



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Camino, Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Análisis de la amenaza de inundación actual y futura en Cabezón de la Sal

Trabajo realizado por:
Pablo Alonso Alguacil

Dirigido:
Manuel del Jesus Peñil
Jesús Casado Rodríguez

Titulación:
Grado en Ingeniería Civil

Santander, Junio de 2020

**TRABAJO FIN DE
GRADO**

Resumen

Título: Análisis de la amenaza de inundación actual y futura en Cabezón de la sal

Autor: Pablo Alonso Alguacil

Directores: Manuel del Jesus Peñil, Jesús Casado Rodríguez

Convocatoria: Junio 2020

Palabras Clave: Cabezón de la Sal, Modelo Hidrológico, Inundación, Cambio Climático, Periodo de retorno

El objetivo de este trabajo de fin de grado de la mención de hidrología consiste en analizar como va a variar la amenaza de inundación en el río Saja a causa de los efectos del cambio climático.

Debido a las emisiones de gases de efecto invernadero que comenzaron en la revolución industrial y continuaron creciendo desde entonces se han alcanzado en la atmosfera niveles superiores de concentración de CO₂ a aquellos anteriores a estos sucesos histórico. Así se ha creado un desequilibrio en los procesos que mantenían una temperatura en la tierra estable, almacenando cada vez mas y mas energía aumentando así la temperatura media del planeta.

A escala global los efectos empiezan a notarse dando lugar a procesos como el deshielo del polo norte, pero la mayoría de las consecuencias del cambio climático tardaran años en llegar. Esto da algo de tiempo a las sociedades actuales a emprender políticas que permitan mitigar estos efectos, pero para ellos es necesario entender el alcance que tendrán las variaciones en el clima, tanto a escala global como local.

Debido la gran dependencia económica que existe entre el municipio de Cabezón de la sal y el río Saja, además de su gran valor ecológico, se ha tomado esta localización como centro del estudio. Además, puesto que los eventos de inundación es algo con lo que sus habitantes han tenido que tratar en años recientes, se decidió estudiar como afectará el cambio climático a los eventos extremos de caudales.

Para ello se hizo uso de un modelo en HEC-HMS. El primer paso para crear el modelo fue un estudio de la zona, con el fin de obtener suficiente información para realizar futuras simplificaciones asegurando la fiabilidad de los resultados. Cabezón de la sal esta localizado en la cuenca del Saja, la más grande de la comunidad autónoma de Cantabria. De esta zona se recopiló información sobre su relieve, el uso del suelo y la litología de la zona. También se estudió el clima actual, tanto precipitación como temperatura.

Para inicial el modelo en HEC-HMS es necesario primero un modelo del terreno. Este se obtuvo a partir de un modelo digital del terreno procesado con las herramientas de GeoHMS y ArcHydroTools del software ArcGIS. Así se obtuvieron las diferentes subcuencas y tramos de cauce que se completaron en el

propio entorno del HEC-HMS. Después de asignar unos métodos y consecuentes parámetros iniciales basados en los conocimientos sobre el área de estudio fue necesario un proceso de calibración y validación para asegurar que el modelo se ajuste a la realidad. Para ello se compararon los caudales producidos por el programa con los registrados históricos hasta que las diferencias entre ambos se redujeron a unos criterios aceptables.

Una vez finalizado el modelo, el paso siguiente fue estudiar las proyecciones futuras de precipitación y temperatura. Para ello se han utilizado los datos proporcionados por el proyecto CORDEX. Con las series futuras, se obtuvieron dos series temporales de caudales entre los años 2048 y 2068. Cada una de estas series se corresponde con un escenario de cambio climático diferente, diferenciados por diferentes concentraciones de CO_2 en la atmósfera. Para compararlas con el periodo actual se produjo también una serie de caudales entre 1998 y 2018 utilizando el modelo y los datos históricos de inundación y temperatura.

