8.724
RMSE	0.1856
Tiempo al pico observado	4226.5
Tiempo al pico simulado	5250.5
Volumen observado (Hm3)	4.173
Volumen simulado (Hm3)	4.811

Error en volumen (%)	15.451
NSE	0.4643

El balance hidrológico resultado de la calibración del modelo en el punto de aforo ATC2 en la desembocadura de la cuenca se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17. Balance Hidrológico de la cuenca del Lago Contraix en Validación.

Balance hidrológico calibración	
Precipitación observada (mm)	1611.950
Precipitación simulada (mm)	1622.045
ETP (mm)	444.390
ETR (mm)	54.9801
Descarga observada (mm)	1065.574
Descarga simulada (mm)	1489.564
Escorrentía directa (mm)	84.991
Interflujo (mm)	481.455
Flujo base (mm)	922.681
Pérdidas (mm)	0.00
Alm. en el sistema (mm)	168.651
Error (%)	0.0152

En cuanto al balance hidrológico, los resultados obtenidos para el punto de desagüe en ATC2, muestran que el interflujo es de 481.455 mm, resultando menor que el flujo base con una aportación de 922.681 mm. Así mismo, la escorrentía directa es de 84.991 mm y la ETR es de 54.980 mm que equivale a un 12.4% de la ETP.

Como se había mencionado, el objetivo de la validación espacial y temporal es determinar si el modelo puede llegar a ser extrapolable o no; de acuerdo con esto, los resultados que se obtuvieron en la validación tienen que ser mirados y tratados con precaución, esto debido a la alta incertidumbre de la información de entrada y a partir de la cual se produjeron los resultados, y que a pesar de ello se están teniendo eficiencias que se consideran buenas.

Es necesario recomendar que una vez se tenga nueva información y de mejor calidad, se puedan corroborar los resultados que se han obtenido.

5.2 Cuenca Río San Nicolau

La idea inicial para la obtención de caudales en el punto de aforo AT07 en la cuenca del río San Nicolau era la de realizar una extrapolación del modelo de la cuenca del Lago Contraix, para posterior a ello realizar la modelación del cambio climático en la zona de estudio. Debido a que la escala temporal del modelo hidrológico en Contraix era subdiario (30 minutos) y la información de los modelos climáticos regionales disponibles en AEMET se presenta en escala diaria, se decidió realizar una nueva calibración en el punto

AT07 que permitiera asimismo corregir los posibles errores que se presentan si se trabaja en dos escalas de tiempo diferentes; para posterior a ello realizar una validación cruzada desde San Nicolau en el punto de aforo CISCO1 ubicado en la desembocadura de la cuenca del lago Contraix.

En este caso en particular, la calibración del modelo se realizó en el periodo comprendido entre 01/09/2013 AL 31/08/2014 con un periodo de calentamiento del modelo para la obtención de los estados de los almacenamientos iniciales comprendido entre el 01/03/2013 al 31/08/2013. En validación temporal, se realizó para el periodo comprendido entre el 01/09/2010 al 31/08/2011 y calibración automática para los valores iniciales de los almacenamientos. La validación espacio-temporal se realizó para este mismo periodo 2010-2011 y para el punto de aforo CISCO1, y también se realizó calibración automática de los estados iniciales.

En la cuenca del río San Nicolau, en total se realizaron dos modelos con composiciones diferentes. En el primero de ellos se empleó sólo la información disponible para las series de precipitación y temperatura de las estaciones de Llebreta y Contraix. Para el segundo, además de la información de partida se ubicaron 11 estaciones “ficticias” o virtuales de temperatura con el fin de captar de una mejor forma el gradiente térmico para el proceso de modelación de la acumulación y fusión de nieve, que es el proceso que en parte domina y determina el comportamiento de la cuenca. Esta decisión de implementar dos modelos diferentes en lugar de uno, se explicará más adelante a medida que se presenten los resultados.

5.2.1 Modelo Hidrológico con 2 estaciones de Temperatura

5.2.1.1 Calibración

La calibración del modelo hidrológico de la cuenca del río San Nicolau al igual que en Contraix se realizó de forma semiautomática, es decir, una primera aproximación mediante calibración manual retocando los factores correctores de los parámetros hidrológicos a criterio del experto; y luego se realizó la calibración automática con el complemento del logaritmo de optimización SCEUA, con el fin de ajustar de forma más precisa los factores que multiplica los parámetros, dando como resultado los efectivos para los que el modelo reproduce mejor la realidad del sistema.

En cuanto al estado de los almacenamientos iniciales, como se había comentado se realiza un periodo de calentamiento del modelo comprendido entre el 01/03/2013 al 31/08/2013; de modo que en este punto los almacenamientos reflejen el comportamiento del día antes de que inicia el periodo de calibración y poder obtener unos resultados más acordes con la realidad.

Los factores correctores de los parámetros que caracterizan la cuenca que se obtuvieron en la calibración del modelo hidrológico en el punto de desagüe AT07, se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Factores Correctores en TETIS de la modelación hidrológica de la cuenca río San Nicolau.

FC's	Valor
Almacenamiento estático	0.34068
Evapotranspiración	0.41033
Infiltración	0.16290
Escorrentía directa	1.41272
Percolación	0.28000
Interflujo	35.00187

Pérdidas subterráneas	0.00410
Flujo base	119.8590
Velocidad del cauce	0.10021
Beta	0.012
Factor de fusión sin lluvia	5.8
Factor de fusión con lluvia	6.2
Temperatura base	0.3

- Hidrograma de Caudales

En la **Figura 47**, se presentan los resultados obtenidos de la modelación hidrológica para la cuenca del río San Nicolau, observándose la serie de caudal observado y la caudal simulado en conjunto con las series de precipitaciones tanto en componente líquida (lluvia) como sólida (nieve).

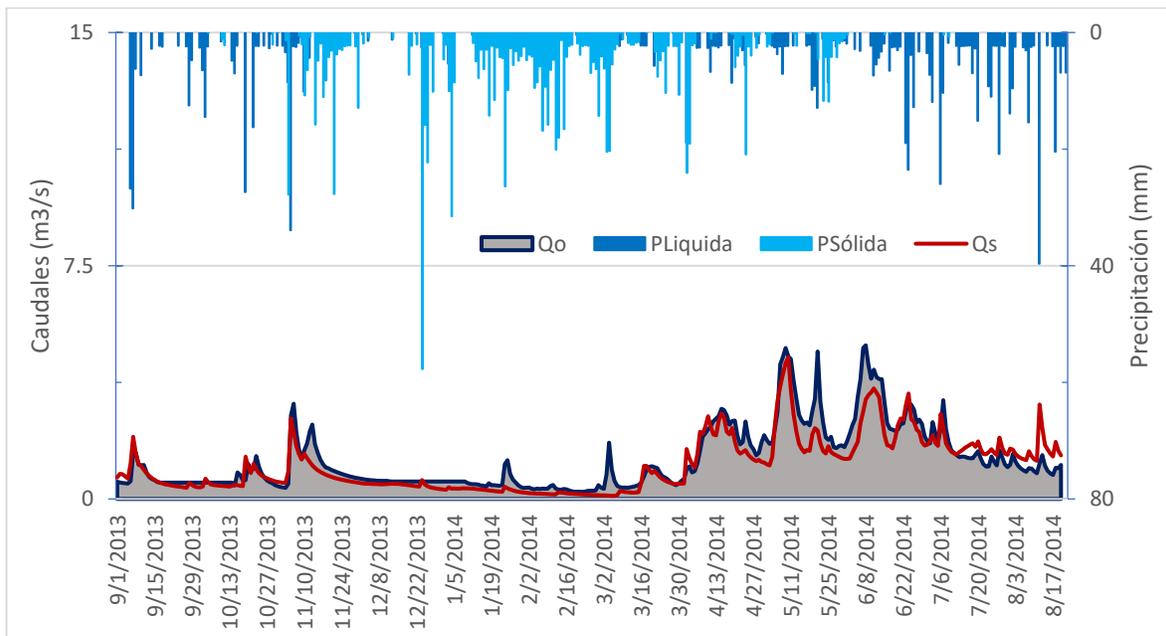


Figura 47. Hidrograma de caudales en calibración de la cuenca del Río San Nicolau.

Con respecto a los resultados obtenidos se puede decir que en general son buenos, se están representando de manera acertada los valores máximos, aunque son subestimados casi todos. La tendencia que siguen los caudales observados es seguida por los simulados adecuadamente, salvo unos casos puntuales en donde el modelo no responde de forma correcta. Esto se puede deber a acontecimientos puntuales en la cuenca que no son normales en el ciclo hidrológico, como puede ser el desprendimiento de alguna fracción de nieve desde un punto alto a uno más bajo, en donde la temperatura de por sí tiende a ser mayor y pueda provocar una fusión puntual que termine como aportación adicional al cauce.

Así como esta, pueden manejarse muchas otras hipótesis, pero es curioso el notar que estos picos que no son simulados por el modelo ni siquiera un poco se presenten justamente en los meses más fríos en donde las precipitaciones por lo general tienden a ser en forma de nieve y por tanto la respuesta de la cuenca a esos

incrementos no vaya a ser de tan forma rápida como si fuera lluvia. Los picos puntuales a los que se hace mención son los ocurridos en: 12/11/2013, 24/01/2014, 02/03/2014.

- Flujos y salidas simulados por TETIS

En cuanto a los flujos y salidas simulados por TETIS para la cuenca del río San Nicolau que se muestran en la **Figura 48**, se puede decir que al igual que en la cuenca del Lago Contraix, las aportaciones provenientes del proceso de fusión de nieve son las que marcan la respuesta rápida de la cuenca, incluso más importante que el interflujo y la escorrentía directa, aunque relacionados entre sí. En general el flujo base es la componente que mantiene los caudales bajos en los meses más fríos, y a medida que incrementan las temperaturas por primavera y verano empieza a incrementar lentamente hasta estabilizarse en primavera y verano gracias a la recarga del acuífero que se ha producido por el deshielo y la aparición de precipitaciones en forma de lluvia.

Si nos concentramos en los meses de primavera y verano, se observa que la respuesta de la cuenca ante eventos de precipitaciones y chaparrones es rápida, sobre estos meses la aportación por escorrentía directa e interflujo se hace mayor, a la vez que las precipitaciones aceleran el deshielo manteniendo unos caudales más altos que en otoño e invierno.

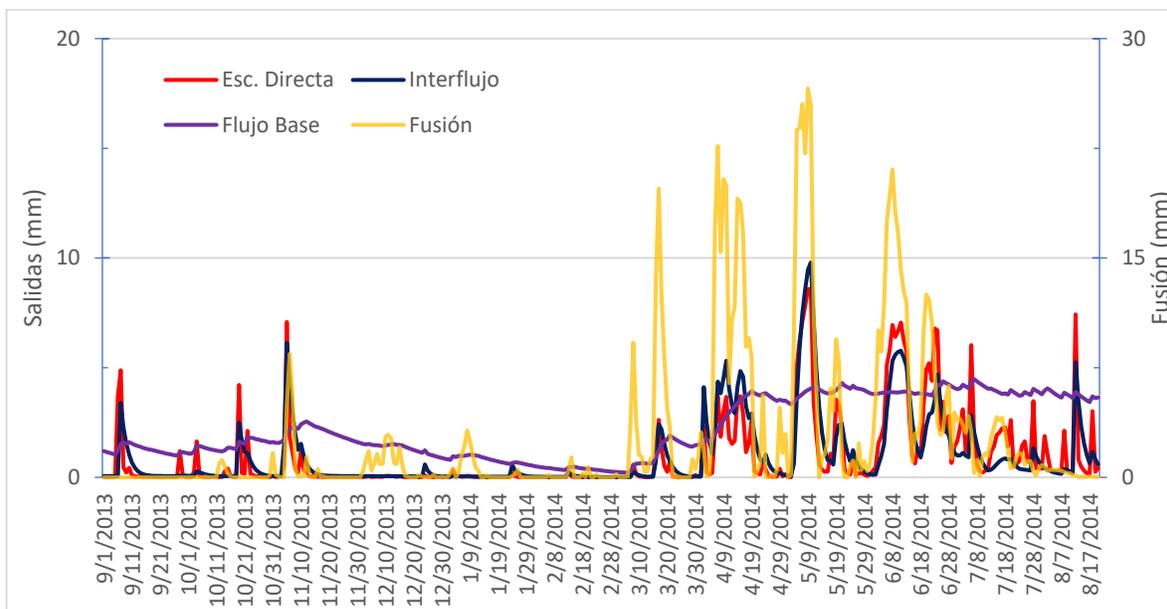


Figura 48. Flujos y salidas simulados por TETIS en calibración de la cuenca río San Nicolau.

- Almacenamientos

Los resultados presentados en calibración para los almacenamientos y que se presentan en la **Figura 49**, muestran como el almacenamiento o reserva de nieve fluctúa entre los meses más fríos y los meses más cálidos, tomando valores muy altos en los primeros y valores incluso de cero en los segundos. Se nota como a medida que se va entrando en otoño por el mes de noviembre aproximadamente se dan las condiciones para una acumulación progresiva y cuasi constante hasta alcanzar su cúspide sobre el mes de marzo, y de ahí en adelante se aprecia como empieza a aparecer el proceso de fusión de nieve y con ello la disminución permanente del manto de nieve hasta hacerse prácticamente cero cuando entra la estación de verano.

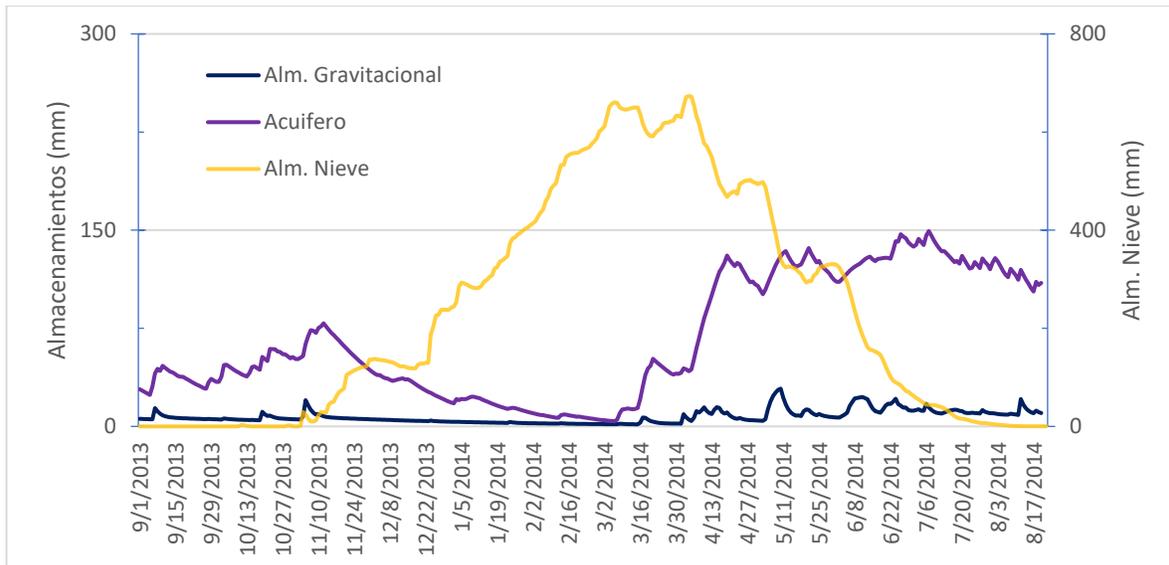


Figura 49. Almacenamientos principales simulados por TETIS en calibración de la cuenca río San Nicolau.

Con respecto al almacenamiento subterráneo conectado (acuifero) se aprecia como su comportamiento está también estrechamente relacionado con su flujo de salida, y además como este tiende a crecer a medida que el manto de nieve se deshiela, convirtiéndose gran parte de esta fusión en recarga del almacenamiento.

El almacenamiento gravitacional que es donde se produce el interflujo o flujo subsuperficial, de acuerdo con la anterior figura, permanece con valores muy bajos prácticamente todo el año, incluso acercándose a tomar valores de cero. Con respecto a esto, se puede decir que se entiende y va en concordancia con el tipo de suelo y uso de suelo que se presenta en la zona, muy constituido por suelos muy rocosos y de formación joven, con lo cual los espesores de estos son bajos y no permiten que tenga tanta importancia si se le compara con el acuifero o la reserva de nieve misma.

- Estadísticos

Los estadísticos de la calibración del nuevo modelo hidrológico de la cuenca del Lago Contraix se presenta en la Tabla 19. El índice de eficiencia NSE fue de 0.6678, considerándose como un indicador bueno de la reproducción de caudales respecto a los observados.

Tabla 19. Estadísticos obtenidos en calibración del modelo.

Estadísticos calibración	
Caudal máximo observado (m3/s)	4.9412
Caudal máximo simulado (m3/s)	4.5545
RMSE	0.4696
Tiempo al pico observado	6744
Tiempo al pico simulado	6048
Volumen observado (Hm3)	38.2387
Volumen simulado (Hm3)	33.0391
Error en volumen (%)	-13.5977
NSE	0.787

- Balance Hidrológico

El balance hidrológico resultado de la calibración del modelo en el punto de aforo AT07 en la desembocadura de la cuenca se presenta en la Tabla 20.

Tabla 20. Balance Hidrológico de calibración de la cuenca del río San Nicolau.

Balance hidrológico calibración		%Respecto a la precipitación
Precipitación observada (mm)	1543.256	-
Precipitación simulada (mm)	1803.824	-
Descarga observada (mm)	1427.092	-
Descarga simulada (mm)	1250.090	-
ETP (mm)	701.835	-
ETR (mm)	200.600	11%
Escorrentía directa (mm)	323.274	18%
Interflujo (mm)	341.915	19%
Flujo base (mm)	780.205	43%
Flujo Subterráneo No Conectado (mm)	58.883	3%
Alm. en el sistema (mm)	121.197	5%
Error (%)	-10.783	-

En términos de balance hidrológico, los resultados obtenidos para el punto AT07, muestran que el interflujo es de 341.915 mm, resultando menor que el flujo base con una aportación de 780.205 mm. Así mismo, la escorrentía directa es de 323.274 mm y la ETR es de 200.600 mm que equivale a un 28.6% de la ETP.

5.2.1.2 Validación Temporal

La validación temporal del modelo de la cuenca del río San Nicolau se realizó para el periodo comprendido entre el 01/09/2010 al 20/08/2011, utilizando la información de la estación hidrometeorológica de Llebreja y Contraix para la serie de precipitaciones, así como para las temperaturas.

- Hidrograma de Caudales

En la **Figura 50** se presentan los resultados para la serie de caudales simulados versus los observados, resultando en una aproximación bastante buena, lo que se interpretaría como que los parámetros efectivos del modelo resultaron ser estacionarios, es decir, invariantes en el tiempo.

En la Tabla 21 se observan los estadísticos obtenidos para el periodo de validación temporal. De acuerdo con sus valores, se puede concluir que los resultados obtenidos efectivamente son muy buenos, representados por un índice de eficiencia de Nash – Sutcliffe de 0.68, considerado como bueno en la evaluación del desempeño de un modelo hidrológico.

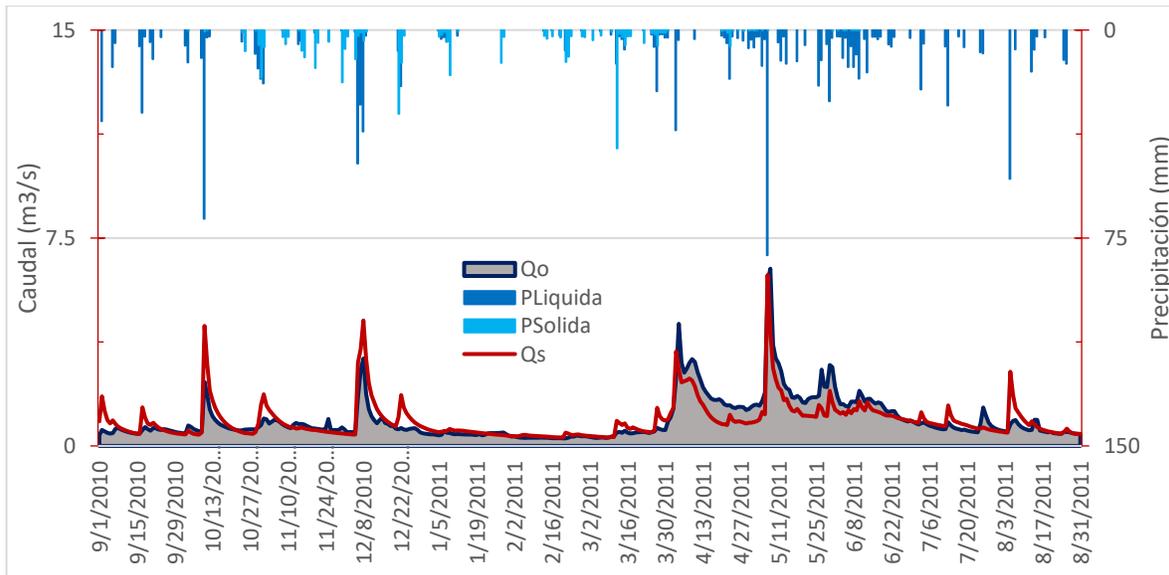


Figura 50. Hidrograma de caudales en validación temporal de la cuenca del Río San Nicolau.

Tabla 21. Estadísticos obtenidos en validación temporal del modelo.

Estadísticos validación temporal	
Caudal máximo observado (m3/s)	6.3939
Caudal máximo simulado (m3/s)	6.1657
RMSE	0.4416
Tiempo al pico observado	6000
Tiempo al pico simulado	5976
Volumen observado (Hm3)	29.4444
Volumen simulado (Hm3)	28.8207
Error en volumen (%)	-2.1181
NSE	0.68

- Balance Hidrológico

El balance hidrológico resultado de la validación temporal del modelo en el punto de aforo AT07 en la desembocadura de la cuenca se presenta en la Tabla 22.

En términos de balance hidrológico, los resultados obtenidos para el punto AT07 en validación temporal, muestran que el interflujo es de 280.052 mm, el flujo base de 672.377 mm. Así mismo, la escorrentía directa es de 228.839 mm y la ETR es de 248.984 mm que equivale a un 31.5% de la ETP.

Tabla 22. Balance Hidrológico de validación temporal de la cuenca del río San Nicolau.

Balance hidrológico calibración		%Respecto a la precipitación
Precipitación observada (mm)	1483.320	-
Precipitación simulada (mm)	1491.455	-
Descarga observada (mm)	1111.446	-

Descarga simulada (mm)	1090.479	-
ETP (mm)	790.455	-
ETR (mm)	248.984	17%
Escorrentía directa (mm)	228.839	15%
Interflujo (mm)	280.052	19%
Flujo base (mm)	672.377	45%
Flujo Subterráneo No Conectado (mm)	48.978	3%
Alm. en el sistema (mm)	75.395	5%
Error (%)	-6.086	-

5.2.1.3 Validación Espacio-Temporal

La validación espacio temporal del modelo de la cuenca del río San Nicolau se realizó para el periodo comprendido entre el 01/09/2010 al 20/08/2011 en el punto de aforo CISCO1 en la desembocadura de la cuenca del Lago Contraix, utilizando únicamente la información de la estación hidrometeorológica de ubicada en cercanías al lago en la misma configuración que para el modelo de Contraix presentado en la sección anterior. Esto es que al igual que en ese modelo se incluye la estación de ETP conocida como Cono Contraix, y los estados iniciales de los almacenamientos se obtuvieron por calibración automática al no contar con un periodo lo suficientemente largo como para que fuera representativo y reflejara las condiciones reales del sistema antes de este periodo temporal.

- Hidrograma de Caudales

En la **Figura 51** se presentan los resultados para la serie de caudales simulados versus los observados, resultando en una aproximación bastante buena, lo que se interpretaría como que los parámetros efectivos del modelo resultaron ser estacionarios, es decir, invariantes en el tiempo.

En la Tabla 23 se observan los estadísticos obtenidos para el periodo de validación espacio-temporal. De acuerdo con sus valores, se puede concluir que los resultados no son tan buenos en términos de eficiencia, con un índice de eficiencia de Nash – Sutcliffe de -0.0355, considerado como malo en la evaluación del desempeño de un modelo hidrológico.

Tabla 23. Estadísticos obtenidos en validación espacio-temporal del modelo.

Estadísticos validación temporal	
Caudal máximo observado (m3/s)	0.5938
Caudal máximo simulado (m3/s)	0.8865
RMSE	0.1136
Tiempo al pico observado	5184
Tiempo al pico simulado	6432
Volumen observado (Hm3)	7.0926
Volumen simulado (Hm3)	5.8702
Error en volumen (%)	-17.235
NSE	-0.0355

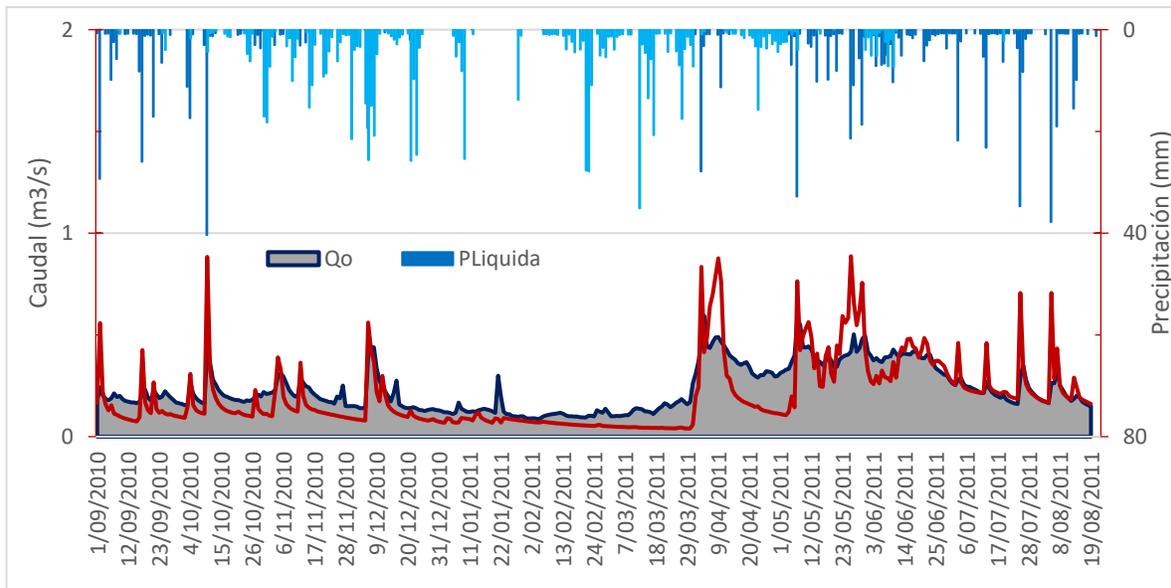


Figura 51. Hidrograma de caudales en validación espacio-temporal de la cuenca del Río San Nicolau en CISCO1.

- Balance Hidrológico

El balance hidrológico resultado de la validación espacio-temporal del modelo en el punto de aforo AT07 en la desembocadura de la cuenca se presenta en la Tabla 24.

Tabla 24. Balance Hidrológico de validación espacio-temporal de la cuenca del río San Nicolau en CISCO1.

Balance hidrológico calibración		%Respecto a la precipitación
Precipitación observada (mm)	1494.320	-
Precipitación simulada (mm)	1483.042	-
Descarga observada (mm)	1479.588	-
Descarga simulada (mm)	1284.959	-
ETP (mm)	628.376	-
ETR (mm)	158.373	11.1%
Escorrentía directa (mm)	170.523	11.5%
Interflujo (mm)	500.511	33.7%
Flujo base (mm)	617.826	41.6%
Flujo Subterráneo No Conectado (mm)	0.00	0%
Alm. en el sistema (mm)	74.952	5.1%
Error (%)	-0.109	-

En términos de balance hidrológico, los resultados obtenidos para el punto AT07 en validación temporal, muestran que el interflujo es de 500.511 mm, el flujo base de 617.826 mm. Así mismo, la escorrentía directa es de 170.523 mm y la ETR es de 158.373 mm que equivale a un 25.2% de la ETP.

5.2.2 Modelo Hidrológico con 13 estaciones de Temperatura

5.2.2.1 Calibración

La calibración del modelo hidrológico de la cuenca del río San Nicolau con 13 estaciones de temperatura se realizó de la misma forma que en la modelación con 2 estaciones de temperatura, el proceso es transparente en este caso salvo ese detalle, por lo que se comentarán sólo los resultados más importantes.

Los factores correctores de los parámetros que caracterizan la cuenca que se obtuvieron en la calibración del modelo hidrológico en el punto de desagüe AT07 con 13 estaciones de temperatura, se presentan en la Tabla 25.

Tabla 25. Factores Correctores en TETIS de la modelación hidrológica de la cuenca río San Nicolau con 13 estaciones de temperatura.