Se procedió con un análisis estadístico para comparar las tres series, obteniendo los caudales correspondientes a distintos periodos de retorno mediante el método de Gumbel. Los resultados muestran que las diferencias entre los dos escenarios futuros son prácticamente nulas, dando lugar a entender que mayores concentraciones de CO_2 no darán lugar a grandes cambios a nivel de caudales para el futuro cercano. Las diferencias entre los caudales futuros y actuales son algo mayores, pero igualmente despreciables. Se deduce de estos resultados que la localidad de Cabezón de la Sal no sufrirá grandes cambios con respecto a la amenaza de inundación y por tanto las medidas actuales que se tomen para mitigar los daños materiales serán igualmente efectivas en el futuro cercano.

Abstract

Title: Analysis of the current and future flood threat in Cabezón de la Sal

Author: Pablo Alonso Alguacil

Directors: Manuel del Jesus Peñil, Jesús Casado Rodríguez

Date: June 2020

Key Words: Cabezón de la Sal, Hydrological Model, Flood, Climate Change, Return Period

The purpose of this study is to analyze how flooding will vary over time in the Saja river due to the effects of Climate Change.

Due to the emissions of greenhouse gasses that started with the industrial revolution and continued to grow since then, the atmosphere has reached levels of concentration of carbon dioxide greater than the historical values pre-revolution. As a result, the equilibrium of the processes that kept the Earth's temperature stable have been altered, as the globe stores more energy each day increasing the mean temperature of the planet.

At a global scale the consequences of climate changes are already noticeable, for example, the north pole is melting at a faster rate as time progresses. However, it will take years before we experience most of them. This gives societies some time to make policies that will mitigate these effects, but for them to work it is necessary to understand the extent of the climate variations, both at a global scale and at a local scale.

Due to the economic dependency that exists between Cabezón de la Sal and the Saja river, besides its great ecological value, this location has been taken as the center of the study. Furthermore and because of flooding events being recurrent in the lives of the population, the study will be focused on how climate change will affect extreme events of discharge.

To do this a HEC-HMS model was used. The first step was to analyze the area of interest to obtain enough information so that future simplifications could be made without compromising the veracity of the results. Cabezón de la Sal is located within the watershed of the Saja river, the biggest of the community of Cantabria. The information that was collected includes the topography of the area, land use and lithology. Because a lot of the work will be with precipitation and temperature, it was also relevant to look into the current climate.

To start a model in HEC-HMS we first need a model of the land. This was obtained using a Digital Elevation Model processed using the GeoHMS and ArcHydroTools in an ArcGIS environment. The result was a series of sub basins and stream segments that were completed in the HEC-HMS environment. Methods for the model and their corresponding parameters were assigned based on the knowledge of the area of study. After this the model had to be calibrated and validated to ensure that it was representative of reality. The process was

carried out by comparing the time series of discharged produced by the model and those historically recorded. The parameters are then adjusted to improve the similarity between both time series, until quality standards are met, and we can confidently say that the results are representative of reality and our conclusions valid.

Once the model was created, the next step was to study the future predictions of temperature and precipitation. Data provided by the project CORDEX was used to achieve this end. Once the future time series were obtained two time series of discharge were produced between the years 2048 and 2068. Each of the represents one different situation of climate change, the difference being in the amount of CO₂ in the atmosphere. To compare them with the actual period of time another time series of discharge was produced, between the years 1998 and 2018. This was achieved using the model and the historical data of precipitation and temperature.

What followed was the statistical analysis of the three time series in order to compare them, obtaining the discharge corresponding to different return periods via the Gumbel method. The results showed that the differences between both of the future series were practically non-existent, at least regarding discharges. This goes to show that bigger concentrations of CO₂ will not result in big changes of discharges in the near future. The differences between the future events and the actual ones are somewhat bigger but still very small. What can be concluded from these results is that for the location of Cabezón de la Sal, climate change will not have a significant effect on flooding recurrence or intensity. Therefore, any measure that is implemented to mitigate material damages will be equally effective in the near future.

Contenido

1. Introducción	8
2. Características del área de estudio	11
2.1 Localización	11
2.2 Hidrografía	12
2.3 Relieve	13
2.4 El suelo	15
2.4.1 Litología	15
2.4.2 Usos del suelo	16
2.5 Clima	17
2.5.1 Precipitación	17
2.5.2 Temperatura	19
3. Modelo del terreno	21
3.1 Procedimiento	21
4. Modelo hidrológico	24
4.1. Separación de la lluvia neta	24
4.1.1 Simple Canopy	24
4.1.2 Simple Surface	25
4.1.3 Soil Moisture Accounting Loss	25
4.2. Escorrentía directa	27
4.2.1. Clark Unit Hydrograph	27
4.3. Escorrentía total	28
4.3.1. Linear Reservoir	28
4.4. Tránsito de Hidrogramas	28
4.4.1. Muskingum Routing	28
4.5. Modelo Meteorológico	29
4.5.1. Series temporales de precipitación	29
4.5.2. Evapotranspiración y temperatura	30
5. Calibración y validación del modelo	32
5.1. Criterios para la calibración	32
5.2. Metodología	33
6. Estudio del cambio climático	37
6.1. Predicciones globales	37
6.2. Predicciones locales	39
7. Análisis estadístico	45
7.1. Serie Histórica	47
7.2. Escenario RCP 4,5	50
7.3. Escenario RCP 8,5	52

7.4. Eventos Extremos	53
8. Conclusiones	56
Bibliografía	58
A. Parámetros del modelo	60
B. Estaciones meteorológicas	63
C. Análisis estadístico	65

Índice de figuras

<i>Figura 1 Río Saja y afluentes (Confederación hidrográfica del cantábrico, O.A.)</i>	11
<i>Figura 2 Mapa de relieve de la subcuenca (Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria)</i>	12
<i>Figura 3 Aforo del río Saja en Puente San Miguel - Año 2015</i>	12
<i>Figura 4 Perfil longitudinal del río (Confederación Hidrográfica del Cantabrico)</i>	13
<i>Figura 5 Mapa de pendientes Saja-Besaya (Confederación Hidrográfica del Cantabrico)</i>	14
<i>Figura 6 Mapa de elevaciones Saja-Besaya (Confederación Hidrográfica del Cantabrico)</i>	14
<i>Figura 7 Litología de la cuenca Saja-Besaya (Confederación Hidrográfica del Cantabrico)</i>	15
<i>Figura 8 Usos del suelo</i>	16
<i>Figura 9 Régimen Pluviométrico de Cantabria (Ansell Trueba, y otros)</i>	18
<i>Figura 10 Precipitación diaria en la cuenca Saja-Besaya. Año 2015</i>	18
<i>Figura 11 Régimen Termométrico de Cantabria (Ansell Trueba, y otros)</i>	19
<i>Figura 12 Temperatura media diaria en la cuenca Saja-Besaya. Año 2015</i>	20
<i>Figura 13 Modelo Digital Del Terreno. Datos del CNIG</i>	21
<i>Figura 14 Subcuencas y tramos principales</i>	22
<i>Figura 15 Subcuencas finales</i>	22
<i>Figura 16 Modelo en HEC-HMS</i>	23
<i>Figura 17 Distintos valores hidráulicos del suelo en Europa (Tóth, y otros, 2017)</i>	26
<i>Figura 18 Ejemplo de líneas isócronas (Sánchez San Román)</i>	27
<i>Figura 19 Cuenca del Saja en rojo y red de estaciones de AEMET</i>	29
<i>Figura 20 Centroides de las subcuencas del modelo</i>	30
<i>Figura 21 Caudales registrados</i>	32
<i>Figura 22 Resultados antes de la calibración</i>	33
<i>Figura 23 Resultados de la primera calibración</i>	34
<i>Figura 24 Resultados de la primera validación</i>	35
<i>Figura 25 Calibración final</i>	36
<i>Figura 26 Validación final</i>	36
<i>Figura 27 Emisiones de CO₂ y escenarios de cambio climático (IPCC, 2014)</i>	37
<i>Figura 28 Incremento de la temperatura media global (IPCC, 2014)</i>	38
<i>Figura 29 Cambio globales de temperatura y precipitación (IPCC, 2014)</i>	39
<i>Figura 30 Predicciones de cambio climático en Cabezón de la Sal. RCP 8,5 Temperatura</i>	41
<i>Figura 31 Predicciones de cambio Climático en Cabezón de la Sal. RCP 8,5 Precipitación</i>	41
<i>Figura 32 Predicciones de cambio climático en Cabezón de la Sal. RCP 4,5 Temperatura</i>	41
<i>Figura 33 Predicciones de cambio climático en Cabezón de la Sal. RCP 4,5 Precipitación</i>	42
<i>Figura 34 Deltas de precipitación</i>	43
<i>Figura 35 Deltas de temperatura</i>	43
<i>Figura 36 Caudales históricos</i>	45
<i>Figura 37 Caudales 2048-2068 para RCP 4,5 (azul) y RCP 8,5 (naranja)</i>	46
<i>Figura 38 Comparación de caudales 2060</i>	46
<i>Figura 39 Caudales históricos y RCP 4,5</i>	47
<i>Figura 40 Histograma de la serie histórica</i>	48
<i>Figura 41 Ajuste Log-Normal serie histórica</i>	49
<i>Figura 42 Mejores ajustes de la serie histórica</i>	49
<i>Figura 43 Diagramas QQ y PP. Ajuste logarítmico-normal. Serie histórica</i>	50
<i>Figura 44 Histograma del escenario de RCP 4,5</i>	51
<i>Figura 45 Ajuste logarítmico normal escenario RCP 4,5</i>	51