FC's	Valor
Almacenamiento estático	0.64304
Evapotranspiración	0.22978
Infiltración	0.76714
Escorrentía directa	0.42212
Percolación	0.27734
Interflujo	72.93055
Pérdidas subterráneas	0.005
Flujo base	155.17642
Velocidad del cauce	0.30725
Beta	0.015
Factor de fusión sin lluvia	5.5177
Factor de fusión con lluvia	6.1199
Temperatura base	-0.3162

- Hidrograma de Caudales

En la **Figura 52**, se presentan los resultados obtenidos de la modelación hidrológica para la cuenca del río San Nicolau, observándose la serie de caudal observado y la caudal simulado en conjunto con las series de precipitaciones tanto en componente líquida (lluvia) como sólida (nieve).

Con respecto a los resultados obtenidos se puede decir que al igual que la modelación con sólo 2 estaciones de temperatura en general son buenos, se están representando de manera acertada los valores máximos, aunque también son infravalorados en la mayoría de casos. La tendencia que siguen los caudales observados es seguida por los simulados adecuadamente, salvo unos casos puntuales en donde el modelo no responde de forma correcta. Esto, como se había dicho se puede deber a acontecimientos puntuales en la cuenca que no forman parte del ciclo hidrológico propio del sistema.

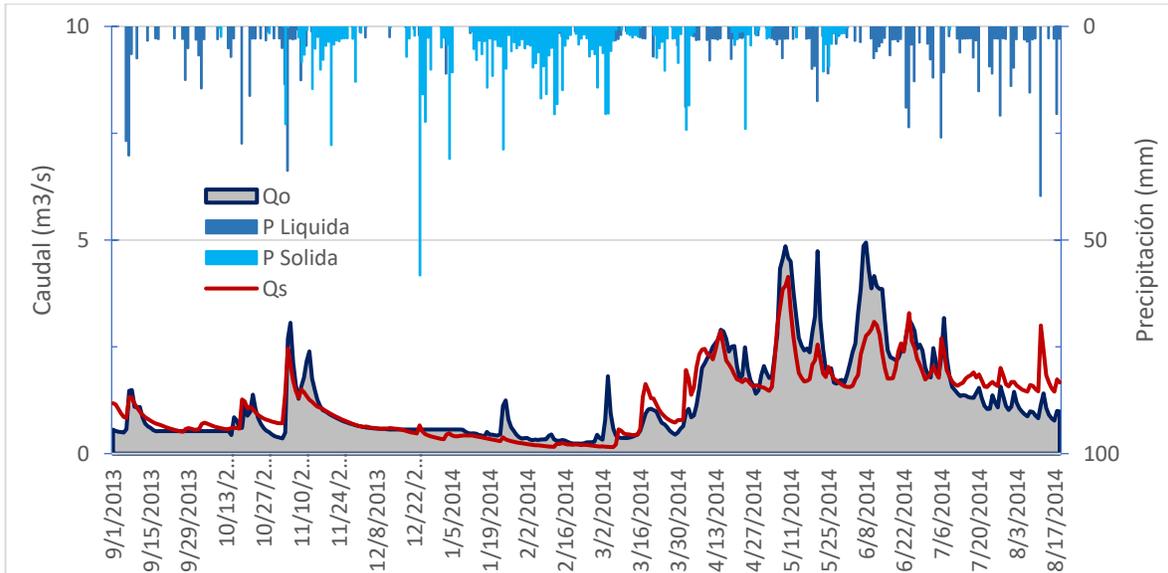


Figura 52. Hidrograma de caudales en calibración de la cuenca del Río San Nicolau.

- Flujos y salidas simulados por TETIS

En la **Figura 53** se presenta el gráfico que contiene los resultados de los flujos y salidas en el sistema, en general se observa que al igual que en el modelo de 2 estaciones de temperatura la fusión de nieve es la principal componente y es la que hace que se vean reflejados los valores picos observados en el hidrograma.

En general el flujo base es la componente que mantiene los caudales bajos en los meses más fríos, y a medida que incrementan las temperaturas por primavera y verano empieza a incrementar lentamente hasta estabilizarse en primavera y verano gracias a la recarga del acuífero que se ha producido por el deshielo y la aparición de precipitaciones en forma de lluvia.

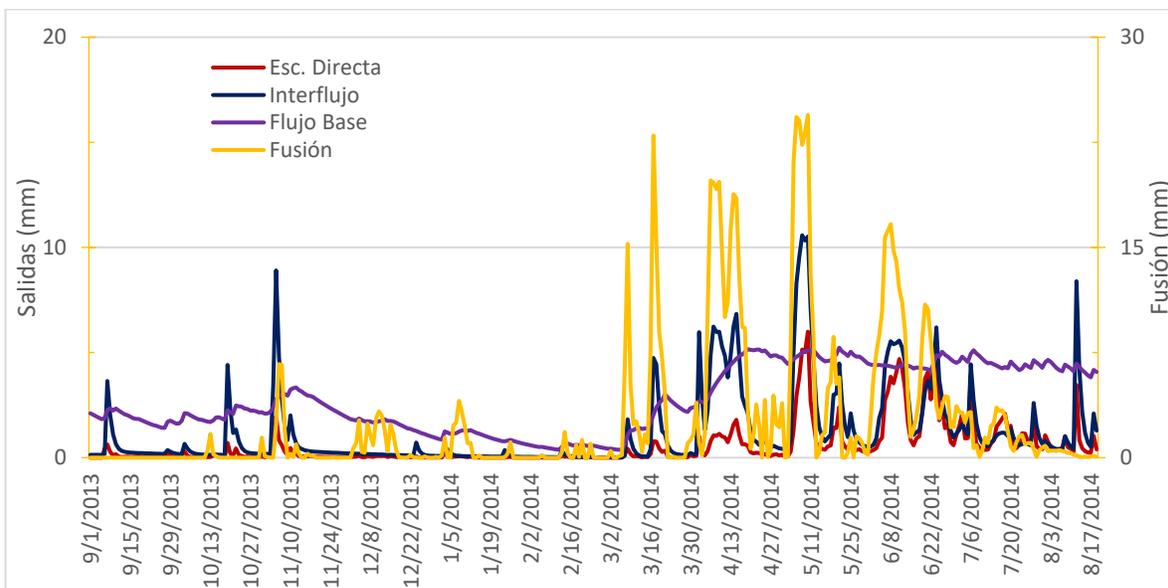


Figura 53. Flujos y salidas simulados por TETIS en calibración de la cuenca río San Nicolau.

- Almacenamientos

Los resultados para los almacenamientos se presentan en la **Figura 54**, muestran como también el almacenamiento o reserva de nieve fluctúa entre los meses más fríos y los meses más cálidos, tomando valores muy altos en los primeros y valores incluso de cero en los segundos. Se nota como a medida que se va entrando en otoño por el mes de noviembre aproximadamente se dan las condiciones para una acumulación progresiva y cuasi constante hasta alcanzar su cúspide sobre el mes de marzo con cerca de 700 mm, y a partir de ahí se observa como decae hasta desaparecer casi por completo el proceso de fusión de nieve.

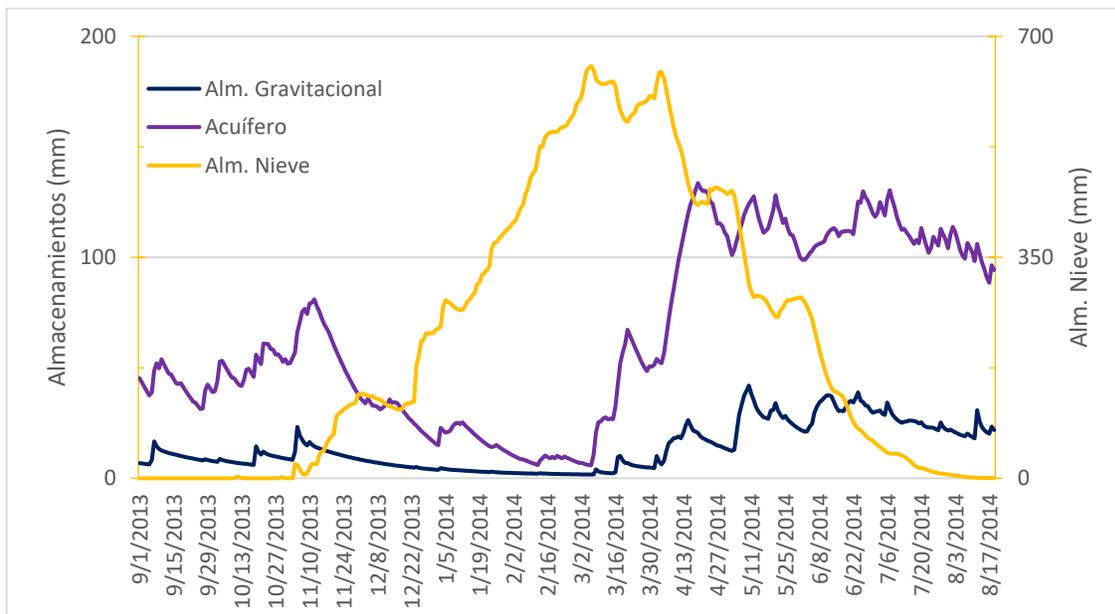


Figura 54. Almacenamientos principales simulados por TETIS en calibración de la cuenca río San Nicolau.

- Estadísticos

Los estadísticos de la calibración del nuevo modelo hidrológico de la cuenca del Lago Contraix se presenta en la Tabla 26. El índice de eficiencia NSE fue de 0.6678, considerándose como un indicador bueno de la reproducción de caudales respecto a los observados.

Tabla 26. Estadísticos obtenidos en calibración del modelo con 13 estaciones de temperatura.

Estadísticos calibración	
Caudal máximo observado (m3/s)	4.9412
Caudal máximo simulado (m3/s)	4.1383
RMSE	0.4868
Tiempo al pico observado	6744
Tiempo al pico simulado	6048
Volumen observado (Hm3)	38.1442
Volumen simulado (Hm3)	36.3211
Error en volumen (%)	-4.7795
NSE	0.7721

- Balace Hidrológico

El balance hidrológico resultado de la calibración del modelo en el punto de aforo AT07 en la desembocadura de la cuenca se presenta en la Tabla 27.

Tabla 27. Balance Hidrológico de calibración de la cuenca del río San Nicolau con 13 estaciones de temperatura.

Balace hidrológico calibración		%Respecto a la precipitación
Precipitación observada (mm)	1536.956	-
Precipitación simulada (mm)	1886.378	-
Descarga observada (mm)	1427.092	-
Descarga simulada (mm)	1374.269	-
ETP (mm)	701.835	-
ETR (mm)	128.091	7%
Escorrentía directa (mm)	193.177	10%
Interflujo (mm)	431.985	23%
Flujo base (mm)	975.479	52%
Flujo Subterráneo No Conectado (mm)	73.285	4%
Alm. en el sistema (mm)	73.285	5%
Error (%)	-11.999	-

En términos de balance hidrológico, los resultados obtenidos para el punto AT07, muestran que el interflujo es de 431.985 mm, resultando menor que el flujo base con una aportación de 975.479 mm. Así mismo, la escorrentía directa es de 193.177 mm y la ETR es de 128.091 mm que equivale a un 18.3% de la ETP.

5.2.2.2 Validación temporal

La validación temporal del modelo de la cuenca del río San Nicolau se realizó para el periodo comprendido entre el 01/09/2010 al 20/08/2011, utilizando la información de la estación hidrometeorológica de Liebreta y Contraix para la serie de precipitaciones, así como para las temperaturas más 11 estaciones virtuales ubicadas estratégicamente con el fin de captar de una mejor forma el gradiente térmico para el proceso de modelación de la acumulación y fusión.

- Hidrograma de Caudales

En la **Figura 55** se presentan los resultados para la serie de caudales simulados versus los observados, resultando en una aproximación bastante buena, aunque con una sobreestimación de los caudales en los meses del verano del 2011, debido a que se está simulando más precipitación de la que toca. Aun así, se puede interpretar que los parámetros efectivos del modelo resultaron ser estacionarios, es decir, invariantes en el tiempo.

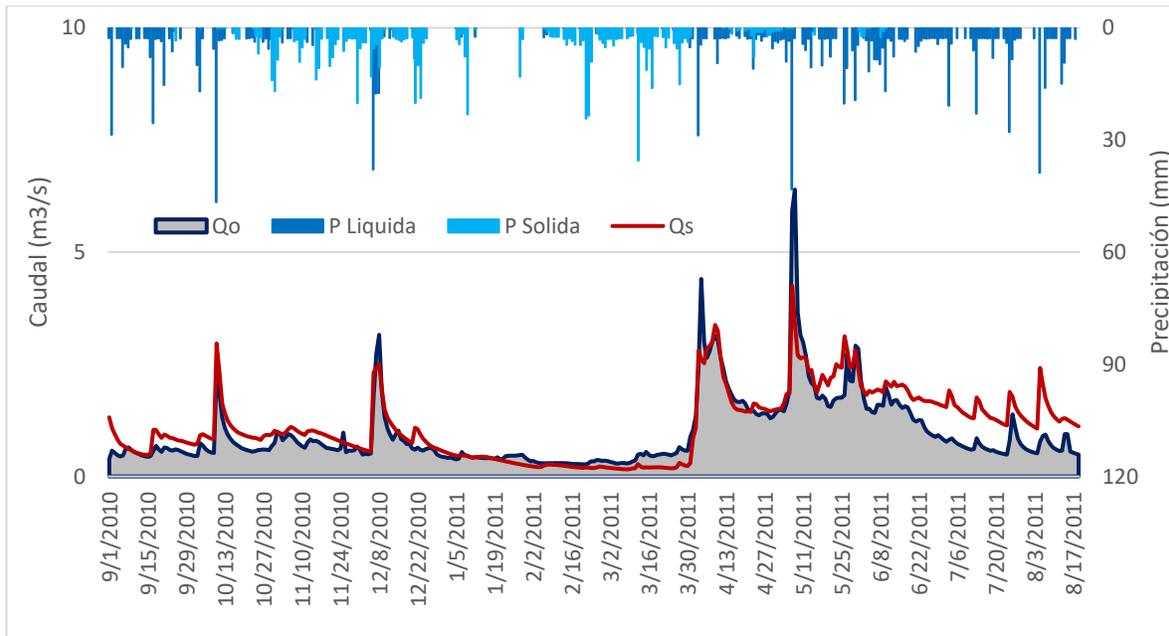


Figura 55. Hidrograma de caudales en validación temporal de la cuenca del Río San Nicolau.

En la Tabla 28 se observan los estadísticos obtenidos para el periodo de validación temporal. De acuerdo con sus valores, se puede concluir que los resultados obtenidos efectivamente son muy buenos, representados por un índice de eficiencia de Nash – Sutcliffe de 0.6808, considerado como bueno en la evaluación del desempeño de un modelo hidrológico.

Tabla 28. Estadísticos obtenidos en validación temporal del modelo.

Estadísticos validación temporal	
Caudal máximo observado (m³/s)	6.3939
Caudal máximo simulado (m³/s)	4.2476
RMSE	0.4457
Tiempo al pico observado	6000
Tiempo al pico simulado	5976
Volumen observado (Hm³)	28.9626
Volumen simulado (Hm³)	34.3728
Error en volumen (%)	18.6797
NSE	0.6808

- Balance Hidrológico

El balance hidrológico resultado de la validación temporal del modelo en el punto de aforo AT07 en la desembocadura de la cuenca se presenta en la Tabla 22.

Tabla 29. Balance Hidrológico de validación temporal de la cuenca del río San Nicolau.

Balance hidrológico calibración		%Respecto a la precipitación
Precipitación observada (mm)	1483.320	-
Precipitación simulada (mm)	1772.036	-
Descarga observada (mm)	1111.446	-
Descarga simulada (mm)	1300.551	-
ETP (mm)	790.455	-
ETR (mm)	128.837	7%
Escorrentía directa (mm)	158.999	9%
Interflujo (mm)	384.256	22%
Flujo base (mm)	947.104	53%
Flujo Subterráneo No Conectado (mm)	71.5589	4%
Alm. en el sistema (mm)	104.359	6%
Error (%)	-10.683	-

En términos de balance hidrológico, los resultados obtenidos para el punto AT07 en validación temporal, muestran que el interflujo es de 384.256 mm, el flujo base de 947.104 mm. Así mismo, la escorrentía directa es de 158.999 mm y la ETR es de 128.837 mm que equivale a un 16.3% de la ETP.

5.2.2.3 Validación Espacio-Temporal

La validación espacio temporal del modelo de la cuenca del río San Nicolau se realizó para el periodo comprendido entre el 01/09/2010 al 20/08/2011 en el punto de aforo CISCO1 en la desembocadura de la cuenca del Lago Contraix, utilizando únicamente la información de precipitación de la estación hidrometeorológica ubicada en cercanías al lago en la misma configuración que para el modelo de Contraix presentado en la sección anterior, y dejando las 13 estaciones de temperatura para captar mejor el gradiente térmico en el proceso de fusión de nieve, aunque con conciencia de que prácticamente solo influirán las estaciones ubicadas en la cuenca del lago Contraix. Esto es que al igual que en ese modelo se incluye la estación de ETP conocida como Cono Contraix, y los estados iniciales de los almacenamientos se obtuvieron por calibración automática al no contar con un periodo lo suficientemente largo como para que fuera representativo y reflejara las condiciones reales del sistema antes de este periodo temporal (2010-2011).

- Hidrograma de Caudales

En la **Figura 56** se presentan los resultados para la serie de caudales simulados versus los observados, resultando mucho mejor que si solo se incluyen 2 estaciones de temperatura. Lo anterior representa que los parámetros efectivos del modelo están representando bien la realidad del sistema, pudiéndose considerar estacionarios y extrapolables.

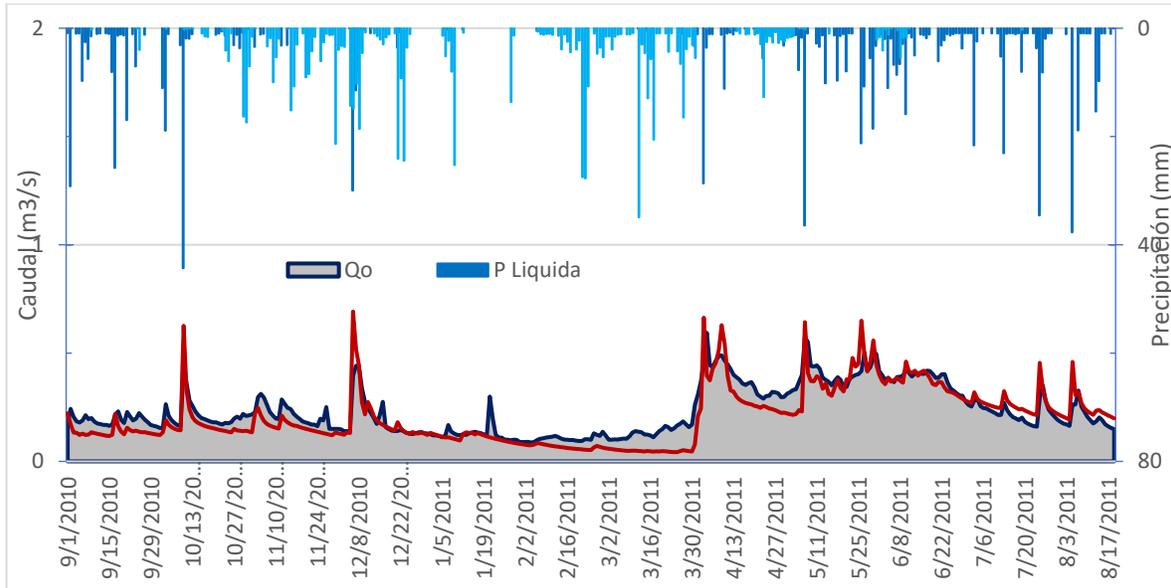


Figura 56. Hidrograma de caudales en validación espacio-temporal de la cuenca del Río San Nicolau en CISCO1.

En la Tabla 30 se observan los estadísticos obtenidos para el periodo de validación temporal. De acuerdo con sus valores, se puede concluir que los resultados obtenidos efectivamente son buenos, representados por un índice de eficiencia NSE de 0.59, considerado como bueno en la evaluación del desempeño de un modelo hidrológico.

Tabla 30. Estadísticos obtenidos en validación espacio-temporal del modelo.

Estadísticos validación temporal	
Caudal máximo observado (m3/s)	0.5938
Caudal máximo simulado (m3/s)	0.692
RMSE	0.0714
Tiempo al pico observado	5184
Tiempo al pico simulado	2328
Volumen observado (Hm3)	7.0926
Volumen simulado (Hm3)	6.023
Error en volumen (%)	-15.0802
NSE	0.5904

- Balance Hidrológico

El balance hidrológico resultado de la validación espacio-temporal del modelo en el punto de aforo AT07 en la desembocadura de la cuenca se presenta en la Tabla 24.

Tabla 31. Balance Hidrológico de validación espacio-temporal de la cuenca del río San Nicolau en CISCO1.

Balance hidrológico calibración		%Respecto a la precipitación
Precipitación observada (mm)	1494.320	-
Precipitación simulada (mm)	1506.329	-
Descarga observada (mm)	1479.588	-
Descarga simulada (mm)	1318.412	-
ETP (mm)	628.376	-
ETR (mm)	94.170	5%
Escorrentía directa (mm)	226.526	13%
Interflujo (mm)	325.068	18%
Flujo base (mm)	771.618	44%
Flujo Subterráneo No Conectado (mm)	29.614	2%
Alm. en el sistema (mm)	99.195	6%
Error (%)	-0.3046	-

En términos de balance hidrológico, los resultados obtenidos para el punto CISCO1 en validación temporal, muestran que el interflujo es de 325.068 mm, el flujo base de 771.618 mm. Así mismo, la escorrentía directa es de 226.526 mm y la ETR es de 94.170 mm que equivale a un 15% de la ETP.

5.3 Discusión de resultados

- Discusión de Resultados nuevo modelo de Contraix con respecto al proyecto ACOPLA e ISOTOPOS

Los resultados obtenidos en la nueva modelación hidrológica de la cuenca del Lago Contraix, confirman que efectivamente la componente del flujo base en la salida de caudal estaba siendo subestimado en el anterior modelo de esta cuenca desarrollado en el proyecto ACOPLA; y que así mismo está en concordancia con los resultados obtenidos en el proyecto ISOTOPOS, en donde se sugiere que se está subestimando ese flujo, al observar que el comportamiento de las mediciones reales de la composición isotópica del deuterio y del oxígeno disuelto se parecen más al acuífero que al interflujo.

Esto se relaciona con la mencionada paradoja del “old water paradox”, que básicamente dice que el agua que circula por los cauces en general tiene meses u años de antigüedad, y que sólo los caudales responden de manera casi inmediata cuando se presentan tormentas en minutos u horas (Kirchner, 2003).

En realidad, esto supone que existen dos modelos buenos, en los que se ha llegado a una solución viable, pero que en últimas termina teniendo más peso el modelo actualizado de Contraix al validarse con los resultados de ISOTOPOS. Este resulta ser un problema de equifinalidad, por lo cual, la selección del modelo dependerá entonces de también conocer y entender el sistema real lo mejor posible.

En este punto se debe mencionar que TETIS está diseñado para entregar sólo los caudales en el punto de aforo, internamente, de algún modo puede distribuir aleatoriamente pero consensuadamente tantos los flujos como los almacenamientos, esto quiere decir que, si se desean obtener cada una de las componentes del

caudal como escorrentía directa, interflujo y flujo base, se hace necesario tener un conocimiento más amplio de la cuenca de estudio, que permita de algún modo ajustar esos valores internos convenientemente.

Es por esto, que el nuevo modelo de Contraix es mejor que el presentado en ACOPLA, gracias a que como se tiene un conocimiento mayor de la zona de estudio, permite mejorar los resultados obtenidos de las componentes del caudal en cuanto a las aportaciones de interflujo y flujo base, siendo mayor la segunda y ajustándose a lo que el proyecto de ISOTOPOS está mostrando a partir de la trazabilidad de la composición isotópica del deuterio y el oxígeno disuelto.

- Discusión sobre los resultados obtenidos en los dos modelos implementados en la cuenca del río San Nicolau

El modelo hidrológico implementado en San Nicolau con sólo 2 estaciones de temperatura (Est. Liebreta y Est. Contraix) arroja unos muy buenos resultados tanto para la calibración como para la validación temporal del modelo, sin embargo, en la validación espacio-temporal realizado en la cuenca del Lago Contraix, se observa que no es tan lineal o extrapolable como se desearía, resultando con una eficiencia del modelo muy baja (NSE= -0.355). Si bien en general se capta de algún modo la estacionalidad, se ve como en varios periodos de tiempo el modelo se queda “colgado” y no refleja de forma adecuada los caudales observados, especialmente en la época de invierno y primavera.

Para el caso del modelo en donde se adicionan 11 estaciones ficticias de temperatura con el objetivo de captar mejor la variación del gradiente térmico con la altitud sobre todo para el proceso de modelación de la acumulación y fusión de la nieve. Los resultados obtenidos en la validación espacio-temporal reflejan que de hecho se capta mejor este proceso, y se subestiman menos los caudales simulados con respecto a los simulados, alcanzando una eficiencia del modelo NSE de 0.59 considerada como buena. En general, el modelo de 13 estaciones calibra y valida bien, aunque hay que reconocer que, si se compara los resultados de validación temporal de esta configuración con respecto a la de 2 estaciones de temperatura, el primero parece que lo hace peor, sobre todo con una sobreestimación de los caudales simulados en verano; asociado a que parece que en estos meses se está simulando un poco más de lluvia de lo que debería.

En términos globales, el segundo modelo con 13 estaciones de temperatura puede considerarse mejor que el primero, porque puede ser más fácilmente extrapolable a la cuenca del lago Contraix, gracias a que calibra bien, valida temporalmente bien y valida espacio-temporalmente mucho mejor que el modelo con solo 2 estaciones de temperatura.

Pese a ello, es necesario tener cuidado y mirar un poco con recelo los resultados debido a la incertidumbre en la información de partida, pues como se mencionó en ocasiones hubo que hacerse correcciones por datos faltantes, así como también, que la serie de caudales observados en CISCO1, proviene de la diferencia entre la estación ubicada aguas abajo de la desembocadura CISCO y antes de la desembocadura C1.

En este punto se hace preciso recomendar revisar una vez más el modelo hidrológico apenas se tenga información de mejor calidad, más actualizada y para un periodo de tiempo mucho más largo con el fin de poder observar más cosas y poder tomar mejores decisiones basados en los resultados que se obtengan.

Lo que si se ha comprobado es la estacionalidad de los almacenamientos y los flujos a partir de modelar el periodo histórico de 1971-2000 con información de SPAIN02, ajustada a las estaciones de Liebreta y Contraix para los dos modelos aquí implementados.

6 SIMULACIONES CAMBIO CLIMÁTICO

Luego de implementar el modelo hidrológico para la cuenca del río San Nicolau en la etapa de calibración, y después del proceso de validación, se procede entonces a realizar la estimación de los efectos del cambio climático para la ventana temporal del año 2071 al año 2100 y considerando el escenario de emisión RCP 8.5 del quinto informe del IPCC, por ser el más pesimista de todos los escenarios basados en emisiones de gases efecto invernadero (GEI's).

6.1 Análisis previo de modelos de cambio climático regionalizados

La selección de los modelos con los cuales se estimarán los efectos del cambio climático en la cuenca del río San Nicolau, a partir de la información proveniente de la AEMET ya regionalizada; se hará de acuerdo a un filtrado de la información visual mediante gráficos y estadístico debido a que la calidad de la información puede ser muy mala, posterior a ello se corregirá el sesgo de las proyecciones con respecto a la serie de observaciones de Spain02 V.05. El periodo entre 1971 y el 2000 es común para la información proveniente de AEMET y de la serie de Spain02 V0.5, por lo que de ahora en adelante se hablará de periodo de control o periodo histórico refiriéndose específicamente a esa ventana temporal.

Es de destacar anticipadamente que la corrección del sesgo no se llevará a cabo para todos los modelos regionalizados tanto por el método de Análogos como por el estadístico SDSM. Esto, a raíz que la calidad de la información inicial puede llegar a interferir con el grado de corrección que se espera alcanzar al ser los datos iniciales muy malos, debido al tiempo empleado en el proceso de corrección que puede ser muy alto y conllevar un gran trabajo, y por último, pero no menos importante el considerar de que todos los modelos tienen faltantes ya sea en las series de precipitaciones o de temperaturas.

6.1.1 Análisis gráfico de valores mensuales de precipitación y temperatura

Este procedimiento consistió en la recolección de toda la información de todos los modelos disponibles por ambos métodos de regionalización en valores acumulados mensuales y multianuales. En la **Figura 57** y en la **Figura 58** se pueden apreciar los valores de precipitaciones medias mensuales por el método de Análogos y SDSM, respectivamente.