Figura 46 Mejores ajustes de la serie de RCP 4,5	51
Figura 47 Histograma del escenario RCP 8,5	52
Figura 48 Ajuste logarítmico normal escenario RCP 8,5	53
Figura 49 Mejores ajustes de la serie de RCP 8,5	53
Figura 50 Mejores ajustes estadísticos serie Histórica	65
Figura 51 Diagramas QQ y PP. Serie Histórica. Distribución log-normal	65
Figura 52 Diagramas QQ y PP. Serie Histórica. Distribución beta	66
Figura 53 Diagramas QQ y PP. Serie Histórica. Distribución Pearson III	66
Figura 54 Mejores ajustes estadísticos RCP 4,5	67
Figura 55 Diagramas QQ y PP. RCP 4,5. Distribución log-normal	67
Figura 56 Diagramas QQ y PP. RCP 4,5. Distribución beta	68
Figura 57 Diagramas QQ y PP. RCP 4,5. Distribución Pearson III	68
Figura 58 Mejores ajustes estadísticos RCP 8,5	69
Figura 59 Diagramas QQ y PP. RCP 8,5. Distribución log-normal	69
Figura 60 Diagramas QQ y PP. RCP 8,5. Distribución beta	70
Figura 61 Diagramas QQ y PP. RCP 8,5. Distribución Pearson III	70

Índice de tablas

Tabla 1 Criterios para el ajuste del Nash-Sutcliffe	33
Tabla 2 Modelos de cambio climático	40
Tabla 3 Parámetros estadísticos de la serie histórica	48
Tabla 4 Parámetros Log-Normal Serie Histórica	49
Tabla 5 Parámetros estadísticos RCP 4,5	50
Tabla 6 Parámetros Log-Normal RCP 4,5	51
Tabla 7 Parámetros estadísticos RCP 8,5	52
Tabla 8 Parámetros Log-Normal RCP 8,5	53
Tabla 9 Periodos de retorno	54
Tabla 10 Parámetros de Gumbel (Román, 2008)	54
Tabla 11 Periodos de retorno	55
Tabla 12 Parámetros Físicos del Modelo	60
Tabla 13 Parámetros finales	61
Tabla 14 Parámetros finales	61
Tabla 15 Parámetros antes de la calibración	62
Tabla 16 Parámetros antes de la calibración	62
Tabla 17 Estación pluviométricas	63
Tabla 18 Estaciones termométricas	63
Tabla 19 Estación de aforo	64
Tabla 20 Caudales máximos anuales	71
Tabla 21 Parámetros de la distribución Gumbel	71

1. Introducción

La revolución industrial comenzó en Inglaterra a mediados del siglo XVIII dando lugar unos nuevos modelos económicos e industriales que posteriormente se expandirían al resto del mundo. Esto fue posible gracias a los avances tecnológicos sobre la máquina de vapor y el acceso a grandes recursos de carbón para alimentarlas. Los modelos socioeconómicos han cambiado desde entonces, el desarrollo del transporte y las telecomunicaciones han creado una sociedad globalizada enfocada no tanto a la industria, si no a los servicios sociales. Lo que no ha cambiado desde el siglo XVIII es el constante incremento de las necesidades energéticas de la población. Para abastecer estas necesidades se ha recurrido tradicionalmente a los llamados combustibles fósiles, carbón, petróleo y gas natural, cuya combustión libera en la atmosfera gases de efecto invernadero, principalmente CO₂.

Los gases de efecto invernadero no son una creación humana, si no que se encuentran en la atmosfera de forma natural y son necesarios para que exista vida en la tierra. Estos gases generan una barrera que impide que la radiación solar que llega al planeta vuelva al espacio, manteniendo así una cantidad adecuada de calor en la superficie. Las actividades biológicas regulan la concentración de estos gases. Por un lado, los organismos que realizan la fotosíntesis consumen parte de este CO₂ incorporando el carbono en su estructura y produciendo oxígeno. Por otro lado, durante la respiración de los organismos se consume este oxígeno para producir energía y se desprende a la atmosfera CO₂. Durante millones de años este ciclo ha dado como resultado unas concentraciones de estos gases relativamente pequeñas, generando una atmosfera adecuada para la vida y acumulando el carbono en el suelo, que con el paso del tiempo se transformará en combustibles fósiles.

A medida que las sociedades industrializadas modernas emplean estos combustibles para satisfacer sus necesidades energéticas liberan en la atmosfera este carbono en forma de CO₂, alcanzando concentraciones en la atmosfera superiores a las habituales. En consecuencia, el efecto invernadero se ve amplificado almacenando cada vez más calor, dando lugar un incremento global de la temperatura media. El CO₂ no es la única causa de este fenómeno, gases como el vapor de agua, el metano o los clorofluorocarburos también contribuyen en mayor o menor medida. De hecho, el H₂O de la atmosfera es el principal contribuyente al efecto invernadero. A pesar de esto, pequeñas variaciones en el resto de los gases de este grupo afectaran a largo plazo a todos los ecosistemas de la tierra, iniciando en algunos casos procesos de retroalimentación.

Las consecuencias del incremento de estos gases ya se empiezan a notar en muchos puntos del planeta donde cada vez se registran temperaturas mas cálidas. El deshielo del ártico es posiblemente el ejemplo más visible de este fenómeno, donde la capa de hielo experimenta cada vez mas cambios en su tamaño. Aunque esto ocurre en cierta medida de manera natural, se puede

observar que cada vez las pérdidas son mayores en los meses de verano, y gran parte del hielo que se pierde no se recupera en los meses fríos.

El calentamiento global no afecta solo a las temperaturas; tormentas y huracanes mas extremos, olas de calor mas frecuentes o el aumento del nivel del mar son realidades que cada vez se experimentan más a menudo. Aunque los cambios a nivel global sean los mas llamativos, lo cierto es que muchos de estos cambios solo ocurrirán a largo plazo, dejando a las sociedades tiempo de maniobra para mitigar los posibles daños.

El objetivo de este estudio toma una dirección diferente, analizando efectos que tiene el cambio climático a escala local, concretamente en Cabezón de la Sal. Este municipio cuenta con una población de mas de 8000 habitantes, distribuidos entre distintos poblados, todos ellos situados en la cuenca hidrográfica del rio Saja. En época de crecidas, las inundaciones en estos poblados son frecuentes, lo cual ha llevado a las autoridades gubernamentales a crear medidas de protección con el fin de proteger sus recursos y evitar pérdidas económicas por daños materiales (Ayuntamiento de Cabezón de la Sal, 2013). La inversión que supone llevar acabo estas medidas ascienden hasta cifras de 210.000 euros en los proyectos mas grandes.