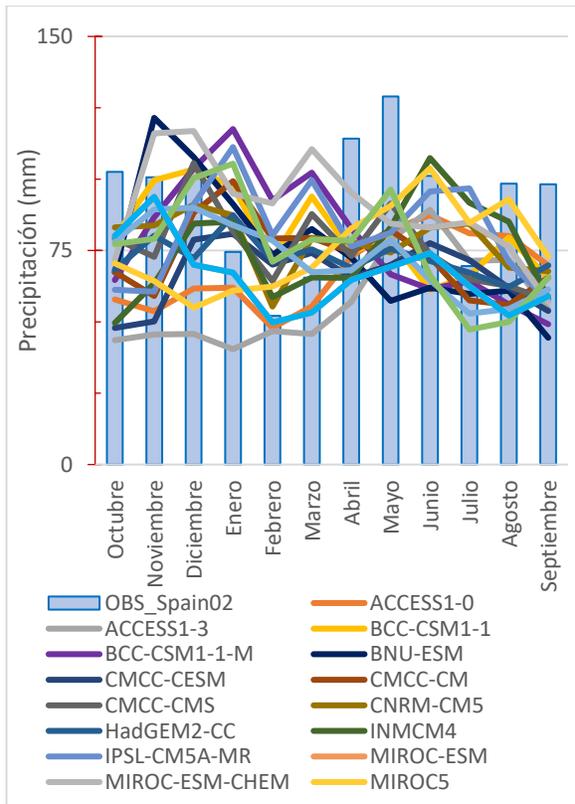


Figura 57. Precipitaciones medias mensuales: Método Análogos.

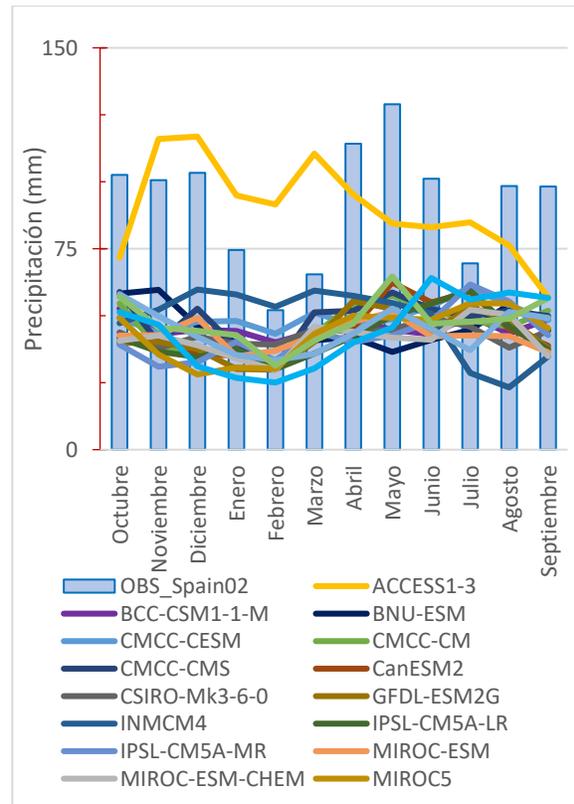


Figura 58. Precipitaciones medias mensuales: Método SDSM.

Las anteriores figuras lo que están mostrando es que en general los modelos no están teniendo un comportamiento acorde a la estacionalidad del clima, y que mayoritariamente tiende a haber una subestimación en los valores mensuales de la precipitación.

Si se compara la **Figura 57** con la **Figura 58**, se deduce de entrada que existe una mayor variabilidad en las proyecciones realizadas en los modelos por el método de Análogos que por el método SDSM; y que a su vez este último tiende a subestimar mucho más los valores de la precipitación e incluso su estacionalidad a lo largo del año hidrológico, salvo en el modelo ACCESS1-3.

En cuanto a las temperaturas, en general todos los modelos y por ambos métodos de regionalización representan bien la estacionalidad de esta variable a lo largo del año, salvo unos casos concretos. Sin embargo, también tiende a sobreestimarse los valores con respecto de los observados por ambos métodos y para todos los modelos. Esto puede verse en la **Figura 59** y **Figura 60** para el método Análogos y SDSM, respectivamente.

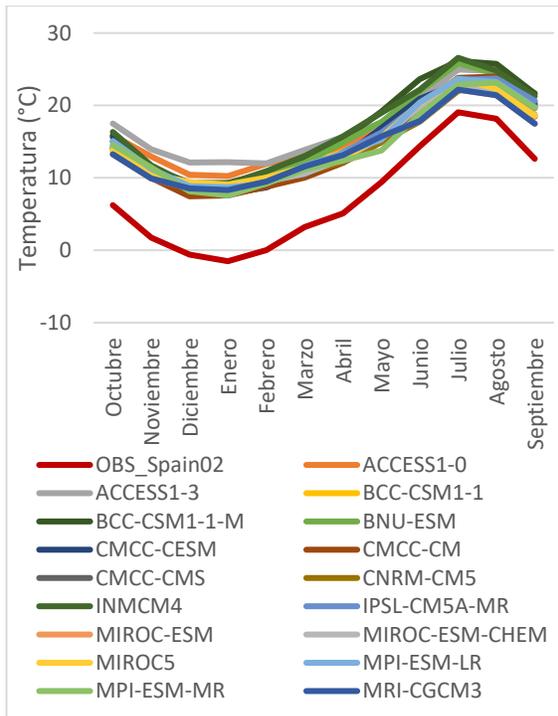


Figura 59. Temperaturas medias mensuales: Método Análogos.

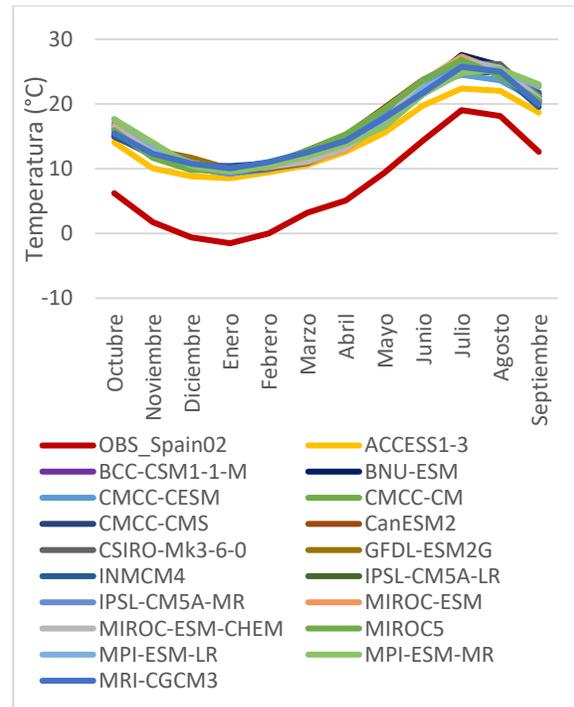


Figura 60. Temperaturas medias mensuales: Método SDSM.

Debido a que las proyecciones de la variable precipitación es la que más problemas trae para su estimación y teniendo en cuenta que por lo general las temperaturas están notablemente mejor en cuanto a su estacionalidad y demás, se procederá a analizar con más detalle solo la lluvia y por tanto será la que influya en la selección de los modelos de cambio climático para realizar la modelación hidrológica en la cuenca del río San Nicolau.

6.1.2 Análisis gráfico de valores extremos en Precipitación

En la **Figura 61** y **Figura 62** se presentan los valores de las precipitaciones máximas anuales de todos los modelos de proyecciones climáticas por el método de Análogos y SDSM, respectivamente. En este caso, nuevamente se evidencia que existe una mayor variabilidad entre los resultados de las proyecciones por el método Análogos con respecto a si se comparan todos los modelos del método estadístico. De igual forma, se aprecia que existe una mayor subestimación de los máximos de precipitación por el método SDSM que por Análogos.

A pesar de lo anterior, ambos métodos en general subestiman los valores máximos de la variable analizada y por lo tanto, se deben hacer más análisis que permitan vislumbrar cual método representa mejor las condiciones climáticas en periodo de control de la zona de estudio.

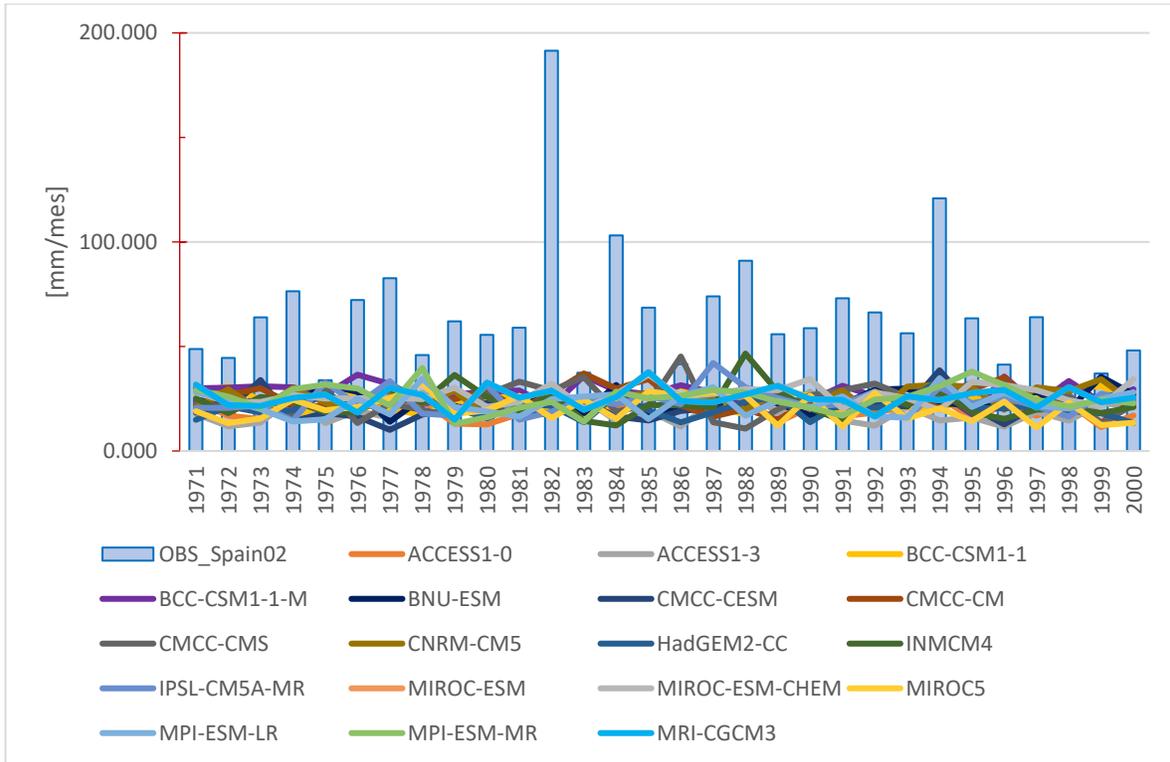


Figura 61. Precipitaciones máximas anuales: Método Análogos.

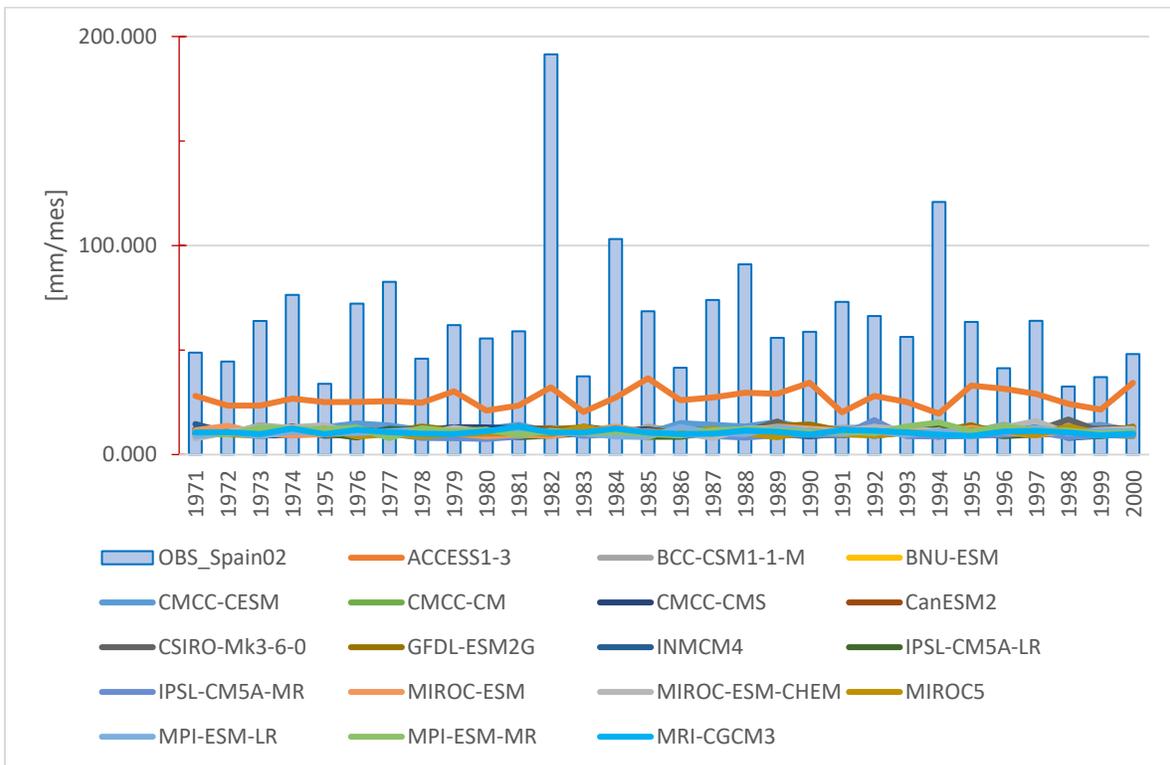


Figura 62. Precipitaciones máximas anuales: Método SDSM.

6.1.3 Análisis Estadístico: Media de los Datos

En la Tabla 32 se presentan los valores obtenidos para los modelos climáticos contemplados por los dos métodos de regionalización de AEMET. En el caso de los modelos regionalizados por el método de Análogos se observa que los valores medios subestiman el valor de la observación, esto se confirma al observar el error en la media que para todos los casos toma valores negativos.

De igual forma sucede con los modelos regionalizados por el método SDSM, sus valores medios son subestimados en todos los casos comprobándose además con el valor del error, tomando siempre valores negativos.

Si se comparan ambos métodos de regionalización, la conclusión a la que se llega es que en general el método de análogos aproxima un poco más los valores medios de sus modelos al valor de las observaciones, salvo en el método ACCES1-3 del método estadístico, que se aproxima incluso mucho más al valor real de Spain02 V.05 que la mayoría de modelos del método de Análogos.

Nuevamente se comprueba que en general en los valores de precipitación anual hay mayor variabilidad en la estimación de esta en los modelos que emplean el método de regionalización de Análogos, es decir, el método estadístico presenta menos variación en las estimaciones de sus modelos.

Tabla 32. Valores medios de precipitación anual para los modelos disponibles por el Método de Regresión y Análogos, Respectivamente

ANÁLOGOS	P anual (mm)	Error Media	SDSM	P anual (mm)	Error Media
OBS_Spain02	1109.108	-	OBS_Spain02	1109.108	-
ACCESS1-0	811.663	-0.2682	ACCESS1-3	1082.220	-0.0242
ACCESS1-3	690.147	-0.3777	BCC-CSM1-1-M	547.160	-0.5067
BCC-CSM1-1	971.883	-0.1237	BNU-ESM	537.990	-0.5149
BCC-CSM1-1-M	947.807	-0.1454	CMCC-CESM	594.710	-0.4638
BNU-ESM	900.553	-0.1880	CMCC-CM	554.140	-0.5004
CMCC-CESM	802.127	-0.2768	CMCC-CMS	586.343	-0.4713
CMCC-CM	881.033	-0.2056	CanESM2	535.690	-0.5170
CMCC-CMS	914.760	-0.1752	CSIRO-Mk3-6-0	513.887	-0.5367
CNRM-CM5	936.450	-0.1557	GFDL-ESM2G	509.053	-0.5410
HadGEM2-CC	869.843	-0.2157	INMCM4	579.707	-0.4773
INMCM4	897.783	-0.1905	IPSL-CM5A-LR	506.030	-0.5438
IPSL-CM5A-MR	982.630	-0.1140	IPSL-CM5A-MR	510.977	-0.5393
MIROC-ESM	795.803	-0.2825	MIROC-ESM	511.707	-0.5386
MIROC-ESM-CHEM	1082.220	-0.0242	MIROC-ESM-CHEM	496.200	-0.5526
MIROC5	909.600	-0.1799	MIROC5	519.180	-0.5319
MPI-ESM-LR	867.647	-0.2177	MPI-ESM-LR	533.030	-0.5194
MPI-ESM-MR	915.903	-0.1742	MPI-ESM-MR	573.900	-0.4826
MRI-CGCM3	795.803	-0.2825	MRI-CGCM3	532.210	-0.5201

6.1.4 Análisis Estadístico: Coeficiente de Variación (CV) y Coeficiente de Asimetría de las series de precipitaciones.

En la Tabla 33 se muestran los valores estimados para la serie completa de precipitaciones de los coeficientes de variación y de asimetría para todos los modelos contemplados y por los dos métodos de regionalización de AEMET.

En términos del coeficiente de variación, para el método Análogos los modelos presentan resultados homogéneos con poca dispersión de los valores; de igual forma ocurre con los resultados de los modelos regionalizados por el método SDSM. Así mismo, para ambos métodos los errores en el CV resultan ser negativos, indicando que los valores de este coeficiente son menores que el de los datos observados. Esto en últimas está reflejando que el clima que simulan los modelos tiene una menor variabilidad que la del clima real.

En cuanto al coeficiente de asimetría, lo que se busca indicar es que tan bien están representados los valores extremos del clima simulado con respecto del observado. Los resultados de analizar las series completas de precipitaciones para todos los modelos y por los métodos de regionalización, indican que en general el método Análogos presenta unos valores más altos del CS que en SDSM (salvo en el modelo ACCESS1-3) pero acercándose más al observado. Esto se traduce en general que el método de análogos está representando un poco mejor la extremalidad del clima que el método SDSM, pero aún así la extremalidad simulada por estos modelos sigue siendo inferior a la real.

Tabla 33. Coeficiente de variación y de asimetría de modelos disponibles por el Método de Regresión y Análogos, Respectivamente

MODELO	Análogos				SDSM			
	CV	Error CV	CS	Error CS	CV	Error CV	CS	Error CS
OBS_Spain02	2.439	-	5.745	-	2.439	-	5.745	-
ACCESS1-0	1.259	-0.484	2.393	-0.584	1.277	-0.477	2.590	-0.549
ACCESS1-3	1.349	-0.447	2.631	-0.542	1.668	-0.316	1.509	-0.737
BCC-CSM1-1	1.367	-0.439	2.601	-0.547	1.667	-0.317	1.446	-0.748
BCC-CSM1-1-M	1.515	-0.379	2.942	-0.488	1.644	-0.326	1.525	-0.735
BNU-ESM	1.430	-0.414	2.804	-0.512	1.656	-0.321	1.468	-0.745
CMCC-CESM	1.391	-0.430	2.583	-0.550	1.626	-0.333	1.436	-0.750
CMCC-CM	1.439	-0.410	2.841	-0.506	1.718	-0.296	1.573	-0.726
CMCC-CMS	1.383	-0.433	2.793	-0.514	1.735	-0.289	1.578	-0.725
CNRM-CM5	1.335	-0.453	2.814	-0.510	1.761	-0.278	1.649	-0.713
HadGEM2-CC	1.246	-0.489	2.407	-0.581	1.528	-0.373	1.319	-0.770
INMCM4	1.340	-0.450	2.766	-0.519	1.706	-0.301	1.500	-0.739
IPSL-CM5A-MR	1.304	-0.465	2.563	-0.554	1.686	-0.309	1.433	-0.751
MIROC-ESM	1.552	-0.363	3.193	-0.444	1.718	-0.295	1.565	-0.728
MIROC-ESM-CHEM	1.277	-0.477	2.590	-0.549	1.758	-0.279	1.642	-0.714
MIROC5	1.200	-0.508	2.293	-0.601	1.732	-0.290	1.524	-0.735
MPI-ESM-LR	1.402	-0.425	2.703	-0.530	1.684	-0.309	1.494	-0.740
MPI-ESM-MR	1.406	-0.424	2.908	-0.494	1.627	-0.333	1.426	-0.752

MRI-CGCM3	1.552	-0.363	3.193	-0.444	1.702	-0.302	1.499	-0.739
-----------	-------	--------	-------	--------	-------	--------	-------	--------

6.1.5 Análisis Estadístico: Días sin precipitación (DsP).

La Tabla 34 presenta los resultados obtenidos para las proyecciones de los modelos por los dos métodos de regresión de la AEMET en cuanto a los días de no lluvia con respecto a los valores observados en Spain02 V.05.

De acuerdo con Garijo, Mediero, & Garrote, (2018) cuánto más humedad y precipitación menos días sin precipitación hay respecto de las observaciones en el método de regionalización de Análogos; tal y como sucede con los resultados que se obtienen y que son mostrados en la tabla en mención. Esto sugiere, por lo tanto, que los modelos están simulando más días con lluvia de los que hay realmente: haciendo claridad en que además los días en los que las precipitaciones estaban por debajo de 0.1 mm se eliminaron y se consideraron días sin lluvia.

El método SDSM en cambio, presenta valores mucho más parecidos respecto de las observaciones para días sin lluvia, con errores generalizados y con signo positivo, lo que se traduce en que en últimas hay menos días con lluvia al año comparado con la realidad.

Tabla 34. Días sin precipitación de modelos disponibles por el Método de Regresión y Análogos, respectivamente.

ANÁLOGOS			SDSM		
MODELO	DsP anual	Error DsP anual	MODELO	DsP anual	Error DsP anual
OBS_Spain02	191		OBS_Spain02	191	
ACCESS1-0	62	-0.68	ACCESS1-3	44	-0.77
ACCESS1-3	72	-0.62	BCC-CSM1-1-M	253	0.32
BCC-CSM1-1	57	-0.70	BNU-ESM	254	0.33
BCC-CSM1-1-M	70	-0.63	CMCC-CESM	249	0.30
BNU-ESM	63	-0.67	CMCC-CM	252	0.32
CMCC-CESM	72	-0.63	CMCC-CMS	249	0.30
CMCC-CM	68	-0.64	CanESM2	256	0.34
CMCC-CMS	65	-0.66	CSIRO-Mk3-6-0	260	0.36
CNRM-CM5	53	-0.72	GFDL-ESM2G	261	0.36
HadGEM2-CC	61	-0.68	INMCM4	237	0.24
INMCM4	59	-0.69	IPSL-CM5A-LR	258	0.35
IPSL-CM5A-MR	58	-0.70	IPSL-CM5A-MR	257	0.34
MIROC-ESM	76	-0.60	MIROC-ESM	258	0.35
MIROC-ESM-CHEM	44	-0.77	MIROC-ESM-CHEM	261	0.37
MIROC5	49	-0.75	MIROC5	260	0.36
MPI-ESM-LR	63	-0.67	MPI-ESM-LR	255	0.33
MPI-ESM-MR	57	-0.70	MPI-ESM-MR	250	0.31
MRI-CGCM3	76	-0.60	MRI-CGCM3	257	0.34

6.2 Corrección del Sesgo

A raíz de que los resultados que se obtienen de las proyecciones por ambos métodos de regresión no son lo suficientemente buenos como para realizar una modelación hidrológica confiable, es necesario realizar la corrección del sesgo (*bias correction* en inglés) para la zona de estudio en la cuenca del río San Nicolau con el objetivo de obtener resultados que por lo menos sean acordes a la magnitud de los valores de las observaciones obtenidos en Spain02 V.0.5.

6.2.1 Resultados obtenidos para las proyecciones climáticas con Corrección del Sesgo

Luego de corregir el sesgo de las proyecciones climáticas por el método de *Quantile Mapping*, los resultados que se obtienen para las series de precipitaciones y temperaturas mejoran significativamente. Como se verá en la Tabla 35, los errores en la media de la precipitación se aproximan a cero, lo que indica que los valores medios de los modelos se parecen a las observaciones.

Tabla 35. Días sin precipitación de modelos disponibles por el Método de Regresión y Análogos, respectivamente.

ANÁLOGOS	P anual (mm)	Error Media	SDSM	P anual (mm)	Error Media
OBS_Spain02	1109.108		OBS_Spain02	1109.108	
ACCESS1-0	1143.615	0.0311	ACCESS1-3	1133.064	0.0216
ACCESS1-3	1119.601	0.0095	BCC-CSM1-1-M	1166.368	0.0516
BCC-CSM1-1	1129.656	0.0185	BNU-ESM	1173.059	0.0577
BCC-CSM1-1-M	1136.527	0.0247	CMCC-CESM	1153.277	0.0398
BNU-ESM	1133.558	0.0220	CMCC-CM	1165.684	0.0510
CMCC-CESM	1117.513	0.0076	CMCC-CMS	1158.096	0.0442
CMCC-CM	1120.467	0.0102	CanESM2	1176.593	0.0608
CMCC-CMS	1124.657	0.0140	CSIRO-Mk3-6-0	1147.865	0.0349
CNRM-CM5	1150.621	0.0374	GFDL-ESM2G	1164.142	0.0496
HadGEM2-CC	1125.732	0.0150	INMCM4	1136.270	0.0245
INMCM4	1116.855	0.0070	IPSL-CM5A-LR	1166.357	0.0516
IPSL-CM5A-MR	1120.658	0.0104	IPSL-CM5A-MR	1142.944	0.0305
MIROC-ESM	1144.880	0.0323	MIROC-ESM	1154.801	0.0412
MIROC-ESM-CHEM	1133.064	0.0216	MIROC-ESM-CHEM	1180.224	0.0641
MIROC5	1142.548	0.0302	MIROC5	1168.936	0.0539
MPI-ESM-LR	1134.123	0.0226	MPI-ESM-LR	1154.675	0.0411
MPI-ESM-MR	1127.909	0.0170	MPI-ESM-MR	1161.683	0.0474
MRI-CGCM3	1144.880	0.0323	MRI-CGCM3	1165.499	0.0508

Lo anterior se confirma en la **Figura 63** y **Figura 64** para el método de Análogos y SDSM, respectivamente. En ambas gráficas lo que se aprecia es que no todos los modelos se ajustan bien a la estacionalidad del clima real.

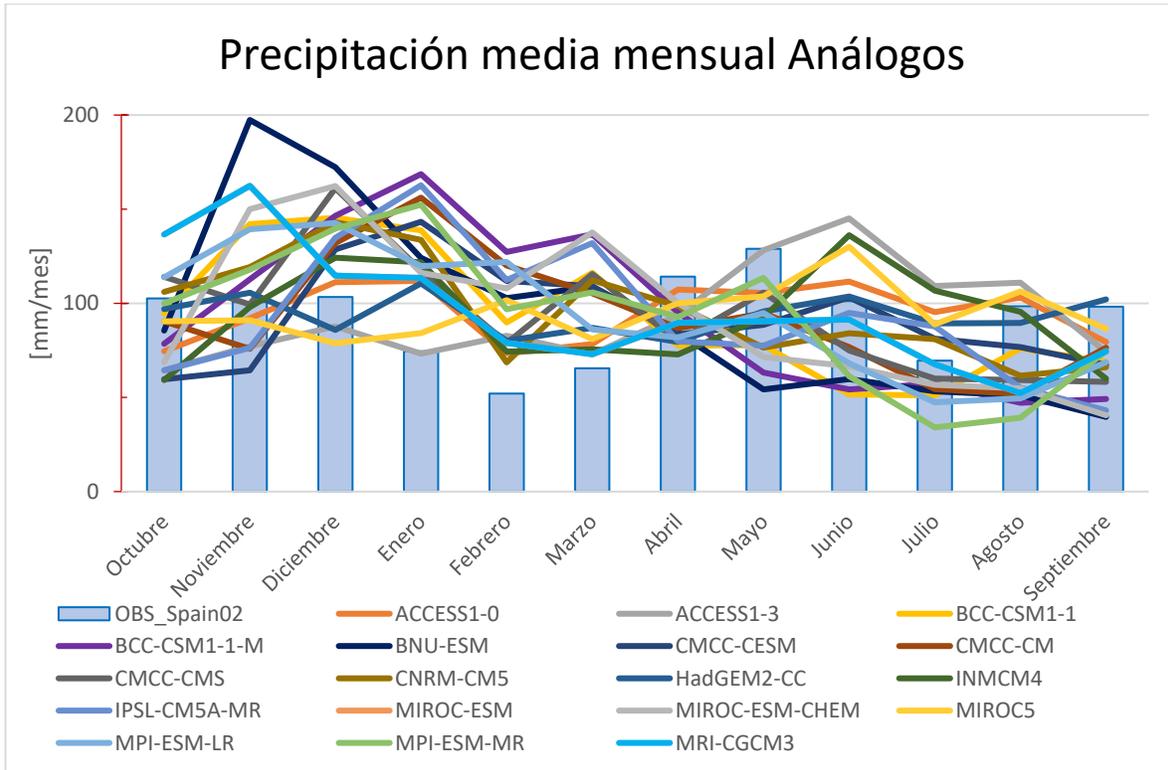


Figura 63. Precipitaciones medias mensuales con corrección del sesgo: Método Análogos.