Si los efectos del cambio climático afectan a la frecuencia e intensidad de estos eventos es posible que en un futuro no tan lejano estas medidas de contención y prevención no sean suficientes para prevenir daños materiales o, en caso de que la intensidad de estos eventos disminuya, estén sobre diseñados para los eventos futuros. Independientemente de los resultados de las predicciones, es necesario estudiarlas con el fin de poder hacer un uso responsable de los recursos económicos y ambientales de la zona.

La relación entre la comunidad y el rio va mas allá de los eventos de inundación. Al ser áreas mayoritariamente rurales la agricultura y la ganadería impulsan la economía de la zona. Una reducción del caudal podría afectar a estas actividades y aunque la sequía en Cantabria este lejos de ser un peligro, es posible que estas comunidades deban adaptarse en algún momento a un descenso de los recursos hídricos, especialmente en los meses secos.

Cabe destacar que mas allá de Cabezón de la Sal, en Torrelavega, el Saja y el Besaya dando lugar a la cuenca hidrográfica mas grande de la comunidad autónoma. Aunque en este estudio solo se estudiará parte del cauce, es importante tener en cuenta que los resultados serán relevantes no solo para Cabezón de la Sal si no también para los territorios que se encuentren aguas abajo. Por ejemplo, Torrelavega y sus alrededores son zonas de carácter industrial, donde empresas como Solvay o Sniace han dependido históricamente de las aguas del Saja-Besaya para sus procesos de producción.

La estrecha relación entre el cauce y la economía de la zona han dado como resultado que el régimen hídrico natural del río halla sido altamente modificado. De acuerdo con los datos proporcionados por la consejería del medio ambiente del Gobierno de Cantabria se estima que hasta el 7% de su recorrido ha sido canalizado. Otras alteraciones notables incluyen los 11 puntos de toma de caudal y 20 azudes (Directiva marco del agua Cantabria).

Independientemente de la economía gran parte de la zona es considerada de alto valor patrimonial. La cuenca hidrológica Saja-Besaya cuenta con el Parque Natural Saja-Besaya y la Reserva Nacional del Saja, zonas de gran valor ecológico y paisajístico. El parque natural es el mas grande de Cantabria, y sus ecosistemas dependen del cauce del río para su correcto desarrollo.

Ya sean económicos o patrimoniales, existen números motivos para proteger el río y asegurar el uso sostenible de sus recursos a lo largo de su cauce. El objetivo de este estudio es por tanto estudiar como van a variar los caudales en el futuro según los distintos escenarios posibles de cambio climático. En concreto se decidió como variara la amenaza de inundación, puesto que este parece ser el mayor problema al que se enfrenta la comunidad de Cabezón de la Sal. Se espera que los resultados permitan ofrecer una idea de las posibles futuras dificultades que surgirán en el municipio debido al cambio climático.

2. Características del área de estudio

El objetivo de este apartado consiste en ofrecer información sobre el área que se va a estudiar. A la hora de crear un modelo lo que se pretende es representar la realidad normalmente demasiado compleja para estudiarla como tal. A la hora de crear modelos se toman numerosas simplificaciones entendiendo que no afectaran a los resultados de forma notable y que cierto margen de incertidumbre es siempre inevitable. Conocer las características del área de estudio es necesario para hacer estas simplificaciones de forma coherente y evitando errores que podrían comprometer la fiabilidad de los resultados.

2.1 Localización

Cabezón de la sal es la capital del municipio homónimo de la comunidad autónoma de Cantabria y en la cuenca hidrológica del río Saja, en la vertiente cantábrica. Cuenta con una población de unos 8000 habitantes distribuidos entre la capital y otros poblados cercanos. El nacimiento del río está situado en la sierra del Cordel y recorre los municipios de Cabezón de la Sal y Reocín entre otros, para luego juntarse con el Besaya antes de llegar a su desembocadura en el océano atlántico, entre los municipios de Suances y Miengo. En la figura 1 se puede ver el recorrido del cauce y sus diferentes afluentes, siendo los más