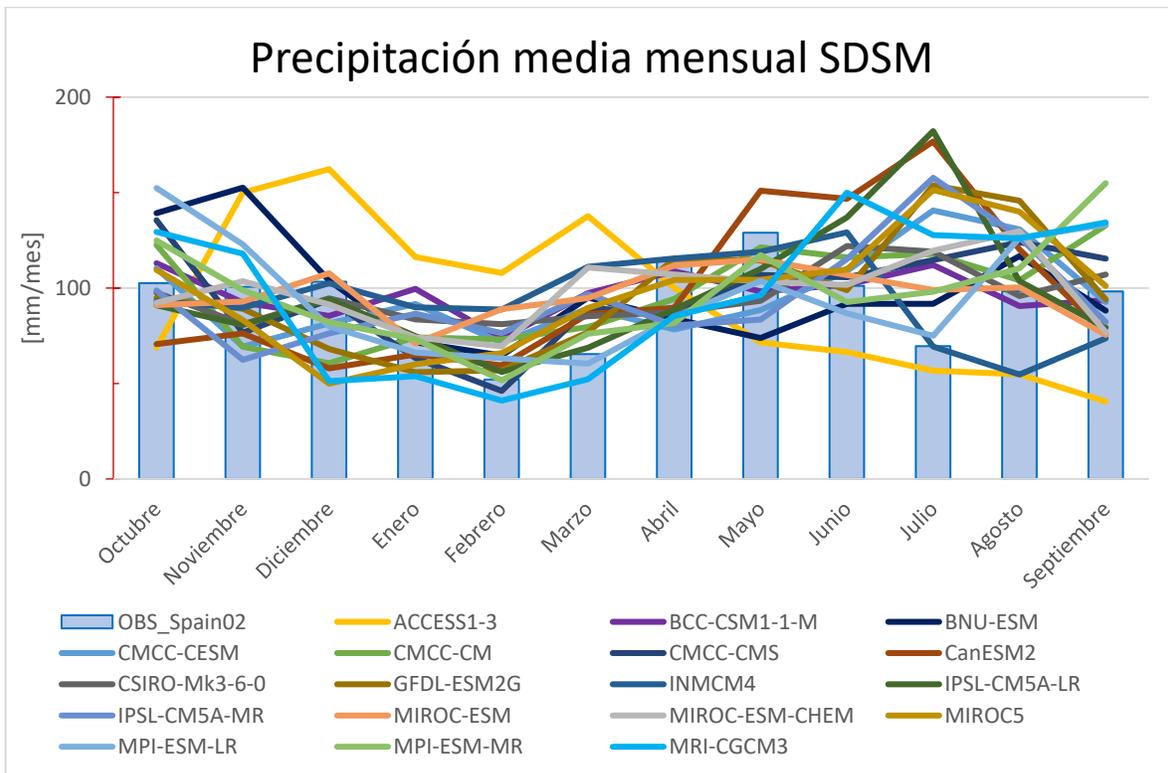


Figura 64. Precipitaciones medias mensuales con corrección del sesgo: Método SDSM.

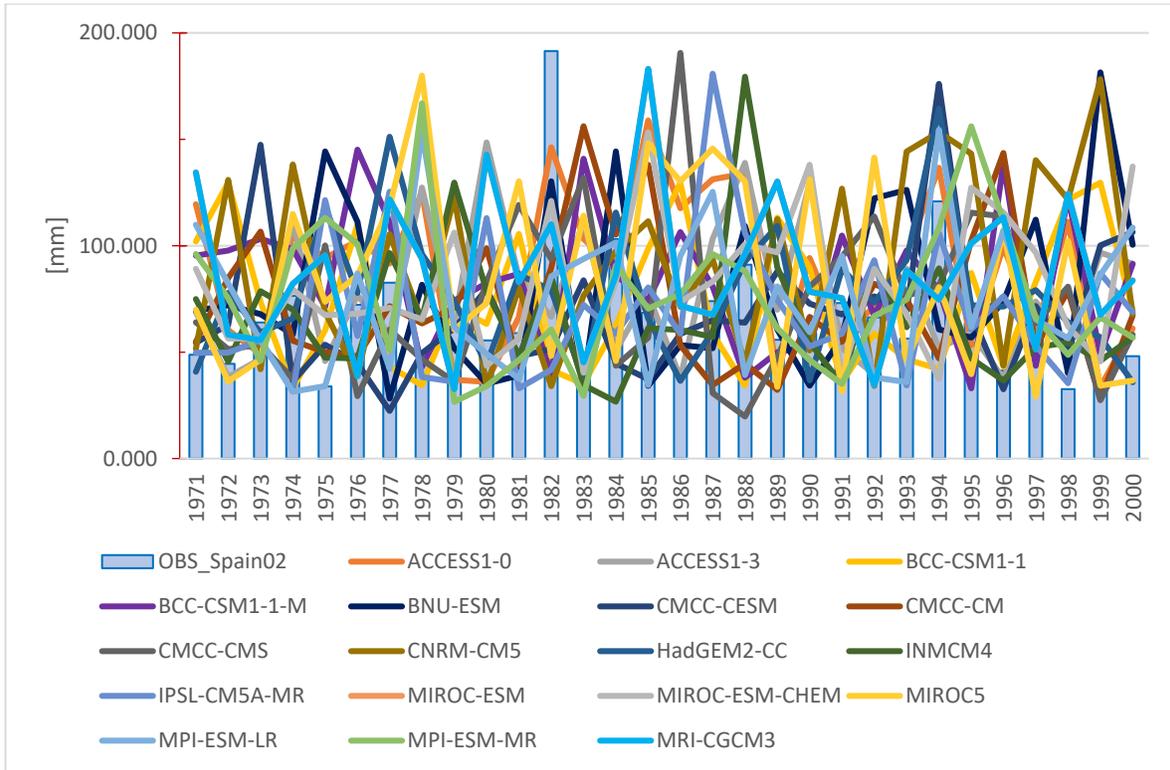


Figura 65. Precipitaciones máximas anuales con corrección del sesgo: Método SDSM.

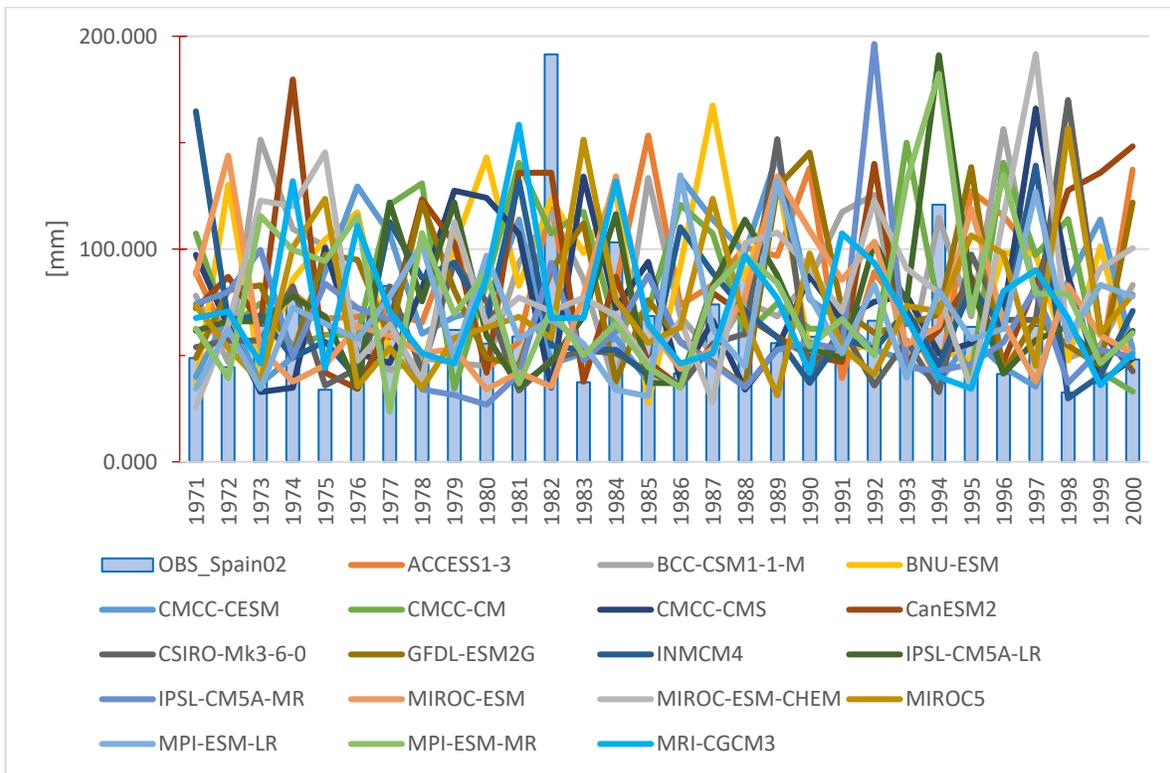


Figura 66. Precipitaciones máximas anuales con corrección del sesgo: Método SDSM.

En las anteriores figuras se observa que los valores de las precipitaciones máximas anuales dejan de subestimarse en general para ambos métodos de regionalización, pero lo que se observa es que presentan una mayor variabilidad si se compara modelo a modelo por cada uno de los métodos.

Con respecto a las temperaturas, en general todos los modelos y por ambos métodos de regionalización son bastante bien representadas, con lo cual no supone mayor problema. Debido a esto, es que la decisión para la selección de los modelos dependerá exclusivamente de la variable precipitación. Como se observa en la **Figura 67** y **Figura 68**.

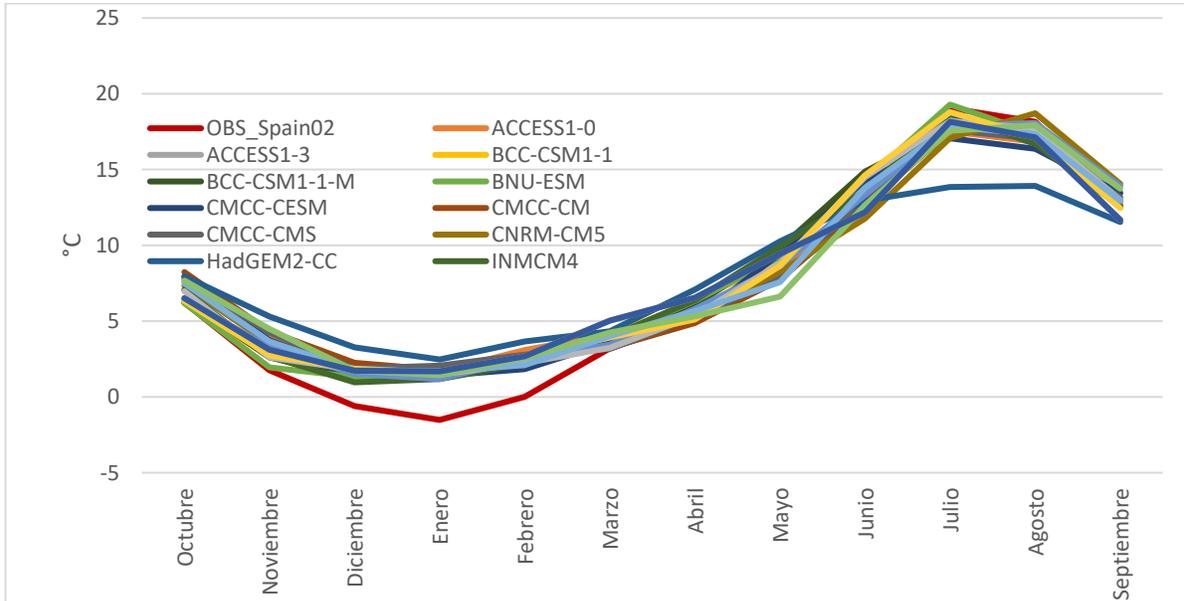


Figura 67. Temperaturas medias mensuales con corrección del sesgo: Método Análogos.

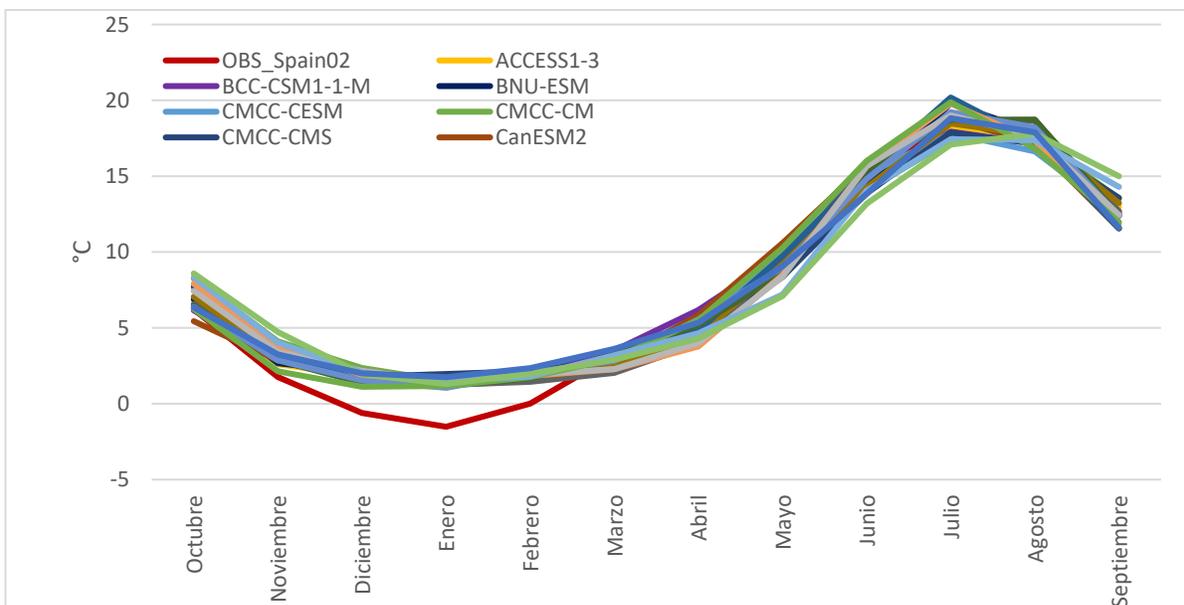


Figura 68. Temperaturas medias mensuales con corrección del sesgo: Método SDSM.

Referente al estadístico que estima los días sin precipitaciones, en general y con respecto a las series sin corregir, los resultados mejoran drásticamente para el método de análogos de modo que los días sin lluvia son muy similares a los valores observados, no siendo así para las proyecciones estimadas por el método SDSM en los que los resultados están mostrando que todos los días llueve, salvo para el modelo ACCESS1-3 en donde se estiman 193 días sin precipitación, muy cercano a los 191 días de la serie de Spain02 por año. Lo anterior se puede detallar en la Tabla 36.

Tabla 36. Días sin precipitación de modelos disponibles por el Método de Regresión y Análogos con corrección de sesgo, respectivamente.

ANÁLOGOS			SDSM		
MODELO	DsP anual	Error DsP anual	MODELO	DsP anual	Error DsP anual
OBS_Spain02	191		OBS_Spain02	191	
ACCESS1-0	192	0.00	ACCESS1-3	193	0.01
ACCESS1-3	189	-0.01	BCC-CSM1-1-M	0	-1.00
BCC-CSM1-1	190	-0.01	BNU-ESM	0	-1.00
BCC-CSM1-1-M	194	0.01	CMCC-CESM	0	-1.00
BNU-ESM	191	0.00	CMCC-CM	0	-1.00
CMCC-CESM	192	0.01	CMCC-CMS	0	-1.00
CMCC-CM	193	0.01	CanESM2	0	-1.00
CMCC-CMS	190	-0.01	CSIRO-Mk3-6-0	0	-1.00
CNRM-CM5	192	0.01	GFDL-ESM2G	0	-1.00
HadGEM2-CC	193	0.01	INMCM4	0	-1.00
INMCM4	190	-0.01	IPSL-CM5A-LR	0	-1.00
IPSL-CM5A-MR	189	-0.01	IPSL-CM5A-MR	0	-1.00
MIROC-ESM	190	-0.01	MIROC-ESM	0	-1.00
MIROC-ESM-CHEM	193	0.01	MIROC-ESM-CHEM	0	-1.00
MIROC5	190	-0.01	MIROC5	0	-1.00
MPI-ESM-LR	188	-0.02	MPI-ESM-LR	0	-1.00
MPI-ESM-MR	193	0.01	MPI-ESM-MR	0	-1.00
MRI-CGCM3	190	-0.01	MRI-CGCM3	0	-1.00

6.2.2 Modelos de cambio climático seleccionados

Finalmente, luego del análisis gráfico y estadístico realizado previamente y luego de corregir el sesgo, se procede a seleccionar los modelos de cambio climático con los cuales se correrá el modelo hidrológico previamente calibrado y validado para la cuenca del río San Nicolau.

La decisión en este caso está influenciada por los modelos que mejor representan el comportamiento estacional del clima, porque luego de corregir el sesgo todos los modelos mejoran en todos los indicadores mencionados anteriormente, salvo casi todos los modelos regionalizados por el método SDSM en el estadístico de días sin precipitación simulados, para los que con la corrección simula que todos los días llueve. Esta condición para la regionalización por SDSM hace que las proyecciones no deban ser utilizadas en la modelación hidrológica y más sabiendo que se debe hacer una traslación de estos resultados de la

estación 9741 de la AEMET a las de Llebreta y Contraix, con las cuales se ha hecho el proceso de calibración en la cuenca de estudio.

Los modelos seleccionados por tanto serán los regionalizados por el método de análogos, que por lo general presentan mejor el comportamiento del clima en la región tanto por ajuste estacional como por los demás estadísticos evaluados, y en especial por los días sin precipitaciones. Estos son:

- ACCES1-0
- CNRM-CM5
- MIROC5

En la **Figura 69** se presentan los valores medios mensuales de la precipitación para los modelos de cambio climático seleccionados y con los cuales se realizará la proyección futura del clima para el escenario RCP 8.5.

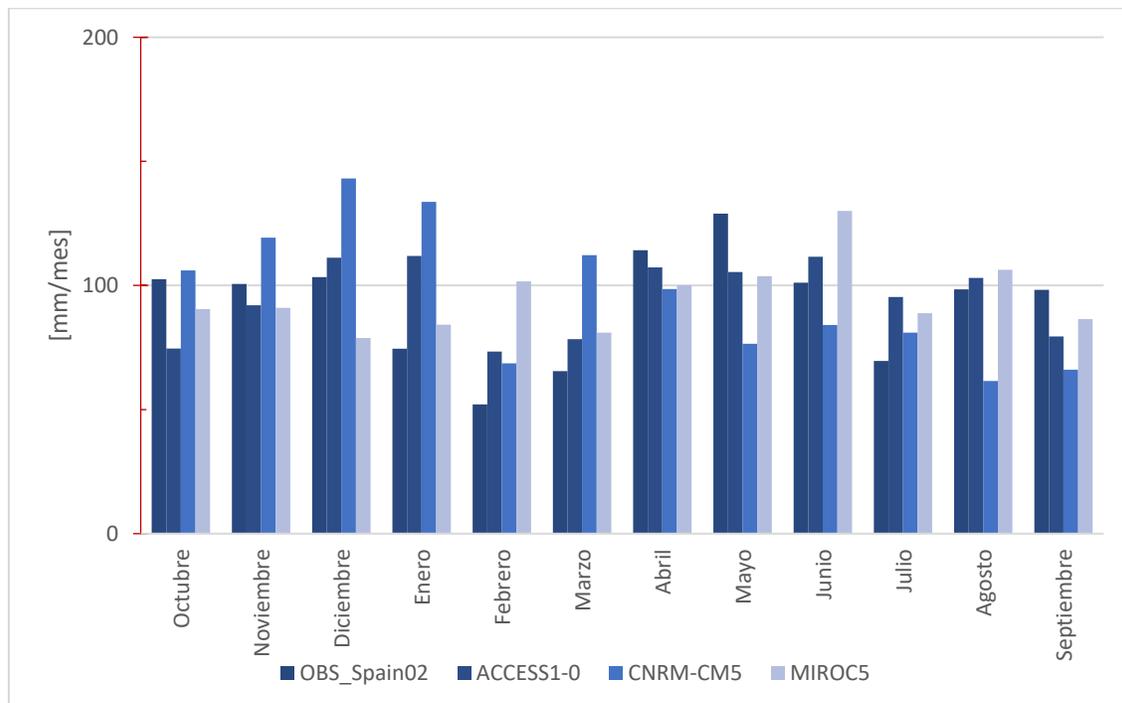


Figura 69. Precipitaciones medias mensuales con corrección del sesgo: Modelos Seleccionados.

La **Figura 70** muestra los resultados a más detalle de los valores de las temperaturas medias mensuales luego de haber realizado la corrección del sesgo.

Es de destacar, nuevamente el buen comportamiento que presentan en general todos los modelos seleccionados de la variable temperatura, que se convierte en indispensable para el cálculo de la evapotranspiración de referencia por el método de Hargreaves y que al igual que las precipitaciones son input del modelo hidrológico.

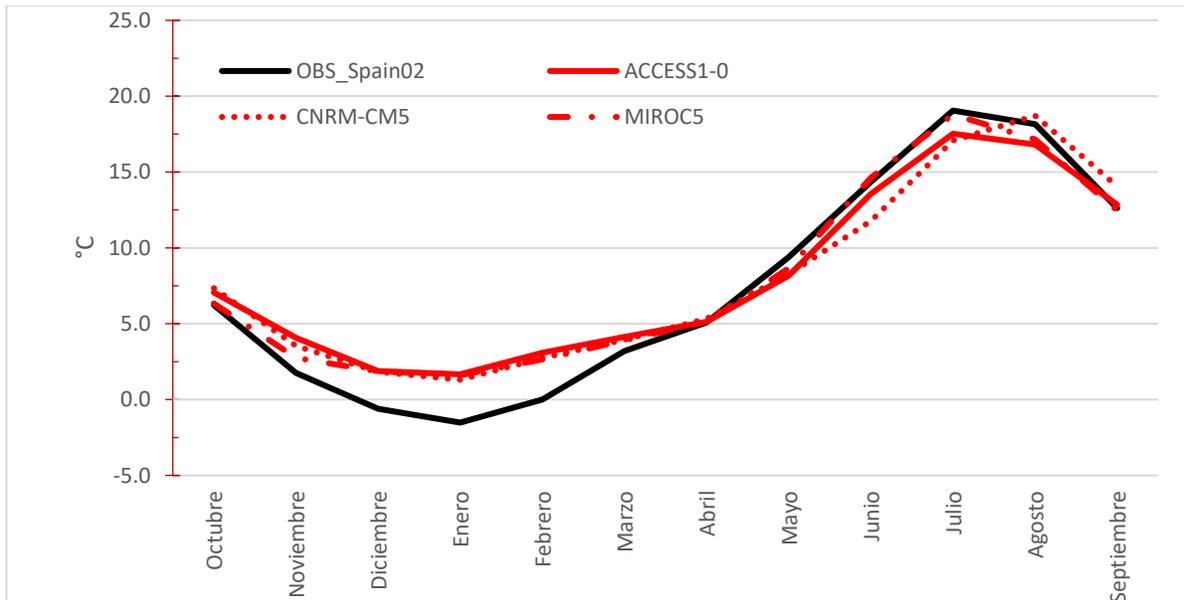


Figura 70. Temperaturas medias mensuales con corrección del sesgo: Modelos Seleccionados

6.3 Resultados: Modelación hidrológica con escenario de cambio climático RCP8.5

Una vez seleccionados los modelos de cambio climático para el escenario RCP8.5 y con horizonte temporal de 2071-2100, se procede a realizar la modelación hidrológica utilizando el mejor modelo calibrado para la cuenca del río San Nicolau, en este caso el que tiene 13 estaciones de temperatura en total y 2 estaciones de precipitación.

Los resultados obtenidos para las proyecciones futuras del clima se presentarán para cada una de las variables de mayor relevancia en la cuenca de San Nicolau como lo son la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración, los caudales el almacenamiento de nieve.

6.3.1 Precipitación

Para la variable precipitación, los modelos de cambio climático pronostican que en general la componente líquida o lluvia tenderá a aumentar para finales de siglo en todos los modelos, tal y como se muestra en la Tabla 37. Siendo el promedio de todos los modelos y de incremento por año de 342 mm aproximadamente. Con respecto a la componente sólida o en forma de nieve, los modelos pronostican una disminución muy importante, con unos porcentajes muy altos, siendo el modelo CRNM-CM5 el más pesimista en este sentido con una reducción del 479.7%, y el ACCESS1-0 el menos pesimista.

Estos cambios tan marcados en las componentes de la precipitación hacen prever que el comportamiento del ciclo hidrológico de la cuenca del río San Nicolau será muy diferente a las condiciones que se presentan en periodo de control, porque esta, al ser el input principal y el más influyente terminará por afectar no solo en

términos de cantidad la descarga de la cuenca, sino también en términos de régimen de caudales y los procesos de acumulación y fusión de nieve.

Tabla 37. Precipitación media areal en forma de lluvia y de nieve para periodo de control y futuro.

MODELO	Precipitación Total			Precipitación Líquida			Precipitación Sólida		
	Control	Futuro	% Variación	Control	Futuro	% Variación	Control	Futuro	% Variación
Observaciones	2113.8			1273.1	-	-	840.7	-	-
ACCESS1-0	1634.5	1616.2	-1.13%	1072.0	1386.4	22.7%	562.5	229.8	-144.8%
CNRM-CM5	1624.7	1433.3	-13.35%	974.5	1321.3	26.2%	649.2	112.0	-479.7%
MIROC5	1623.7	1674.6	3.04%	1169.1	1544.4	24.3%	454.6	130.2	-249.2%

En la **Figura 71** se muestra la serie de precipitaciones para los 30 años de periodo de control y los 30 años de periodo futuro (2071-2100). Allí se observa que para los 30 años del futuro las precipitaciones irán disminuyendo progresivamente como lo muestra la línea de tendencia del modelo ACCESS1-0. Lo anterior podría interpretarse como una contradicción, pero no es así, puesto que, si bien los modelos simulan que habrá más lluvia en promedio comparado con el periodo de control, asimismo se está mostrando que luego de alcanzar ese incremento en media, si se analiza la información año a año, la precipitación tenderá a decrecer como se marca.

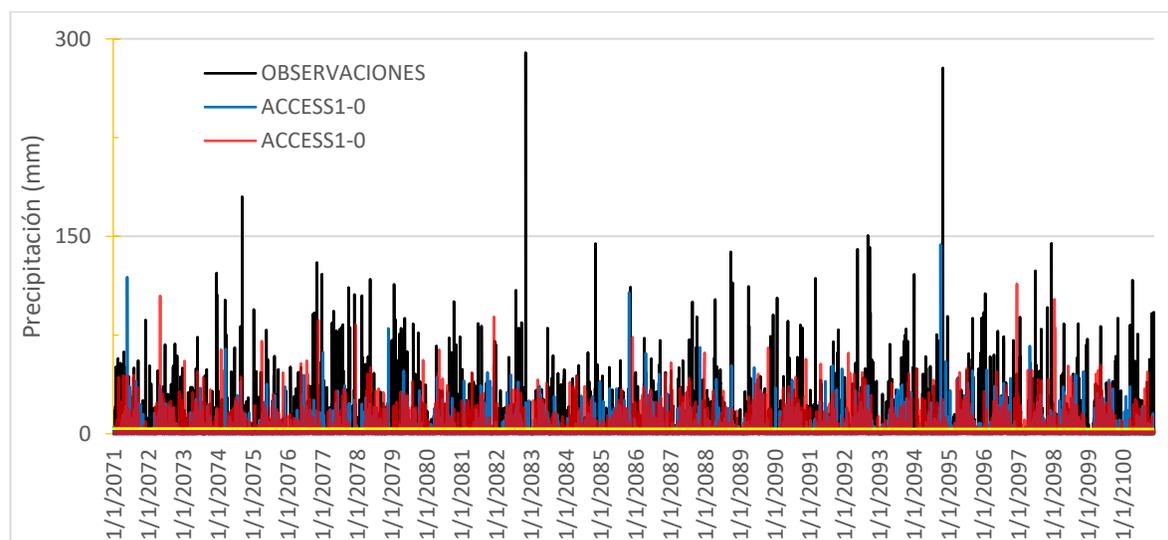


Figura 71. Serie de precipitación para horizonte 2071-2100.

En la **Figura 72** se muestra la precipitación media mensual para periodo de control y modelos de cambio climático. Los modelos están mostrando que en general mes a mes los valores de precipitación simulados serán más altos de noviembre a abril y en general en los meses de primavera y verano las precipitaciones serán menores. Dicho de otra manera, tenderá a llover más en los meses más fríos y menos en los meses más cálidos, salvo en el modelo ACCESS1-0, que por lo general marca que lloverá más que en periodo de control en los meses de primavera y verano. En la **Figura 73** se muestra la componente de la precipitación en forma de nieve o forma sólida, de allí se puede decir que los modelos de cambio climático pronostican una disminución muy importante en general para todo el año con respecto a lo representado por los modelos en periodo de control.

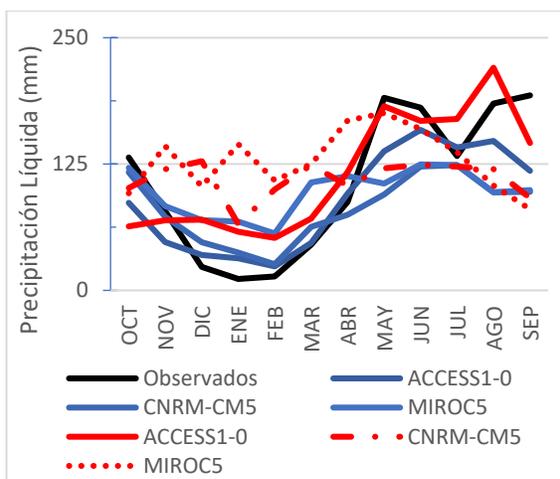


Figura 72. Precipitación areal mensual en forma de lluvia para escenario de cambio climático RCP8.5 en periodo de control (azul) y periodo futuro (rojo).

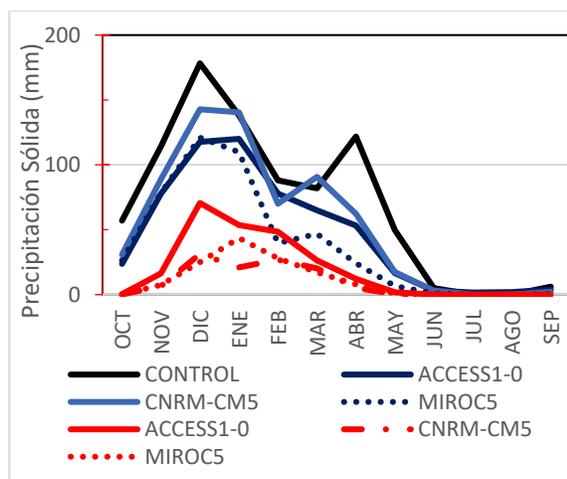


Figura 73. Precipitación areal mensual en forma de nieve para escenario de cambio climático RCP8.5 en periodo de control (azul) y periodo futuro (rojo).

6.3.2 Temperaturas

En cuanto a las temperaturas que se esperan en la región, las proyecciones muestran un incremento sustancial tanto en los valores máximos como en los valores mínimos, siendo 4.26°C para el primer caso y 2.42°C para el segundo caso. Esta información se puede visualizar en la Tabla 38.

Tabla 38. Temperaturas máximas y mínimas medias anuales para periodo de control y futuro.

	Temperatura Máxima			Temperatura Mínima			
	Periodo Control	Periodo Futuro	ΔT °C	Periodo Control	Periodo Futuro	ΔT °C	
Observados	5.20	-	-	-1.72	-	-	
ACCESS1-0	5.23	9.29	4.06	-1.70	0.74	2.43	
CNRM-CM5	5.20	9.49	4.29	-1.70	0.71	2.41	
MIROC5	5.23	9.66	4.43	-1.70	0.73	2.43	
Incremento Medio Tmax (°C)			4.26	Incremento Medio Tmin (°C)			2.42

En la **Figura 74** y **Figura 75** se presentan los valores mensuales de las temperaturas máximas y mínimas respectivamente para periodo de control y cambio climático. Viéndose como la estacionalidad sigue estando bien representada, pero también cómo el incremento en las temperaturas es mucho mayor en los meses más cálidos correspondientes al verano (aprox. 5°C) que en los demás meses y estaciones (aprox. 3°C) en temperaturas máximas, y en temperaturas mínimas con 3°C en verano y 2.5°C en los demás meses.

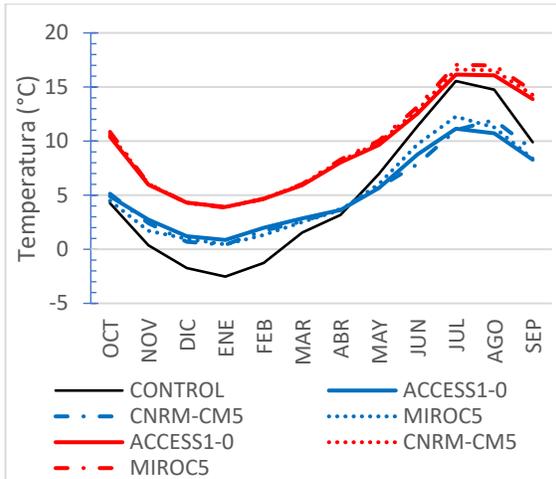


Figura 74. Temperaturas máximas mensuales trasladadas a Est. Cotnraix para escenario de cambio climático RCP8.5 en periodo de control (azul) y periodo futuro (rojo).

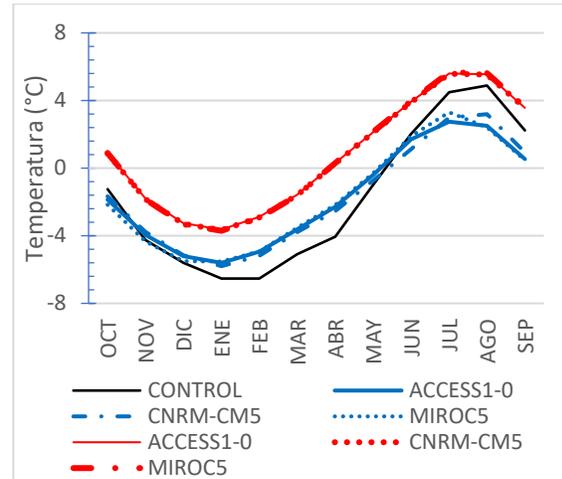


Figura 75. Temperaturas mínimas mensuales trasladadas a Est. Contraix para escenario de cambio climático RCP8.5 en periodo de control (azul) y periodo futuro (rojo).

6.3.3 Evapotranspiración

Al igual que se presenta un incremento en las temperaturas, de la misma manera ocurre con la evapotranspiración potencial, pues son variables que están correlacionadas entre sí y van a tender a responder de forma similar. En la Tabla 39 se presentan los valores medios anuales de la variable ETP para la zona de estudio en periodo de control y con escenarios de cambio climático con horizonte temporal 2071-2100.

Como se observa, de 656 mm/año en periodo de control se pasa a 865 mm/año en media para todos los modelos, lo que representa un incremento de 209 mm/año que equivalen a un 24.2%. Este incremento en la ETP se reflejará en las aportaciones que se presentan en la cuenca del río San Nicolau tal y como se presentará más adelante.

Tabla 39. ETP media anual para escenario de cambio climático RCP8.5.

MODELO	Periodo Control	Periodo Futuro	Δ ETP (mm)
Observados	701.57	-	-
ACCESS1-0	649.85	847.71	197.85
CNRM-CM5	653.99	866.02	212.03
MIROC5	663.50	880.20	216.70
Incremento Medio (mm)			208.86

La ETP media mensual para periodo de control y los modelos seleccionados para cambio climático se presentan en la **Figura 76**. Una vez más se confirma la influencia de las temperaturas en los valores de la variable, pero sobre todo en el comportamiento estacional de la ETP. Así mismo, se ve como en los meses de primavera y verano se presentan las mayores diferencias entre periodo de control y los modelos de cambio

climático, mientras que en los meses otoño e invierno las diferencias son menos marcadas en los valores medios de ETP.

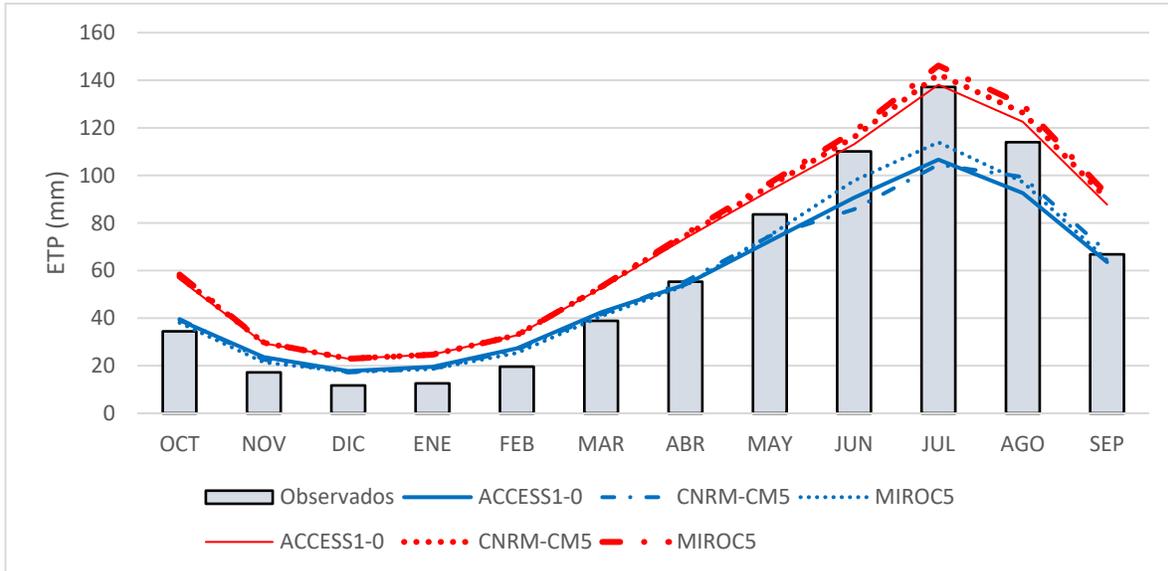


Figura 76. ETP media mensual trasladada a Est. Contraix para escenario de cambio climático RCP8.5 en periodo de control (azul) y periodo futuro (rojo).

6.3.4 Caudales

Con los resultados presentados en el gráfico de caudales medios mensuales que se presentan en la **Figura 77**, se puede decir que sobre los meses de otoño e invierno los caudales tienden a aumentar tomando como referencia el periodo de control, y en los meses de primavera y verano tienden a disminuir, salvo el modelado por el modelo ACCESS 1-0, que se mantiene un poco por encima en los meses de agosto y septiembre.

Adicionalmente, se aprecia como en general la estacionalidad de los caudales generados a partir de las proyecciones es mejor representada que en periodo de control tomando como referencia las observaciones que se obtuvieron por modelación para periodo histórico con el modelo calibrado de la cuenca del río San Nicolau con trece estaciones de temperatura.

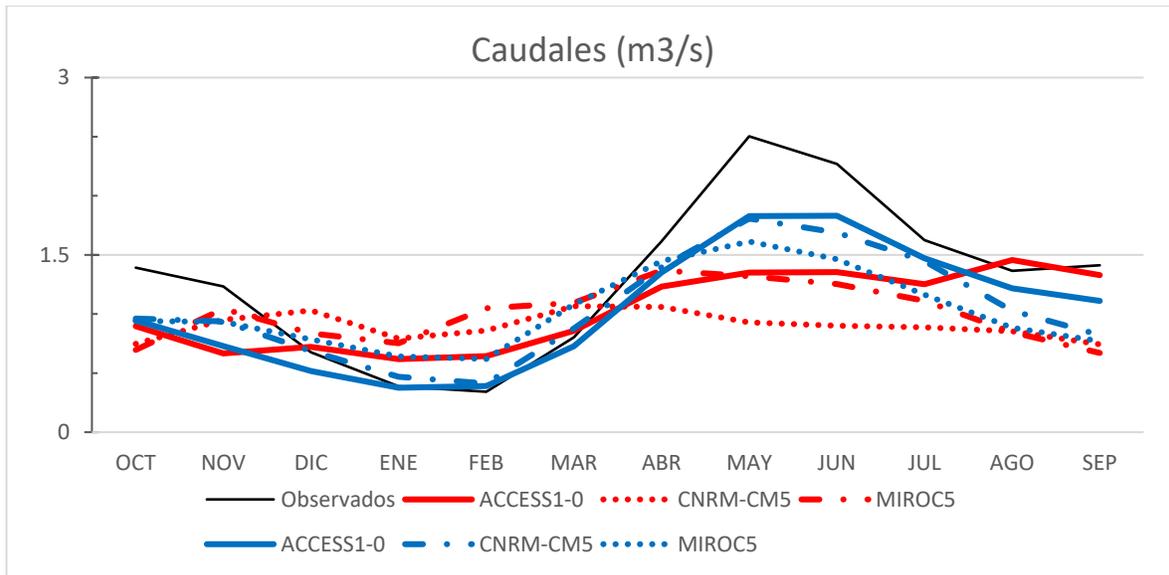


Figura 77. Caudales medios mensuales simulados en TETIS para modelación de cambio climático en periodo de control (azul) y RCP8.5 (rojo).

En valores medios anuales de caudales, en general se espera una leve disminución de todos los modelos en periodo futuro respecto al periodo de control, pero, asimismo tienden a mantenerse por debajo de las observaciones los mismos 30 años de análisis, tal y como se muestra en la Tabla 40. Se debe tener en cuenta que en realidad se realiza la comparación entre los valores simulados por los modelos en periodo de control y periodo futuro, más no con los valores observados reales a partir de las series de SPAIN02, ya que en definitiva esa es la forma como los modelos están captando el clima de la zona. Estos resultados de los caudales medios anuales van en concordancia con la disminución en las precipitaciones y el aumento en la ETP, para la cuenca del río San Nicolau representados mediante los modelos de cambio climático.

Tabla 40. Valores medios de caudales para periodo de control y proyección de cambio climático RCP8.5.

MODELO	PERIODO CONTROL	PERIODO FUTURO	% CAMBIO
Observados	1.3019	-	-
ACCESS1-0	1.0412	1.0315	-0.94%
CNRM-CM5	1.0442	0.9017	-15.81%
MIROC5	1.0285	1.0035	-2.49%

En la **Figura 78** se presenta la gráfica de los caudales para diferentes periodos de retorno utilizando la función de distribución de probabilidad Normal, por su facilidad de implementación. De acuerdo con lo que se ve en la gráfica, en periodo de control los modelos se ajustan de forma adecuada a las observaciones, pero subestimando los valores de caudal máximo, salvo en el caso del modelo MIROC5, en los que sus valores si distan bastante de los valores observados de caudal. En este punto llama la atención que a pesar de que los MCG en periodo de control se aproximan bastante a la media de las observaciones una vez se corrige el sesgo, pero sin embargo en el caso de los modelos ACCESS1-0 Y CNRM-CM5, los caudales máximos son subestimados, y lo contrario en el modelo MIROC5 en donde se sobreestiman los valores máximos; esto es

posible que se deba a la forma en como los modelos climáticos están captando y representando el ciclo hidrológico y el clima de la cuenca.

Para las proyecciones de cambio climático de acuerdo al gráfico de periodo de retorno de los caudales máximos, se ve que en general se espera que estos valores extremos aumenten y sean mucho mayores que los de periodo de control y de las observaciones, esto para el caso del modelo CNRM-CM5 y MIROC5. En el caso del modelo ACCESS1-0, se puede apreciar sus valores máximos se encuentran por debajo de las observaciones, pero a la vez mayores que su homólogo en periodo de control. El modelo MIROC5 en periodo de control y en periodo futuro tiende a permanecer invariante, salvo en los caudales para periodos de retorno más bajos en donde se hacen un poco mayores que en control. Esto en realidad refleja que los valores de caudales máximos serán más altos en el futuro.

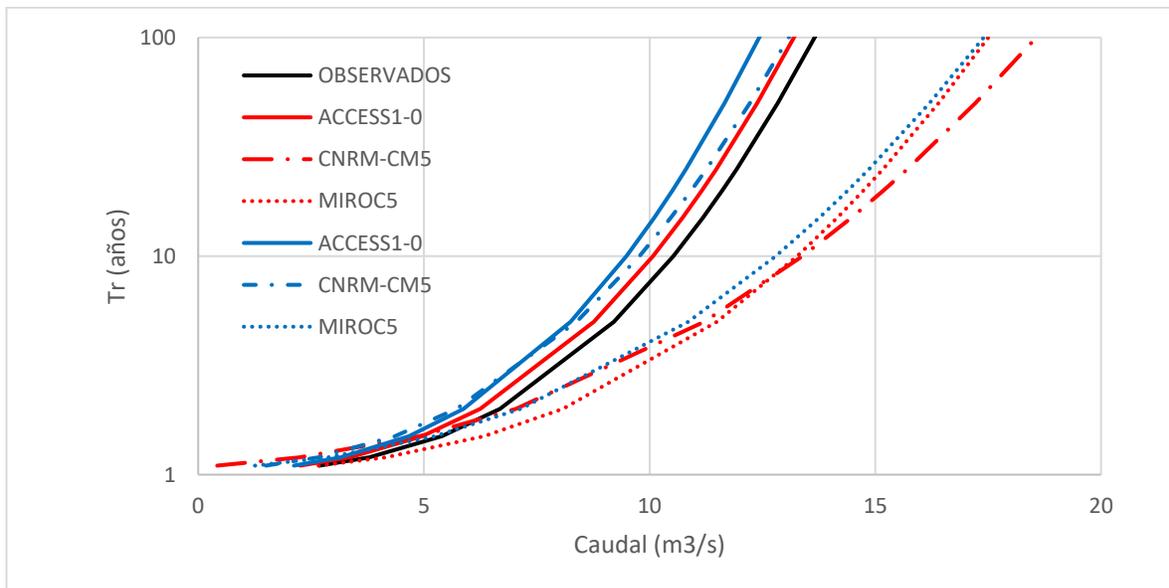


Figura 78. Periodo de retorno de los caudales simulados en TETIS para periodo de control y escenario de cambio climático RCP8.5.

En la **Figura 79** se presenta el gráfico de la curva de caudales máximos ordenados, de la cual se puede decir que en general los modelos simulados en control tienen un crecimiento progresivo hasta alcanzar el valor máximo, salvo el modelo MIROC5 que si presenta un salto repentino que se puede deber a como este está captando los eventos extremos de la zona. En periodo futuro, el modelo ACCESS1-0 mantiene su crecimiento progresivo un poco por encima que su homólogo en periodo de control, lo que significa que los valores máximos que simula serán más altos en el futuro. El modelo CNRM-CM5 en el periodo futuro presenta un comportamiento mucho más agresivo, presentando un cambio brusco en su tendencia que se refleja en un crecimiento más vertiginoso de los caudales máximos con comparación con periodo de control. Por último, el modelo MIROC5 en el futuro tenderá a ser mucho más estable en el reflejo de la estimación de caudales máximos si se le compara con el periodo de control, que como se había mencionado tiene un cambio más brusco.

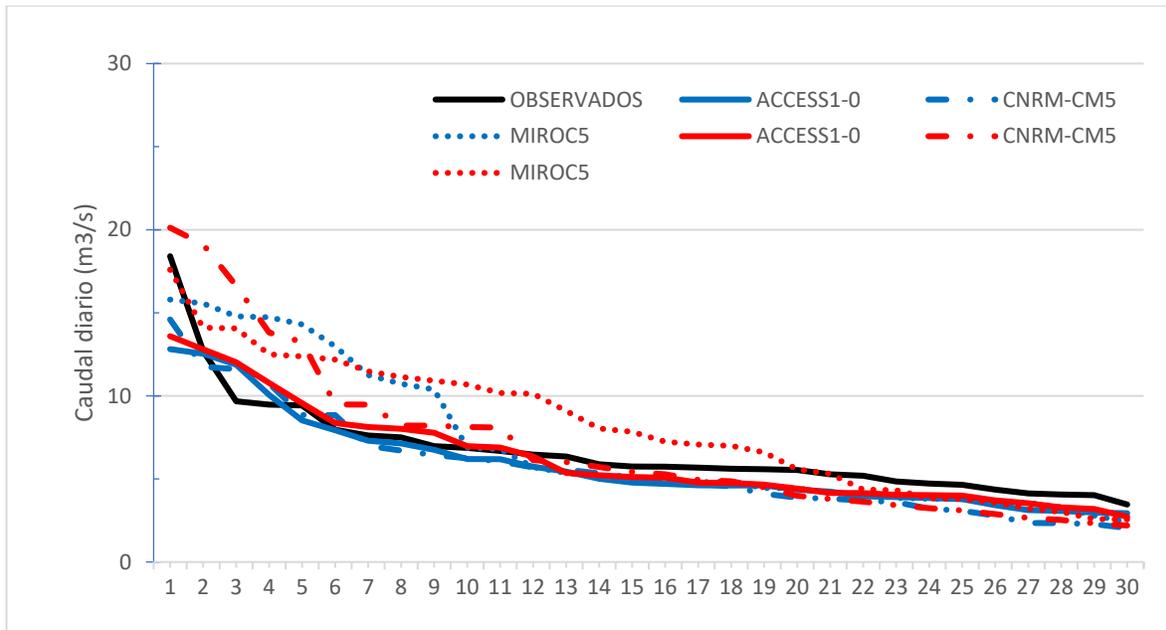


Figura 79. Curva de caudales máximos anuales ordenados observados y simulados en periodo de control (azul) y en periodo futuro (rojo) para escenario de cambio climático RCP8.5.

De lo anterior se puede decir entonces, que cada uno de los modelos está representando un comportamiento diferente en la modelación en periodo de control y en la proyección de cambio climático de los caudales. Esto hace que sea difícil dar un diagnóstico certero de lo que se espera a futuro por la imposibilidad de agregarlos en uno sólo que los represente, sino más bien, se deben analizar de forma conjunta porque como se ha visto la incertidumbre en los resultados esperados es muy grande; a pesar de que lo que parece es igual en todos los modelos es que los caudales tiendan a aumentar para finales de siglo, así como también que sus valores máximos sean un poco más altos y se presenten con más frecuencia en comparación con el periodo de control, de acuerdo a lo que refleja el gráfico de periodo de retorno y caudal.

6.3.5 Almacenamiento de Nieve

La modelación del cambio climático en el episodio futuro en términos del almacenamiento o reserva de nieve de la cuenca del río San Nicolau, muestra una disminución muy fuerte para todos los modelos, siendo el ACCESS1-0 el más optimista de todos en este caso con 289.09 Hm³/año de reserva, y el CNRM-CM5 el más pesimista con una reserva de nieve de 99.13 Hm³/año; teniendo en cuenta que en periodo de control las reservas alcanzan los 1226.78 Hm³ y 1519.24 Hm³ en media por año para los modelos ACCESS1-0 y CNRM-CM5, respectivamente. En cuanto al modelo MIROC5, se espera una disminución en las reservas de nieve e 1020 Hm³ aproximadamente para finales de siglo con respecto al periodo de control.

Los valores de las alturas equivalentes de agua que representan el almacenamiento de nieve se presentan en la Tabla 41.

En la **Figura 80** se presenta la serie de variación del almacenamiento de nieve para los 30 años en periodo de control y en periodo futuro a través de los modelos de cambio climático.

Tabla 41. Reserva de nieve media anual para escenario de cambio climático RCP8.5.

MODELO	Periodo Control (Hm3)	Periodo Futuro (Hm3)	Δ SWE (Hm3)
Observados	202.05	-	-
ACCESS1-0	102.23	24.09	-78.14
CNRM-CM5	126.60	8.26	-118.34
MIROC5	95.03	10.03	-85
Variación reserva media anual (Hm3)			-93.83

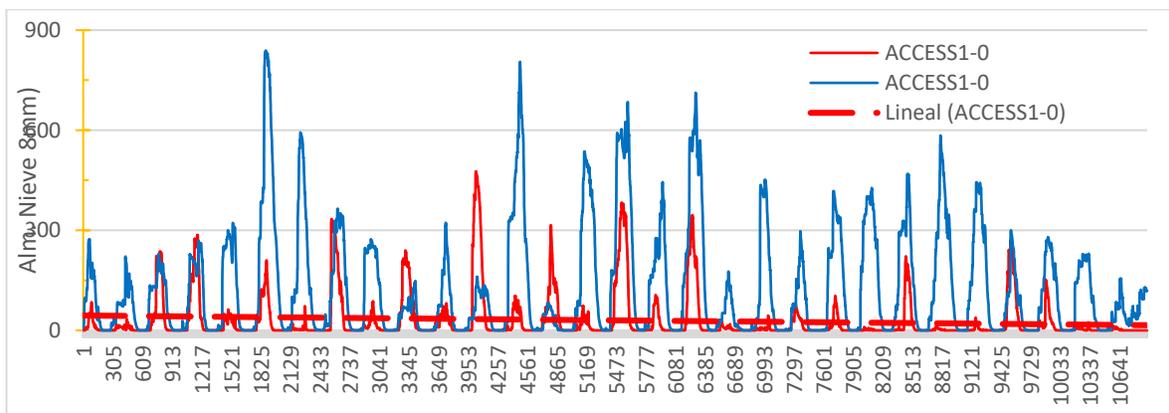


Figura 80. SWE diaria simulada en TETIS para modelo ACCESS1-0 en periodo de control (azul) y periodo futuro (rojo) para escenario de cambio climático RCP8.5.

Además, en la **Figura 80** se representan la línea de tendencia para periodo de control en el modelo ACCESS1-0, viéndose como para los 30 años en común, se marca una tendencia decreciente. Esto significa que la disminución del manto de nieve se acelerará mucho más para finales de siglo, a medida que las temperaturas sigan aumentando y se cambie la estacionalidad de la acumulación y la fusión de la nieve, a tal punto, que se espera así entonces que para principios del próximo siglo sea prácticamente cero.

La **Figura 81** es el reflejo de lo que se ha mencionado anteriormente. En este caso se presenta la altura equivalente de agua (SWE) mensual para periodo de control y periodo futuro para los modelos de cambio climático seleccionados. Allí se aprecia que, a diferencia de las condiciones históricas, en el futuro el proceso de acumulación de nieve se verá retrasado de octubre a noviembre en el caso del modelo ACCESS1-0, CNRM-CM5 y MIROC5, salvo que el primero tiende a tener un mayor crecimiento y desarrollo del manto de nieve.

Con respecto al proceso de fusión de la nieve, se observa como para todos los modelos hay una anticipación en comparación con el periodo de control, pasando de iniciarse a finales de abril o comienzos de mayo, a iniciarse en febrero tanto en ACCESS1-0 como en MIROC5, y a comienzos de marzo para CNRM-CM5.

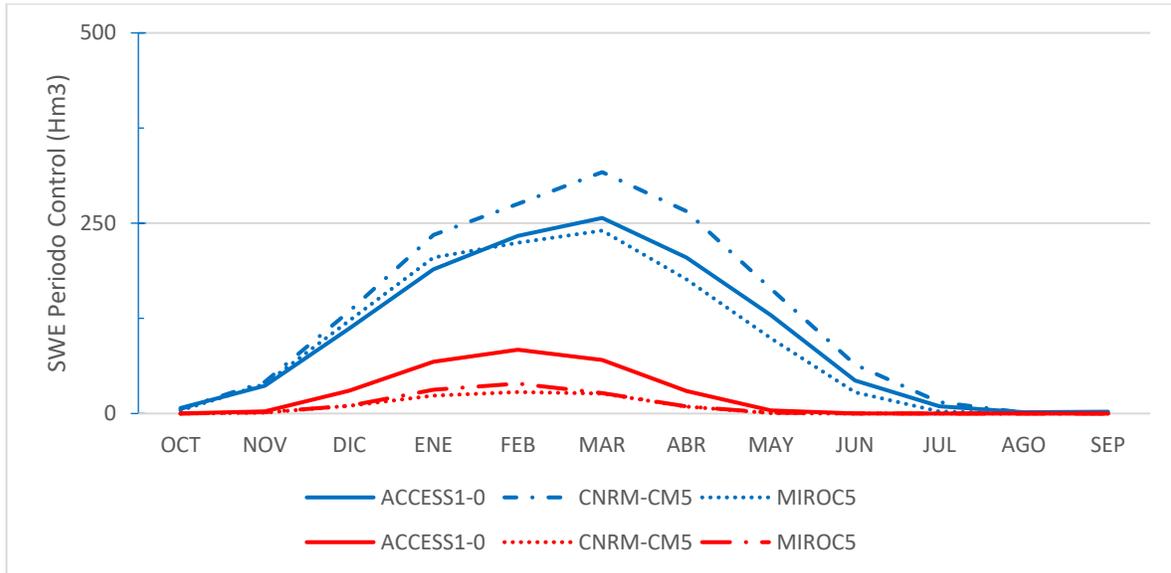


Figura 81. SWE mensual simulada en TETIS para escenario de cambio climático RCP8.5.

La explicación a este adelantamiento en el proceso de fusión, se origina a que como se había comentado, en estos meses tanto la temperatura mínima como la máxima experimentan incrementos de aproximadamente 3 °C a 4 °C respecto al periodo de control.

7 CONCLUSIONES

- ✚ La actualización exacta del modelo hidrológico de la cuenca del Lago Contraix implementado en el proyecto ACOPLA no fue posible realizarla, a pesar de que se partió de la misma información hidrometeorológica, de mapas de parámetros, condiciones iniciales de los almacenamientos. Esto pudo suceder debido a que en la versión 9.0.1 de TETIS se implementó un tanque adicional para las abstracciones iniciales, que de algún modo retocó la estructura original del programa, esto es básicamente que la conceptualización del modelo cambió. Porque si bien es cierto que en el modelo antiguo estas abstracciones iniciales se incluían en el tanque de almacenamiento capilar, y no habría problema en que en el modelo nuevo se agregaran también en este único tanque y representaran los mismos resultados; la realidad demostró que no fue así, con lo cual aún no es claro el por qué no se pudo replicar el resultado en la más reciente versión de TETIS.
- ✚ El nuevo modelo de la cuenca del lago Contraix permitió resolver el problema que se tenía en las aportaciones del interflujo y el flujo base del proyecto ACOPLA, con el resultado presentado en el proyecto ISOTOPOS, en donde a diferencia del primero, el flujo base parecía que era mayor al interflujo. Los resultados de Contraix en la nueva versión de TETIS van en concordancia con lo que se refleja en ISOTOPOS, esto es, la componente del flujo base es mayor al interflujo, con unas aportaciones de 1039.6 mm y 290.5 mm, respectivamente. Esto significa que el flujo base es un 357.9% mayor al interflujo, equivalente a 749.134 mm. Respecto a la descarga observada de 1390.7 mm, el flujo base corresponde al 74.5% del total, mientras que el interflujo equivale al 20.9% del total, el 4.6% restante es la componente asociada a la escorrentía directa. En términos de eficiencia del modelo, el índice de Nash para el nuevo fue de 0.67, considerándose como bueno para la representación de caudales, en validación temporal fue de 0.49, y en espacio-temporal en el punto ATC2 de 0.46, considerados también buenos a pesar del déficit en información disponible. El modelo en la versión anterior de TETIS presentaba igualmente un índice de Nash bueno, de 0.65. Esto supone que coexisten dos configuraciones de modelo buenas, presentándose un caso de equifinalidad. Sin embargo, el modelo actualizado para Contraix está representando mejor la realidad de la cuenca en términos de flujos y salidas; por tanto, este es el que se considera como válido al ser consistente con los resultados también del proyecto ISOTOPOS.
- ✚ La nueva información hidrometeorológica recolectada corresponde al periodo comprendido entre el 01/03/2013 al 31/08/2014. Las variables de precipitación y temperatura en general fueron consistentes tanto para la estación Llebreta como para la estación Contraix, es decir, para el periodo no había datos faltantes ni valores negativos de precipitación, para temperaturas no había valores extraños. En cuanto a los caudales, solo se contó con nueva información de la estación AT07, ya que la que aforaba los caudales provenientes de Contraix se desmanteló. La variable de ETP fue calculada por el método de Hargreaves a partir de información de temperaturas y para escala temporal diaria, lo que supuso una mejora sustancial en comparación con la que se había trabajado en ACOPLA, pues esta se había obtenido por Penman - Monteith de la FAO para escala mensual. Otra de las mejoras para el modelo de Contraix, fue que se introdujo una estación adicional virtual de ETP, ubicada en el cono de la cuenca, del que recibe su nombre; para ello se trasladaron las temperaturas mínimas, máximas y medias desde Contraix a la nueva estación a partir de la ecuación universal del gradiente térmico, en donde se espera que por cada 1000 m de diferencia entre elevaciones de una estación a otra el incremento/decremento

sea de 6.5°C. Sin embargo, es de resaltar la falta de información para periodos de tiempo más largos, pues como mucho solo se contaba con 2 años de información no consecutivos. Lo otro, es que la estación Contraix se encontraba en uno de los puntos más altos de la cuenca ubicada hacia la margen derecha con orientación al sur, por lo que las subcuencas que están orientadas hacia el norte, de algún modo pueden quedar sesgadas en la interpolación de variables por el método del inverso de la distancia al cuadrado (IDW).

- ✚ La extrapolación de los mapas de parámetros se considera un proceso que conlleva mucho trabajo, debido a la importancia que tiene en la representación adecuada del sistema hidrológico. A pesar de esto, la ventaja que ofrece TETIS con respecto a otros softwares de modelación hidrológica espacialmente distribuida, es la inclusión de los factores correctores, que tienen como función principal corregir los parámetros del modelo y dar como resultados los efectivos para los cuales se reproduce mejor la realidad. Adicional a ello, en el desarrollo del proyecto ACOPLA se realizó un esfuerzo importante en la obtención de los mapas de parámetros, ya que se realizaron varias salidas de campo para recolectar muestras de suelos, que permitieron conocer mejor las características propias de estos en la cuenca; encontrándose como resultado final que en general el almacenamiento estático, la capacidad de infiltración y la capacidad de percolación/permeabilidad del acuífero tendían a seguir la variabilidad espacial representada en el mapa de cobertura del suelo. Teniendo en cuenta esto, y que en San Nicolau se seguía con los mismos tipos de cobertura del suelo, la extrapolación se realizó siguiendo esta distribución espacial, asignando a cada porción de cobertura los valores de estos parámetros calculados en Orozco (2011).
- ✚ El modelo hidrológico de Contraix en escala subdiaria no valido bien en la cuenca del río San Nicolau, a pesar de que primera es tributaria de la segunda. Es por esto, que se decidió recalibrar el modelo en el punto AT07, y luego realizar la validación espacio-temporal cruzada en Contraix, teniendo en cuenta que en este caso la calibración se llevó a cabo en el periodo 2013-2014. Asimismo, en la calibración en San Nicolau, la escala temporal se agregó a diaria, porque uno de los objetivos principales de este trabajo era la modelación del cambio climático en la cuenca, y esta información, que se descarga de AEMET presenta esta escala temporal. En concordancia con lo anterior, en San Nicolau se realizaron dos configuraciones de modelo diferentes, el primero incluyendo información de temperaturas de sólo las estaciones meteorológicas existentes (Llebreta y Contraix); el segundo, adicional a estas dos estaciones, se utilizaron 11 estaciones virtuales ubicadas convenientemente (diferente cota) con el fin de captar mejor el gradiente térmico que permitiera representar mejor el proceso de acumulación y fusión de nieve. Esto se hizo así, debido a que se observó que al realizar la validación cruzada en Contraix, no se estaban captando de forma adecuada las salidas asociadas a la fusión de nieve, por tanto, los resultados no fueron los esperados. El primer modelo de San Nicolau en calibración presentó un índice de Nash de 0.787, en validación temporal de 0.68 y en validación espacio-temporal en Contraix, de -0.0355. El segundo, en calibración el índice de Nash fue de 0.771, en validación temporal de 0.6801, y en validación espacio-temporal en Contraix de 0.5904. Es por esta razón y porque se captaban en general mejor las descargas en Contraix, que se da este modelo como válido y como el que mejor representa en líneas generales las condiciones reales de la cuenca de estudio, a pesar de que gráficamente y visualmente el modelo en configuración 1 muestra un mejor comportamiento tanto en calibración como en validación temporal. El segundo se selecciona en últimas, porque calibra y valida mejor. Sin embargo, es preciso mencionar que los resultados obtenidos en este modelo se tienen que tratar con cuidado debido en parte a la limitada información hidrometeorológica disponible y a la no tan afortunada ubicación de las

estaciones meteorológicas sobre la cuenca, que de algún modo introducen incertidumbre al modelo; por tanto, se recomienda actualizar el modelo una vez se tenga más información y de mejor calidad en la cuenca de San Nicolau.

- ✚ Los modelos de cambio climático implementados para el análisis de los efectos de este sobre la cuenca del río San Nicolau, permiten prever que las condiciones del ciclo hidrológico cambiarán de forma drástica. En el caso de las precipitaciones, se espera un incremento de la componente líquida de 342 mm/año en media, y una disminución de la componente sólida o en forma de nieve de 398 mm/año en media, es decir, se pasa de 555.43 mm/año a 157.33 mm/año. A pesar de esto, el incremento en la fase líquida parece ser que será insostenible, porque como se mostró en el gráfico de serie temporal de esta variable para finales de siglo, año a año desde el 2071 al 2100 la lluvia irá disminuyendo progresivamente con una pendiente muy suave; en parte por el incremento progresivo en las temperaturas (+4.26 en temperaturas máximas y +2.42 en las temperaturas mínimas) y con ello el incremento en la ETP (+209.2 mm/año).
- ✚ En cuanto a los caudales, los resultados de los modelos para las proyecciones futuras prevén una pequeña disminución para todos (-0.94%, -15.81%, -2.49% para ACCESS1-0, CNRM-CM5 y MIROC5, respectivamente) en comparación con periodo de control, lo que va en concordancia con la disminución en la precipitación total (lluvia + nieve) y el aumento en la ETP, lo que se reflejará en una disminución de los recursos hídricos disponibles en esta cuenca del Parque Nacional. En cuanto a la extremalidad de los caudales, se espera que sea más severa, esto es que en general los caudales bajos serán más bajos, pero los altos serán más altos, de acuerdo con el gráfico de caudales para diferentes periodos de retorno. Finalmente, en términos de la reserva de nieve, se espera que esta disminuya considerablemente de acuerdo a los pronósticos que realizan todos los modelos de cambio climático, esto es que en términos generales se espera una disminución media del orden de los 93 Hm3 en el manto de nieve, en comparación con periodo de control. Esto hará que la cuenca migre de un comportamiento del ciclo hidrológico regido por el proceso de acumulación y fusión de nieve, a uno más típico de cuenca de alta montaña sin este proceso, lo que terminará repercutiendo directamente el ecosistema acuático y terrestre de la cuenca del río San Nicolau.

8 REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

- AEMET. (n.d.). AEMET: meteoglosario. Retrieved from https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/659_escenarios-de-emisiones
- Agency, E. E. (2006). CORINE land cover. *Methodology*.
- Aigüestortes.info. (2019). Parque Nacional de Aigüestortes y Lago de San Mauricio. Retrieved from <https://www.aiguestortes.info/situacion-y-mapa/>
- Allen, R. G. (1998). FAO Irrigation and Drainage Paper No . 56 Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements) by, (January 1998).
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & Ab, W. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56 By, 1–15.
- Barros, A. P., & Hwu, W. (2002). A study of land-atmosphere interactions during summertime rainfall using a mesoscale model. *Journal of Geophysical Research*, 107, 1–18.
- Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling. Neural Networks for Hydrological Modeling*. <https://doi.org/10.1201/9780203024119.ch9>
- Brunet, M., Castro, M. De, Petisco, E., Ramos, P., Ribalaygua, J., Sanz, I., & Torres, L. (2009). *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. AEMET.
- Camarero, L., Catalan, J., Felip, M., García Orellana, J., Masqué, P., Palacín, C., ... Sala, M. (2019). *Uso de isótopos estables y radiactivos en seguimiento e investigaciones a largo plazo (LTER) de los ecosistemas acuáticos de los Parques Nacionales: resultados del proyecto ISÓTOPOS*.
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping : How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes ? *Journal of Climate*, (2012), 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *HIDROLOGÍA APLICADA*. (M. G. Hill, Ed.).
- Crawford, N. H., & Linsley, R. K. (1966). *Digital Simulation in Hydrology Stanford Watershed Model IV*.
- Duan, Q., & Gupta, V. (1992). SAC-SMA, 28(4), 1015–1031.
- Escamilla, V., Puertes, C., & Francés, F. (2017). Capacidades del modelo hidrológico TETIS versión 9, 1–15.
- ESDAC. (2019). EUROPEAN SOIL DATA BASE and sold properties (ESDB). Retrieved from <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/european-soil-database-soil-properties>
- FAO. (2019). Leptosols. Retrieved from http://www.fao.org/3/Y1899E/y1899e07.htm#P525_76436
- Francés, F., Vélez, J. I., & Vélez, J. J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332(1–2), 226–240. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.032>
- Garijo, C., Mediero, L., & Garrote, L. (2018). Utilidad de las proyecciones climáticas generadas por AEMET para estudios de impacto del cambio climático sobre avenidas a escala nacional. *Ingeniería Del Agua*, 22(3), 153. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.9312>

- GIHMA. (2018). *DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DISTRIBUIDO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA TETIS v.9.0.1*. VALENCIA, ESPAÑA: UPV. Retrieved from <http://lluvia.dihma.upv.es/>
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., & Haugen, J. E. (2012). Technical Note : Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, (1), 3383–3390. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. (1985). Reference Crop Evapotranspiration From Temperature, (January 1985). <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- IGME. (2009). Mapa Litoestratigráfico, de permeabilidades e hidrogeológico de España a escala 1:200.000. Retrieved from <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/mapa.aspx?parent=../tematica/tematicossingulares.aspx&id=15&language=es>
- IGME. (2016). *Mapa Geológico de España: Esteri D'Áneu*. Madrid.
- IGN. (2006). Instituto Geográfico Nacional. Retrieved from <http://www.ign.es/web/catalogo-cartoteca/apibadasid/cartoteca/searchAuthority/T650&18889>
- IPCC. (2000). Informe especial del IPCC - escenarios de emisiones. *Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático*, 27. <https://doi.org/ISBN:92-9169-413-4>
- IPCC. (2007). Pregunta Frecuente 2.1 ¿Cómo contribuyen las actividades humanas a los cambios climáticos? y ¿Cómo se comparan con las influencias humanas? Retrieved from https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html
- IPCC. (2014a). *Climate Change: Synthesis Report AR5*. IPCC (Vol. AR5). <https://doi.org/10.1046/j.1365-2559.2002.1340a.x>
- IPCC. (2014b). *CLIMATE CHANGE 2013 - quotations*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.Summary>
- Jordanova, N. (2017). *Magnetism of soils with limitations to root growth: Vertisols, Solonetz, Solonchaks, and Leptosols*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809239-2.00005-X>
- Kirchner, J. W. (2003). A double paradox in catchment hydrology and geochemistry. *Hydrological Processes*, 17(4), 871–874. <https://doi.org/10.1002/hyp.5108>
- Li, H., Sheffield, J., & Wood, E. F. (2010). Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research*, 115. <https://doi.org/10.1029/2009JD012882>
- Losada Rodríguez, Í. J., Izaguirre Lasa, C., & Díaz Simal, P. (2014). Cambio Climático en la Costa Española. *Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Losada Rodríguez, Í. J., & Picatoste, J. . (2013). Guia resumida del quinto informe de evaluacion del IPCC. *Ministerio de Transición Ecológica, España*.
- Marcos García, P., & Pulido Velazquez, M. (2017). Cambio climático y planificación hidrológica: ¿es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación? *Ingeniería Del Agua*, 21(1), 35. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6361>
- Mearns, L. O., Arritt, R., Binner, S., Bukovski, M. S., McGinnis, S., Stephan, S., & Caya, D. (2012). *THE NORTH AMERICAN REGIONAL CLIMATE CHANGE Overview of Phase I Results*. National Center for

- Atmospheric Research*, Boulder, Colorado. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00223.1>
- Molina Celeita, J. (2018). *CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL RÉGIMEN HÍDRICO DE UN RÍO TEMPORAL: CASO DEL RÍO AMADORIO EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR*. UPV.
- Montalvo Montenegro, C. I. (2017). *ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE CAUCE, MODELIZACIÓN DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS Y CAMBIO CLIMÁTICO DE UNA CUENCA MEDITERRÁNEA (RAMBLA DE LA VIUDA)*. UPV.
- Montoya Monsalve, J. J. (2008). *DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL DE PRODUCCIÓN, TRANSPORTE Y DEPOSITO DE SEDIMENTOS*. UPV.
- Morata Gasca, A. (2014). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4. *Publicaciones En Línea de La Agencia Estatal de Meteorología. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 202*. Retrieved from http://www.aemet.es/documentos/es/conocerlas/publicaciones/Guia_IPCC/Guia_IPCC.pdf
- Morelli Tucci, C. E. (1998). *Modelos Hidrológicos*.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Múnera, J. C., & Francés, F. (2008). Modelación Hidrológica distribuida de la cuenca Saja-Besaya, para estimación probabilística de avenidas en los periodos de estiaje. In *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Cartagena de Indias, Septiembre 2008*. Cartagena.
- Orozco Medina, I. (2011). *Implementación del modelo hidrológico distribuido TETIS en la cuenca de Contrax del Parque Nacional de Aigüestortes, España*. VALENCIA, ESPAÑA.
- Orozco Medina, I. (2013). *Modelación Parsimoniosa y Espacialmente Distribuida de los procesos de Acumulación y Fusión de Nieve*. UPV.
- Pacheco Rios, R. (2017). *ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO TETIS EN EL ÁMBITO REGIONAL DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR UTILIZANDO INFORMACIÓN ESTÁNDAR*. UPV.
- Ponce, V. M. (1994). *Engineering Hydrology - Principles and Practices*, 640.
- Ramírez Solano, L. M. (2012). *Análisis de la implementación de un modelo hidrológico distribuido con información estándar en España*. UPV.
- Salazar Galán, S. A. (2013). *Metodología para el análisis y la reducción del riesgo de inundaciones: aplicación en la Rambla del Poyo (Valencia) usando medidas de “retención de agua en el territorio.”*
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble : Part 1 . Model evaluation in the present climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(July 2012), 1716–1733. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50203>
- van Ulden, A. P., & van Oldenborgh, G. J. (2006). Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulations and their importance for climate change in Central Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(4), 863–881. <https://doi.org/10.5194/acp-6-863-2006>
- Vélez, J. J., Puricelli, M., López Unzu, F., & Francés, F. (2009). Parameter extrapolation to ungauged basins

with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(2), 229–246. <https://doi.org/10.5194/hess-13-229-2009>

Weber, J. F., Dasso, C. M., & Jorquera, E. (2010). Desarrollo Y Calibracion De Un Modelo Hidrológico De. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, (June 2014), 3–10.

Wilby, R. L., Dawson, C. ., & Barrow, E. . (2002). SDSM — a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, 17, 147–159.

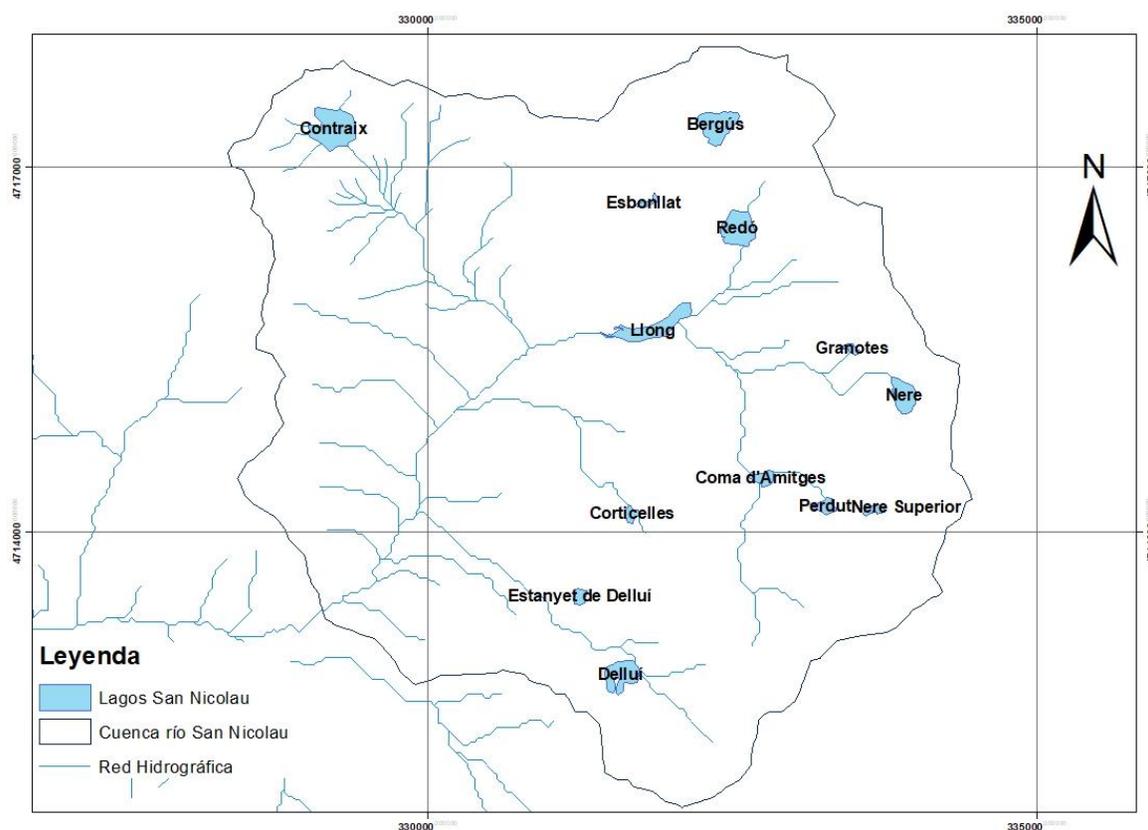
ANEXOS

ANEXO I: Curvas Cota – Capacidad de Lagos en San Nicolau

En el presente Anexo, se presentan las curvas cota – capacidad que se obtuvieron para la modelación de los lagos en la cuenca del Río San Nicolau, dando como resultado en total 12 curvas para esta misma cantidad de cuerpos de agua, como se muestra en la figura de ubicación de los lagos seleccionados.

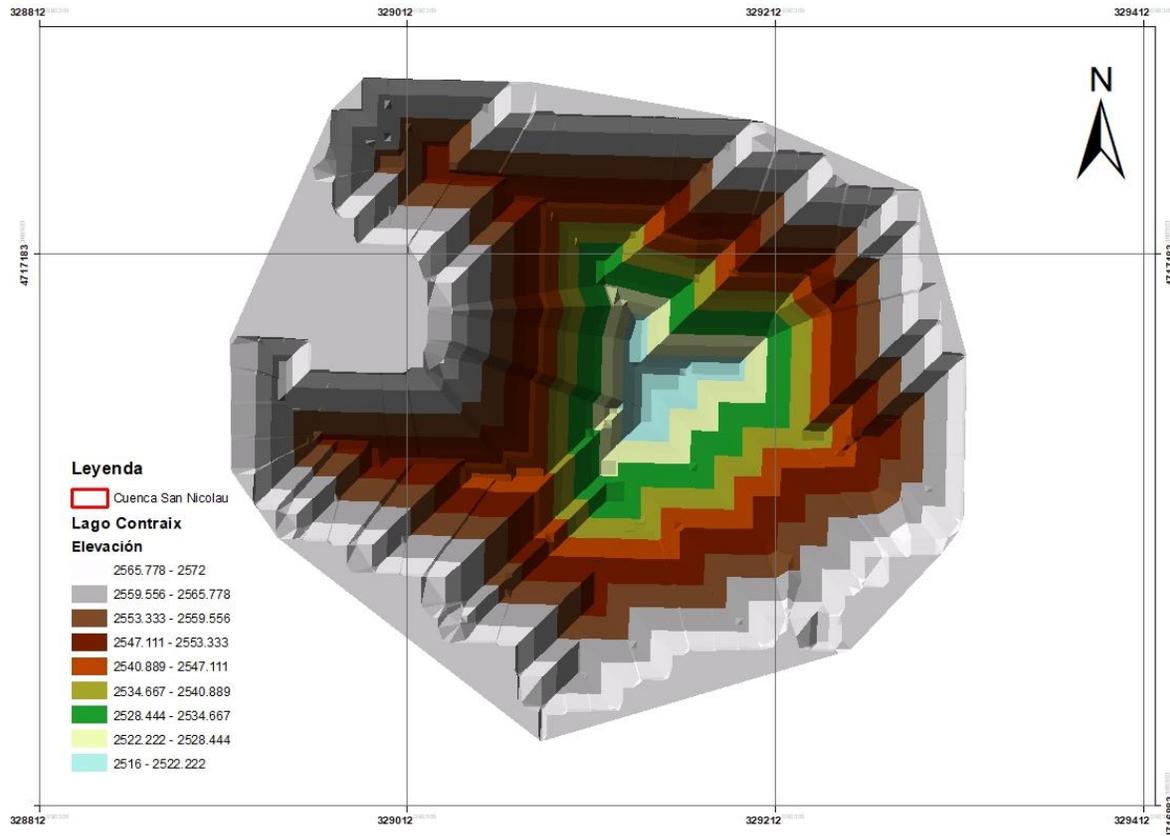
Para obtener estas curvas, se partió de conocer la cota de superficie o del espejo de agua y una profundidad máxima, debido a que no se contaban con batimetrías. A partir de esto, se realizó una interpolación de las curvas de nivel consensuadamente y tratando de representar convenientemente la estratificación de los lagos de montaña.

Debido a este déficit de información, la incertidumbre que se tiene es muy alta, con lo cual los resultados del proceso de modelación se deben tratar y mirar con precaución. Es por esto que se hace necesario recomendar que tan pronto se cuente con más información, se hagan los ajustes pertinentes del modelo hidrológico.

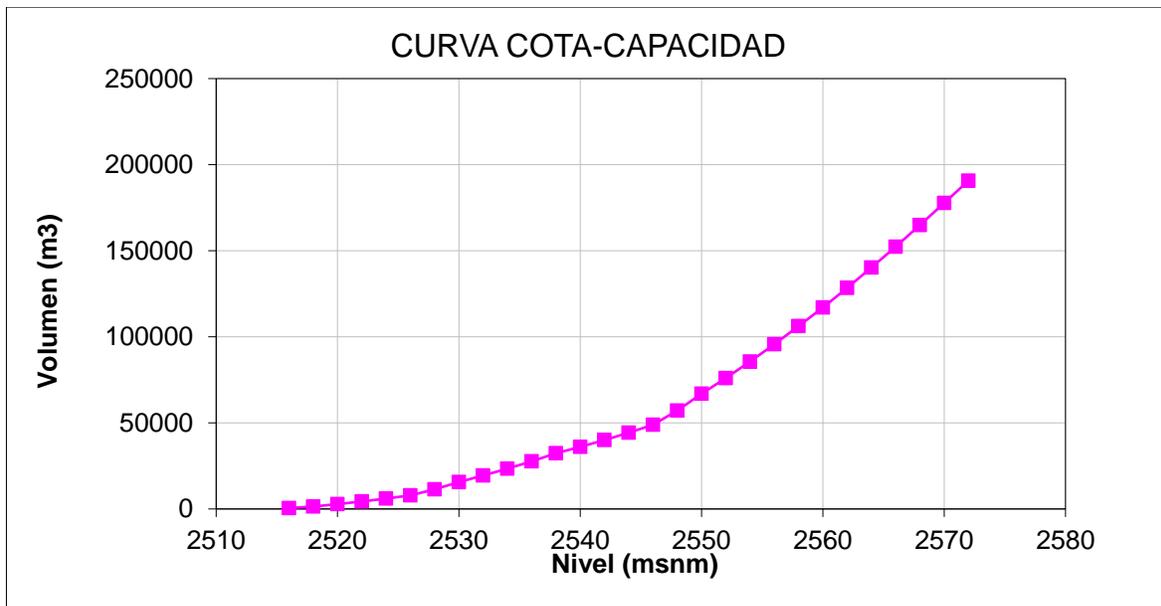


Lagos seleccionados para modelación en la cuenca del río San Nicolau.

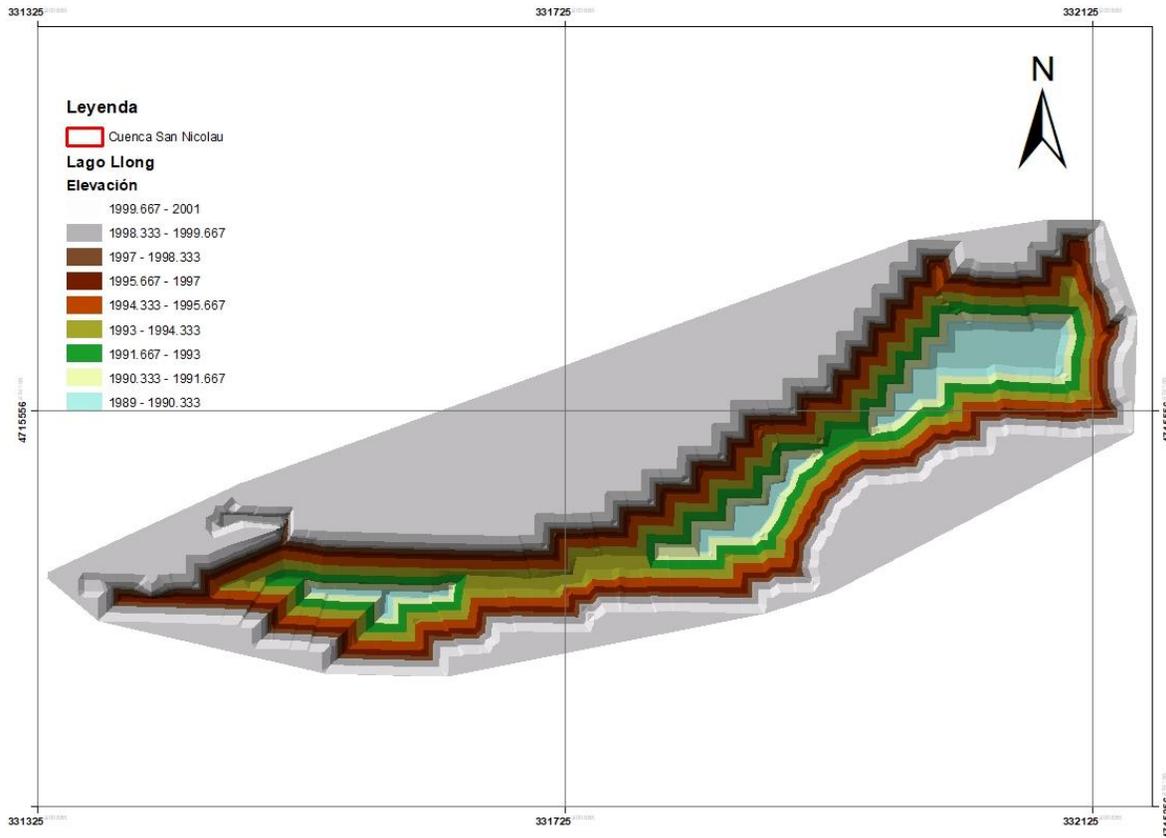
Lago de Contraix



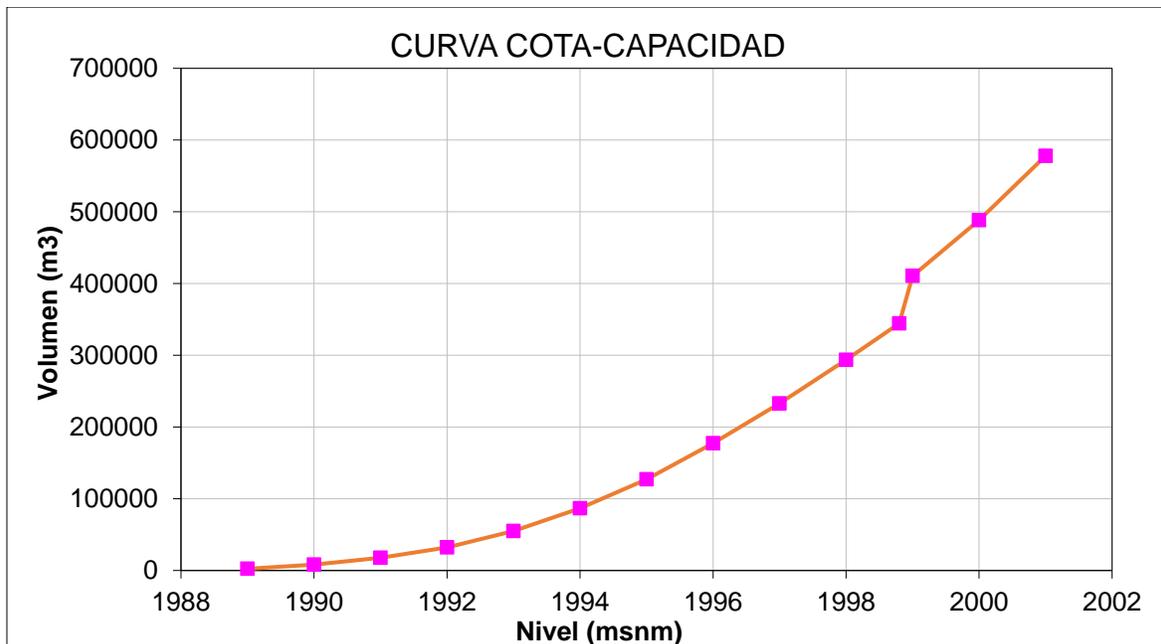
TIN generado a partir de interpolación curvas de nivel para el Lago.



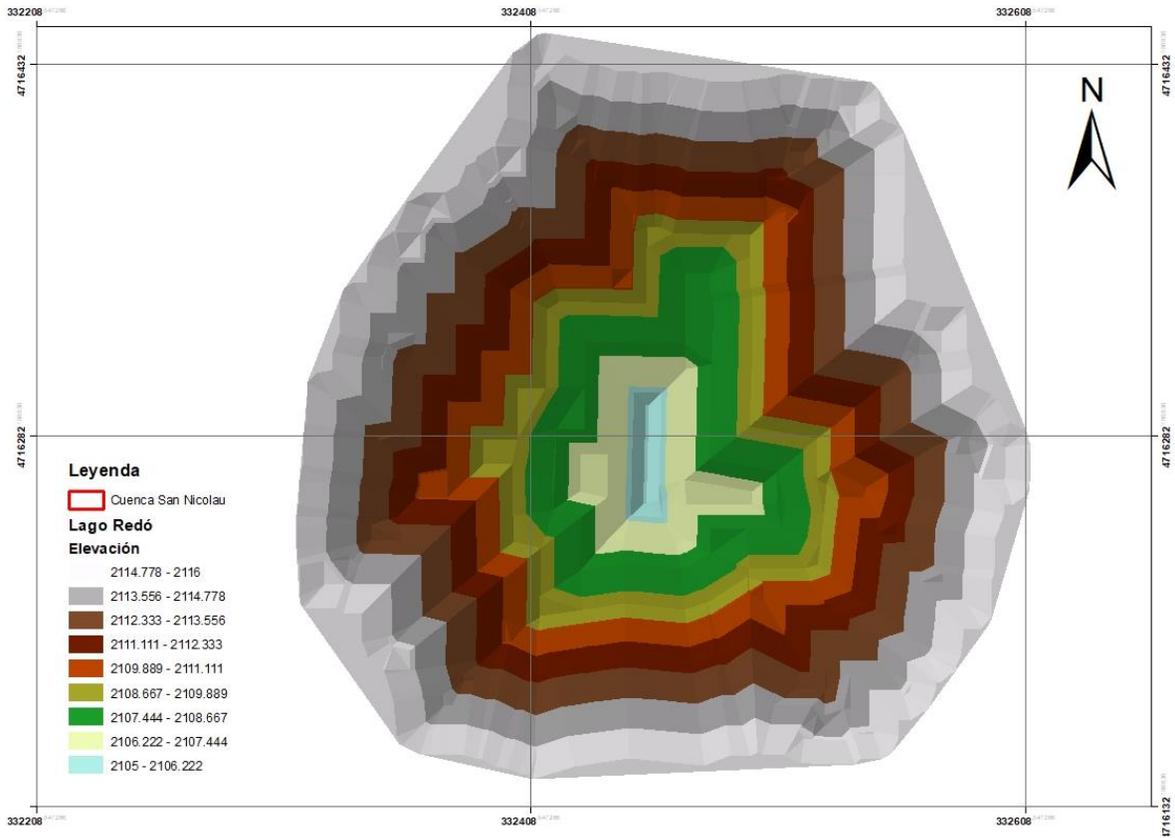
Lago Llong



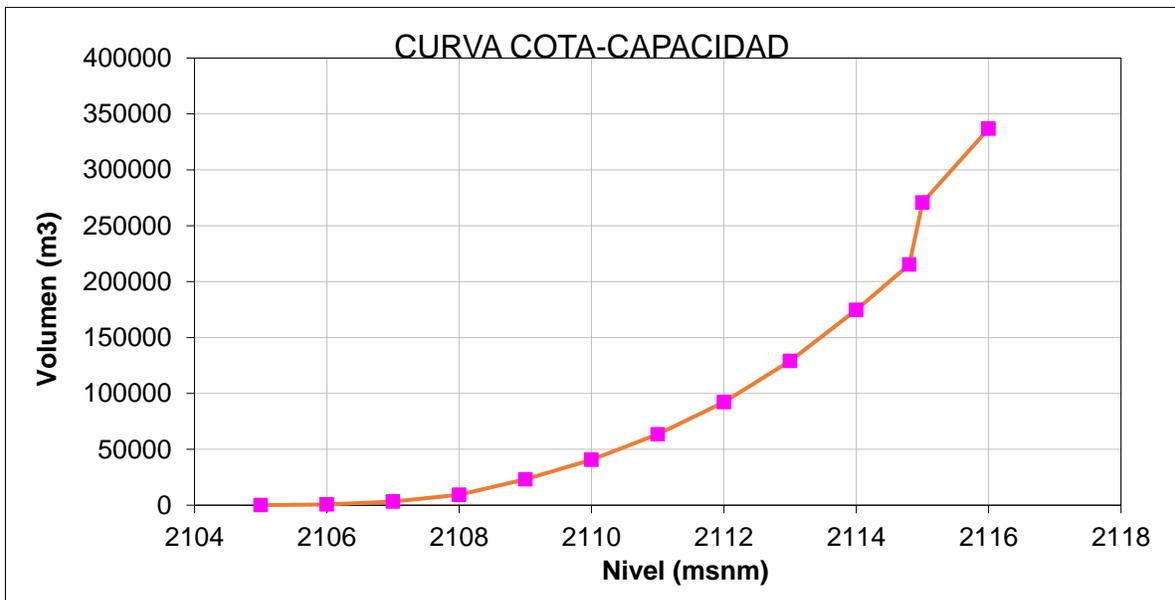
TIN generado a partir de interpolación curvas de nivel para el Lago.



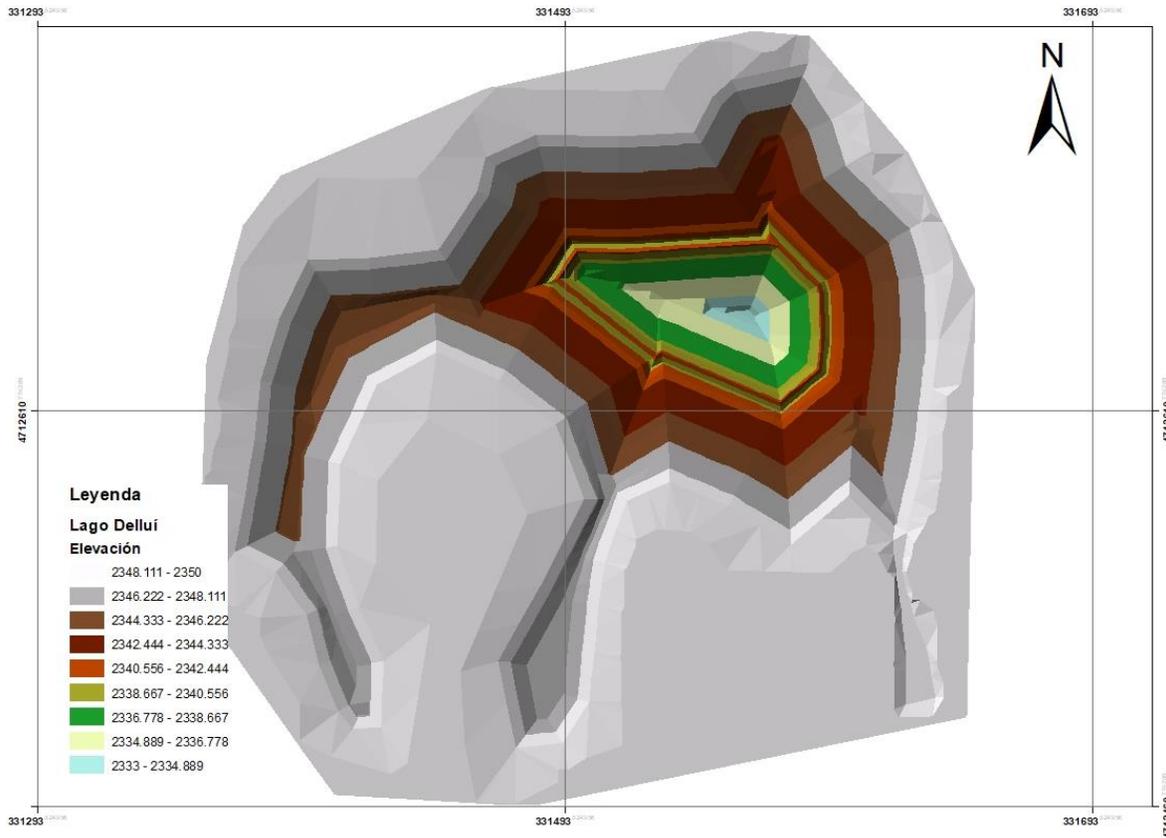
Lago Redó



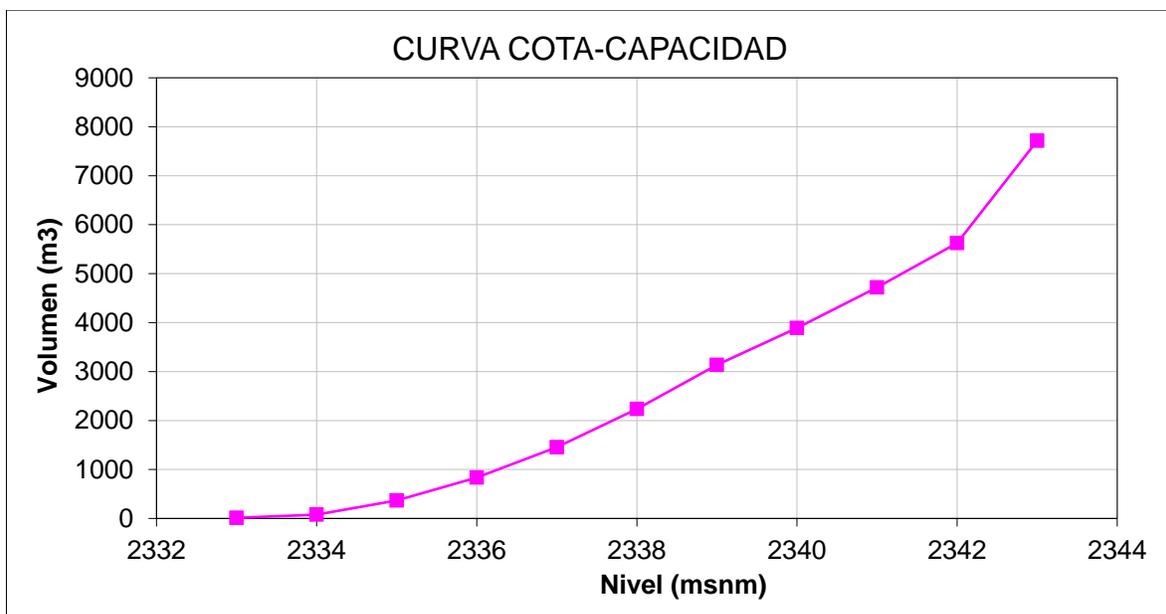
TIN generado a partir de interpolación curvas de nivel para el Lago.



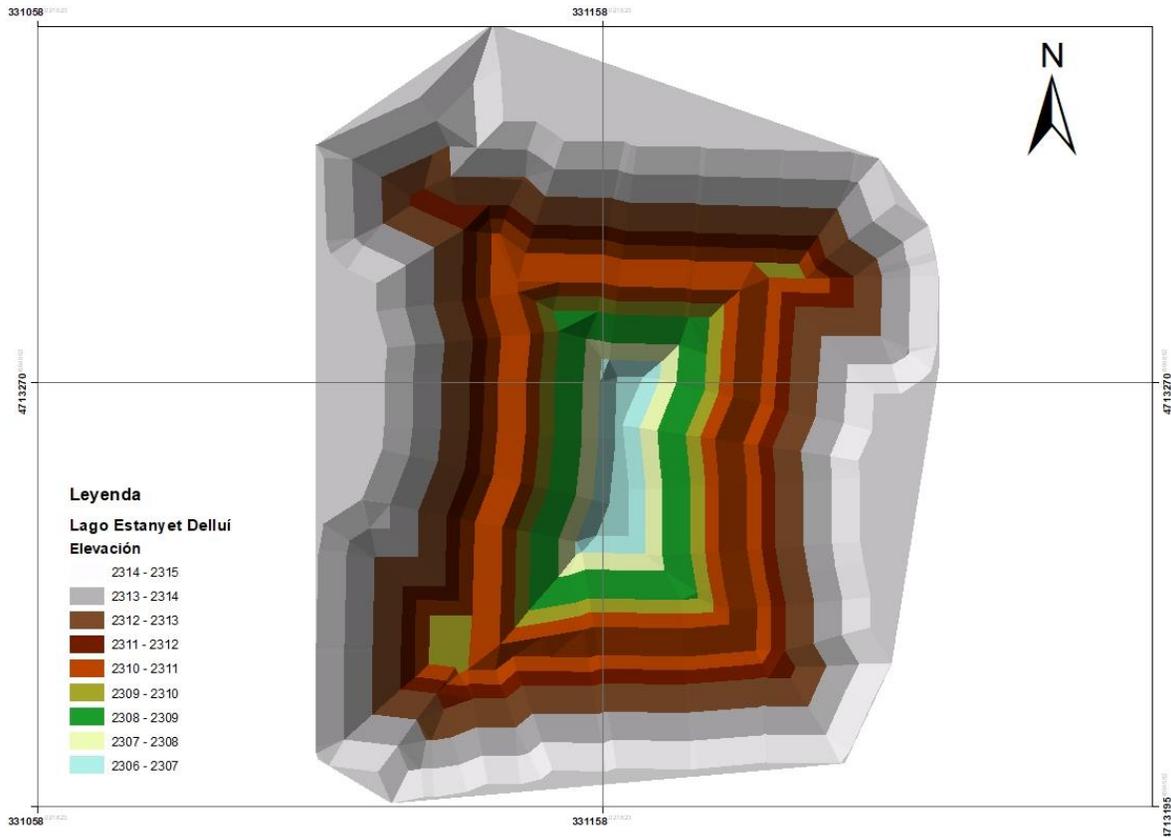
Lago Delluí



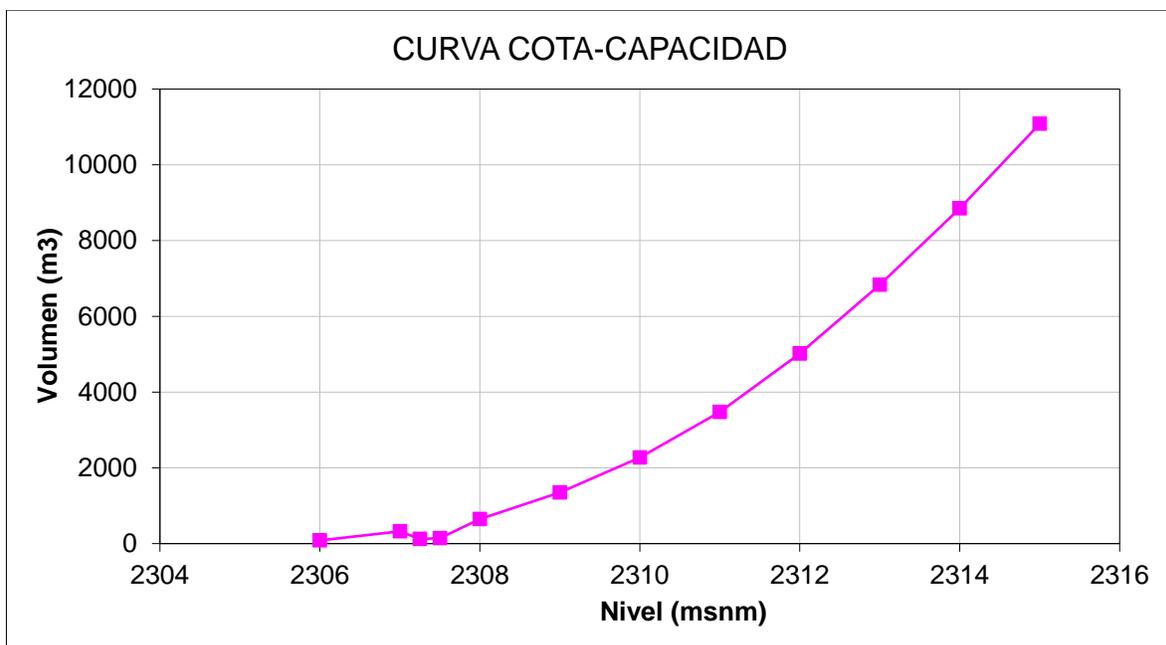
TIN generado a partir de interpolación curvas de nivel para el Lago.



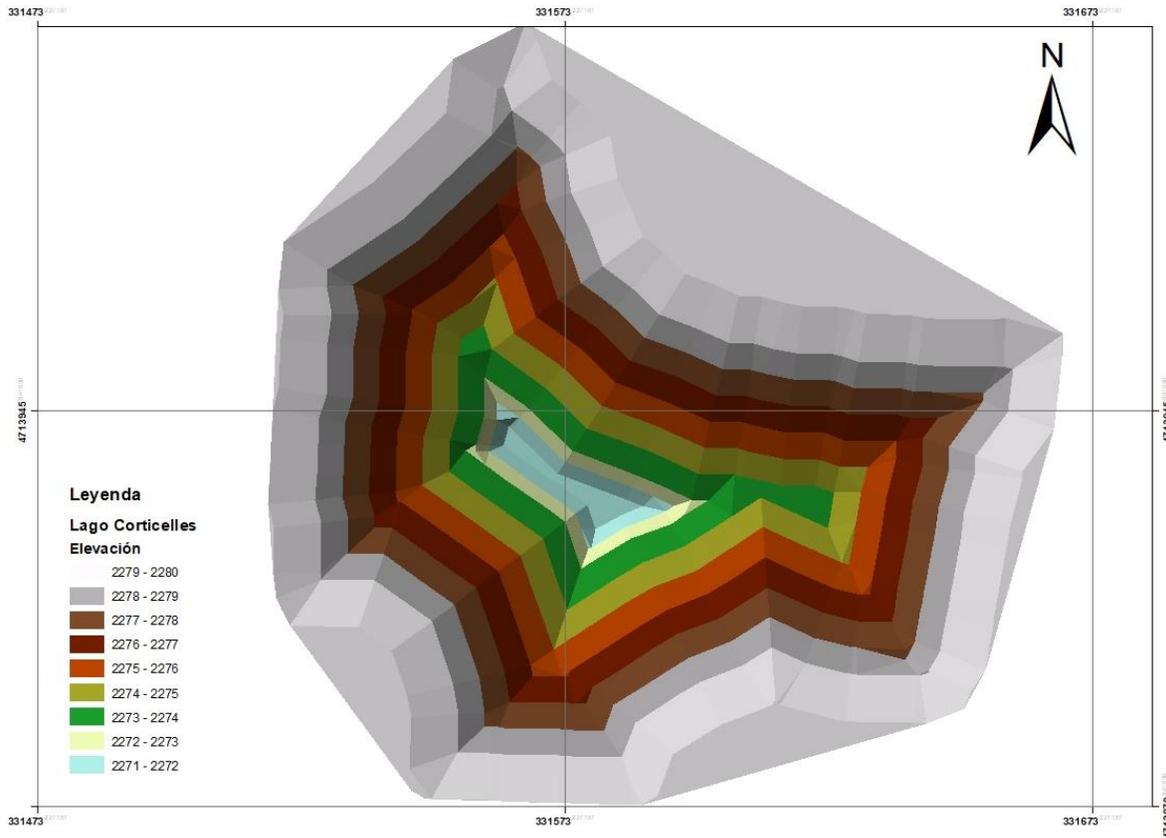
Lago Estanyet de Delluí



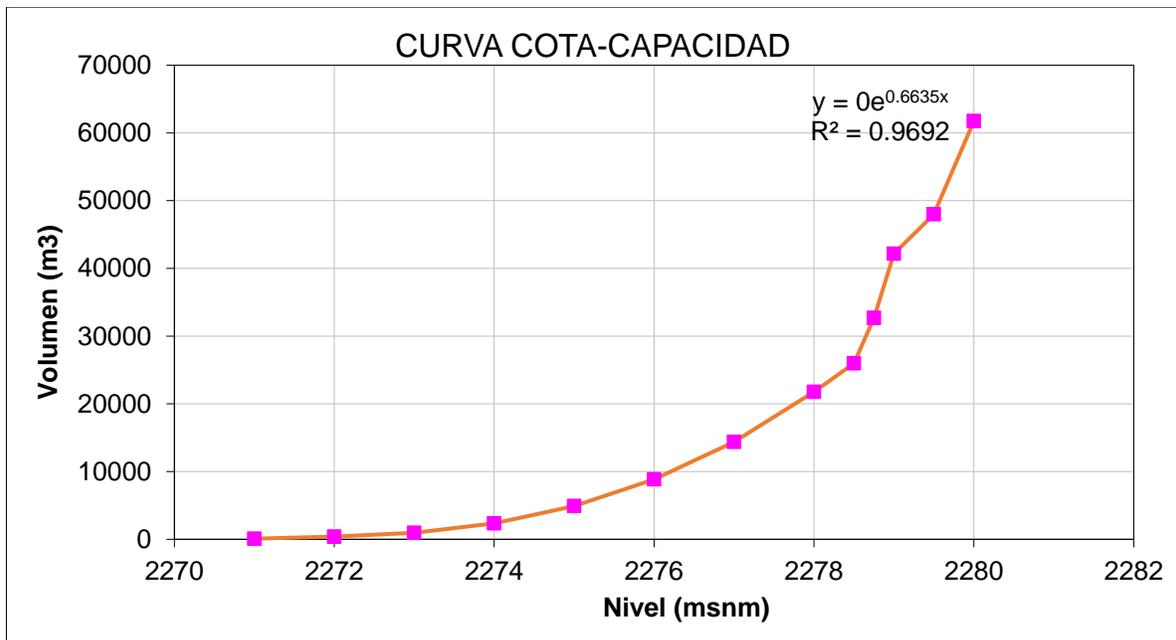
TIN generado a partir de interpolación curvas de nivel para el Lago.



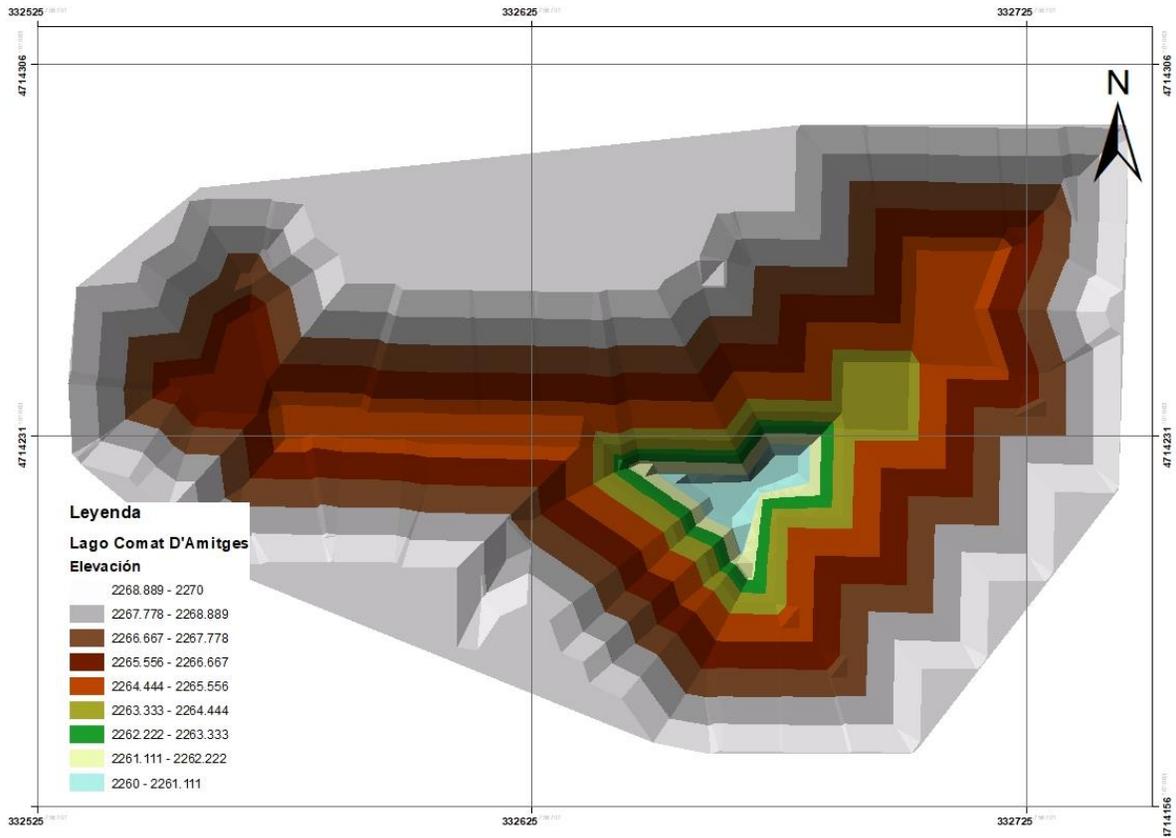
Lago Corticelles



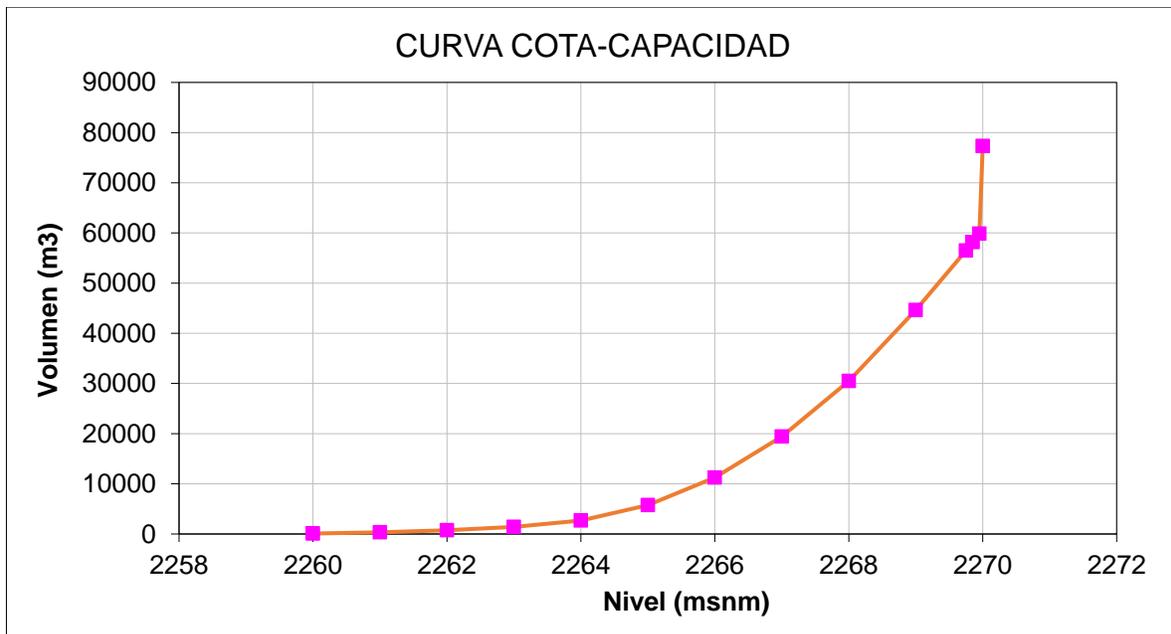
TIN generado a partir de interpolación curvas de nivel para el Lago.



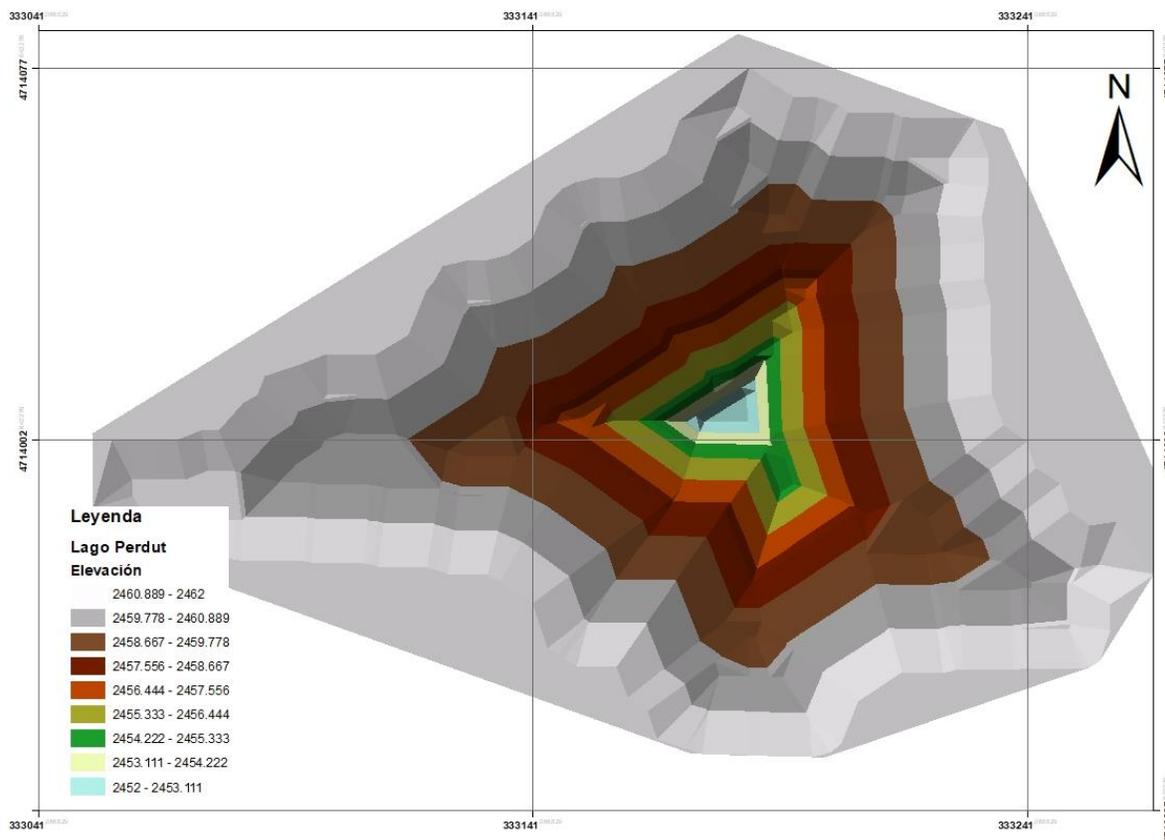
Lago Comat D'Amitges



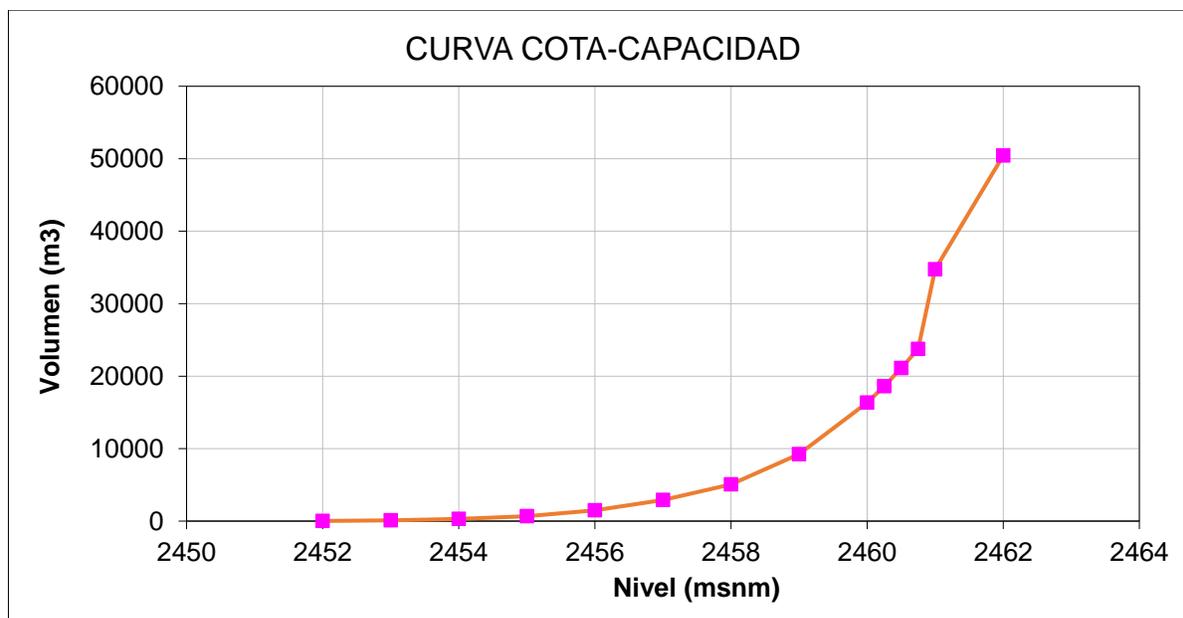
TIN generado a partir de interpolación curvas de nivel para el Lago.



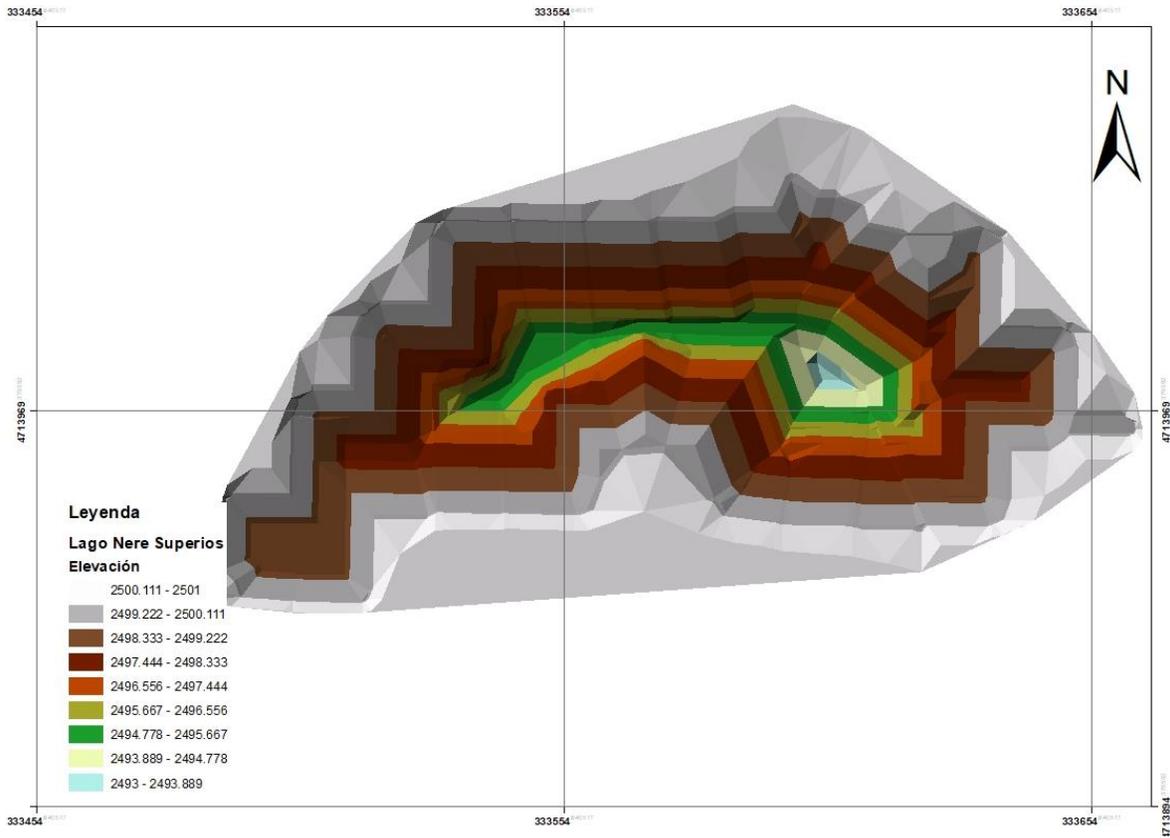
Lago de Perdut



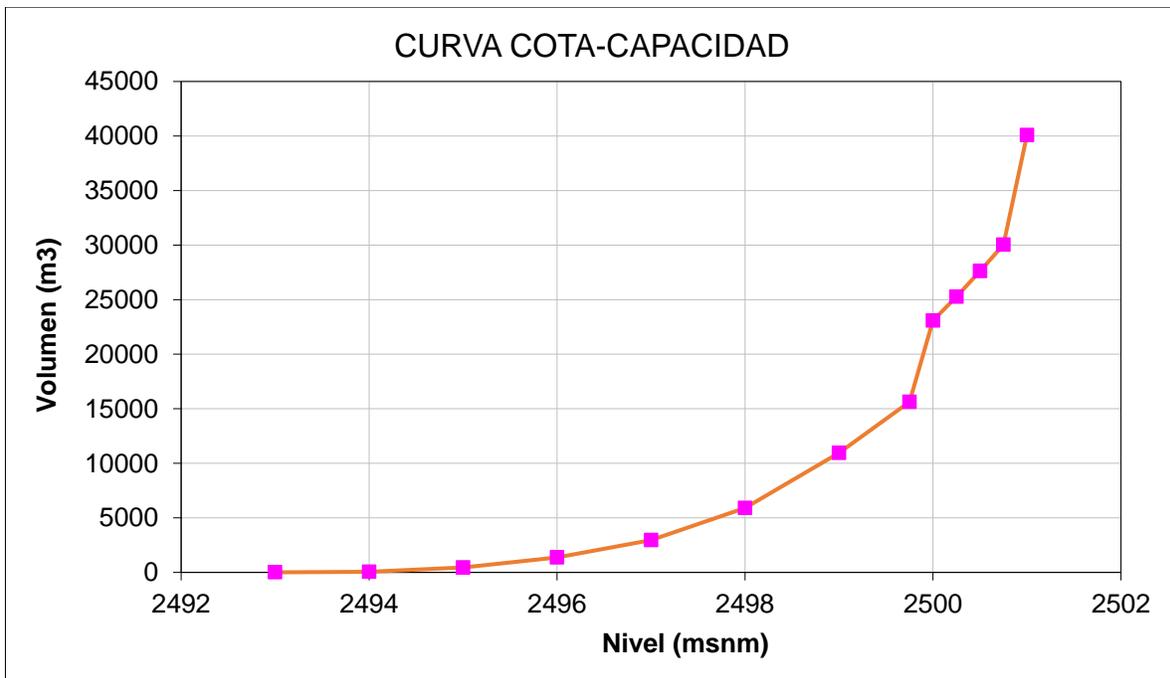
TIN generado a partir de interpolación curvas de nivel para el Lago.



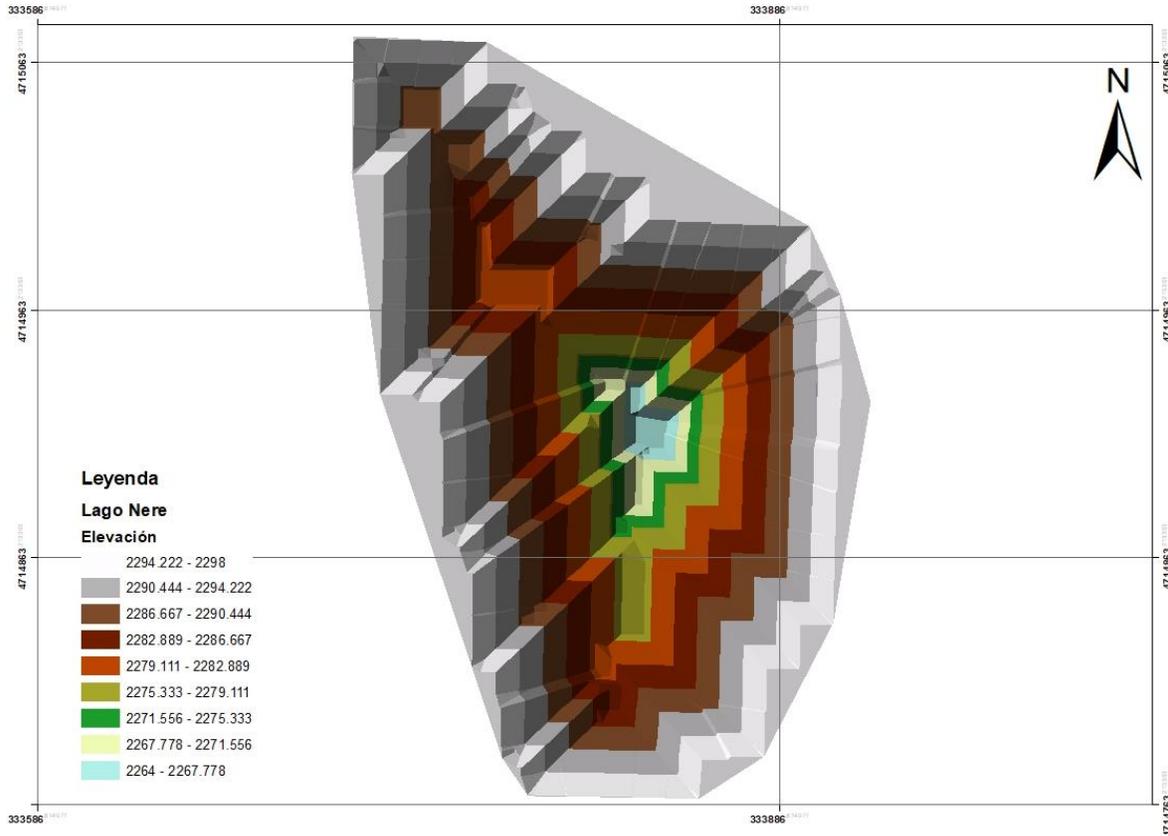
Lago Nere Superior



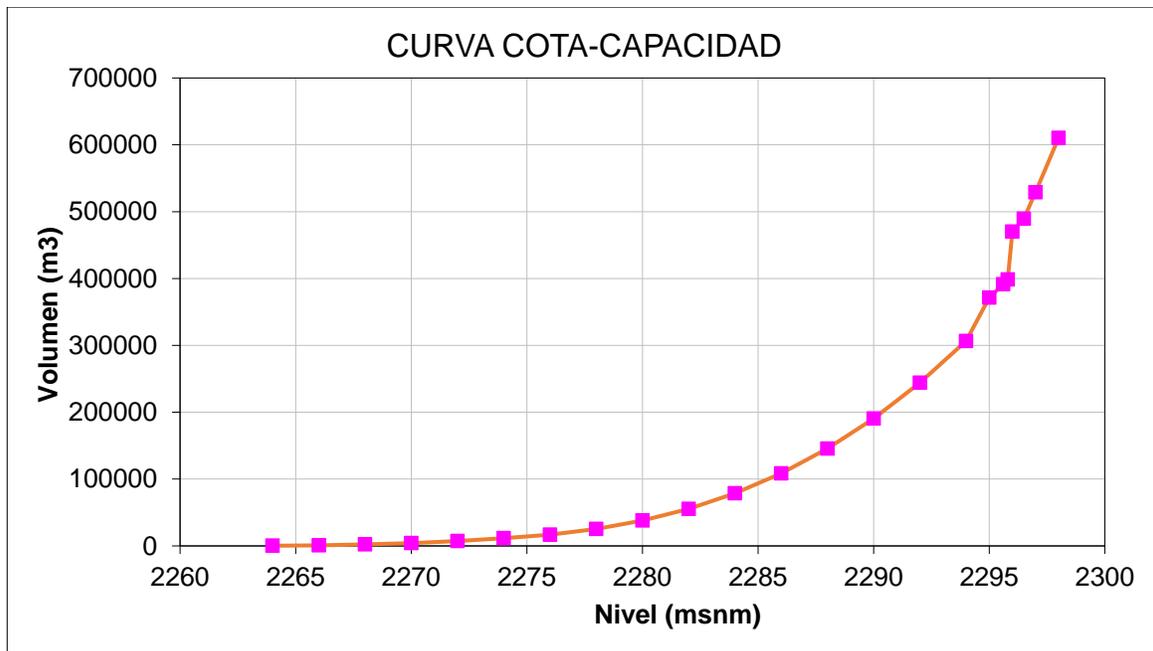
TIN generado a partir de interpolación curvas de nivel para el Lago.



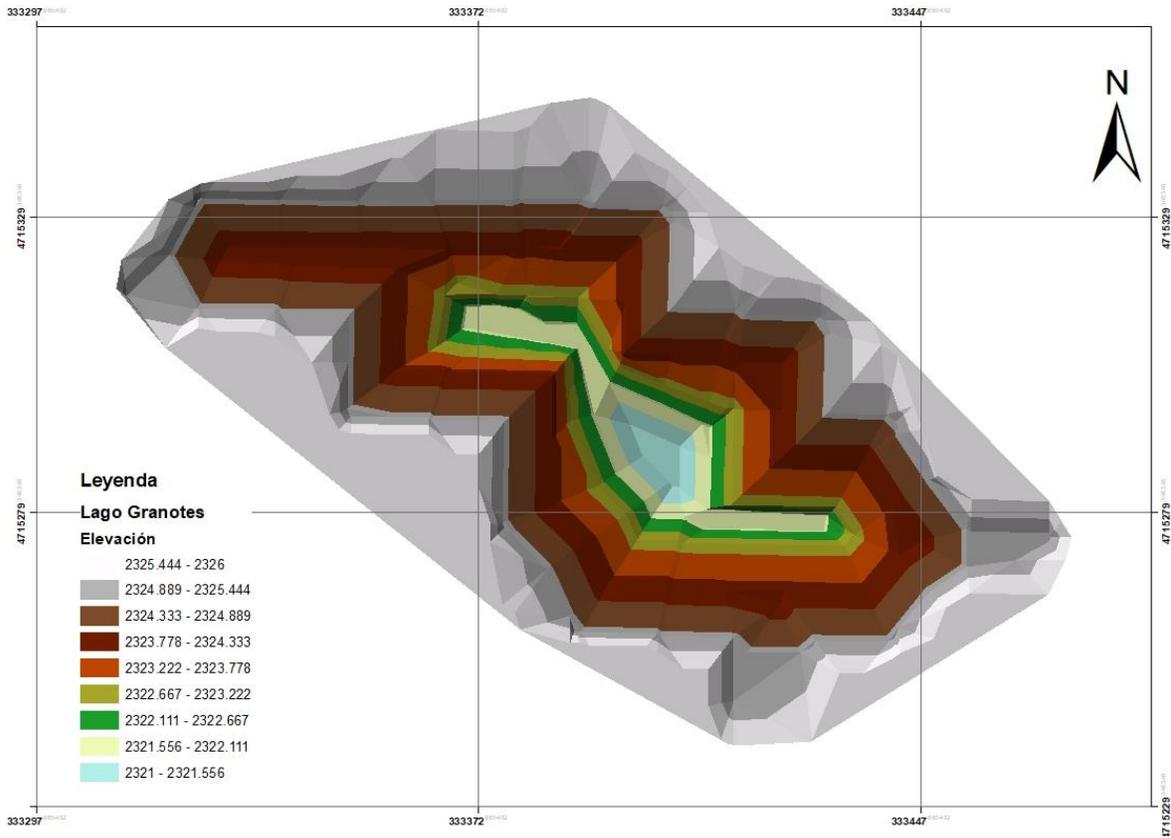
Lago Nere



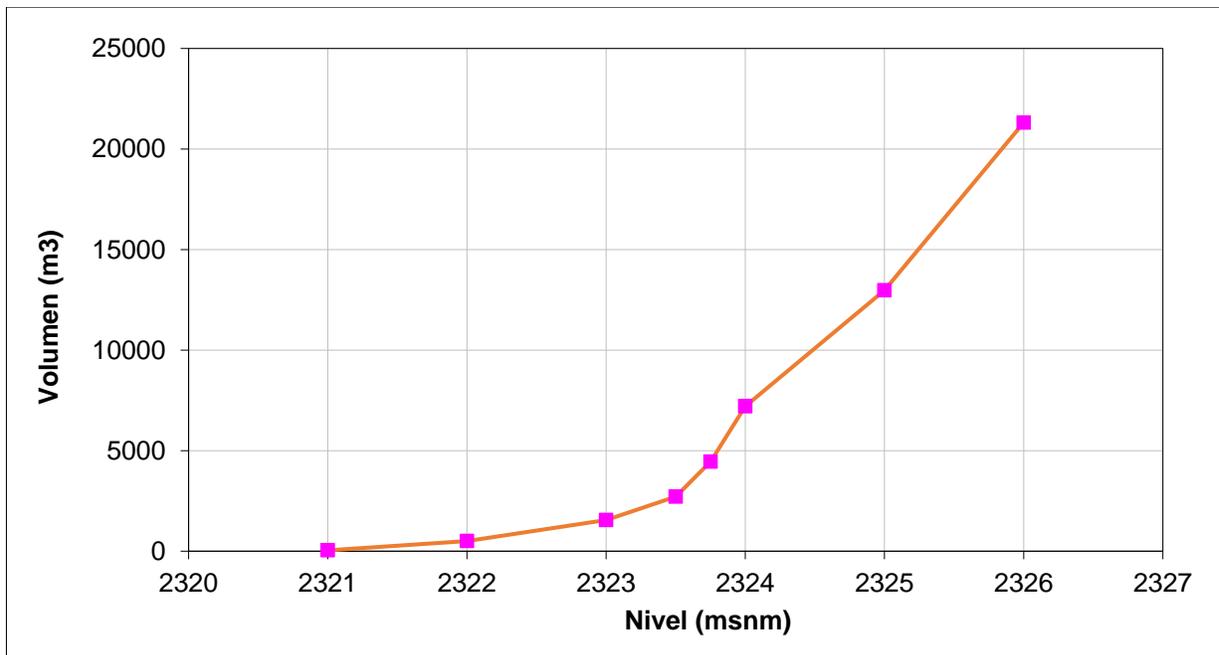
TIN generado a partir de interpolación curvas de nivel para el Lago.



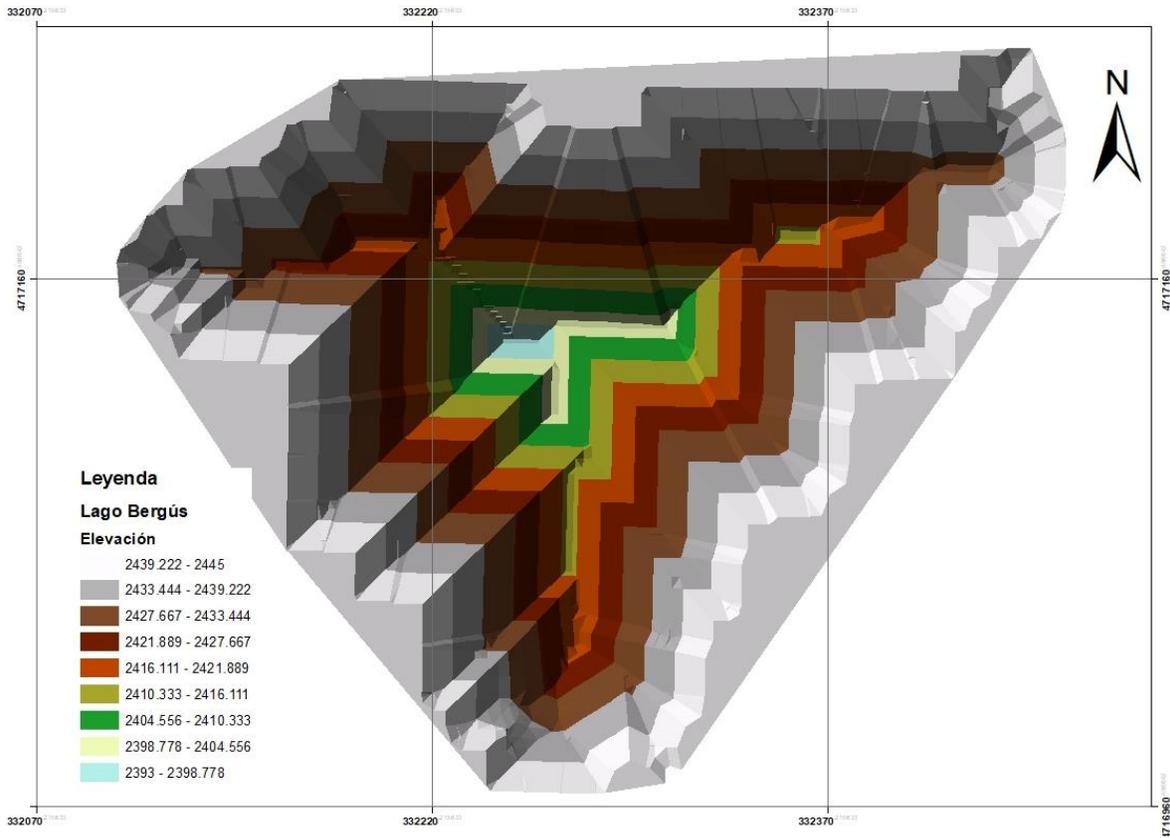
Lago Granotes



TIN generado a partir de interpolación curvas de nivel para el Lago.



Lago Bergús



TIN generado a partir de interpolación curvas de nivel para el Lago.