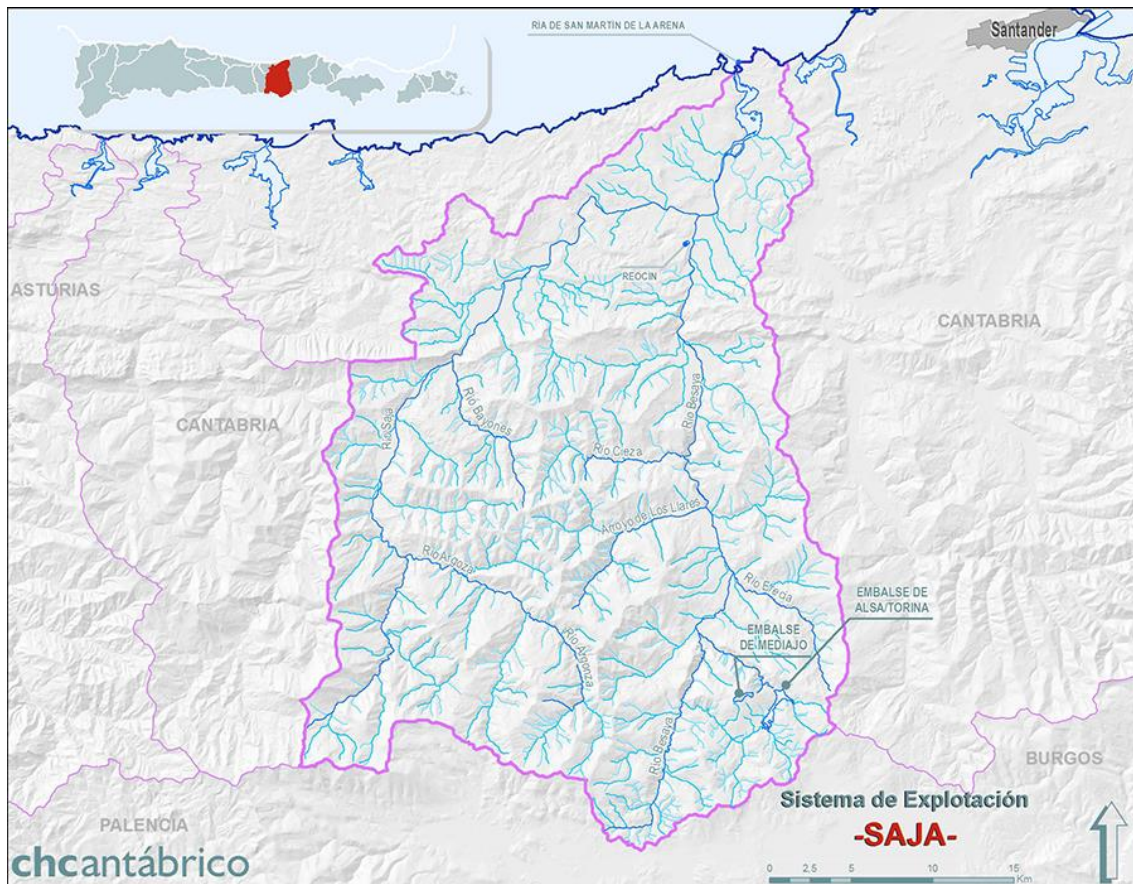


Figura 1 Río Saja y afluentes (Confederación hidrográfica del cantábrico, O.A.)

importantes el Besaya en Torrelavega, el río Argonza en Correpoco y el río Bayones en Ruate.

El río debe su nombre al primer pueblo que cruza y tendrá que recorrer 67 kilómetros hasta llegar a su desembocadura. Su cuenca hidrográfica, representada en la figura 1, es la más grande de Cantabria, cubriendo hasta 982 km² de superficie. Limita al este con las cuencas del Nansa y del Escudo, al oeste con la cuenca del río Pas y al sur con la cuenca del río Ebro.

Puesto que el área de interés es Cabezón de la Sal, en este proyecto no se estudió la totalidad de la cuenca. Se tomó como punto final la entrada del río en Torrelavega y se modelaron todos los puntos aguas arriba de este. En la figura 2 se puede ver un mapa de relieve de la subcuenca estudiada.

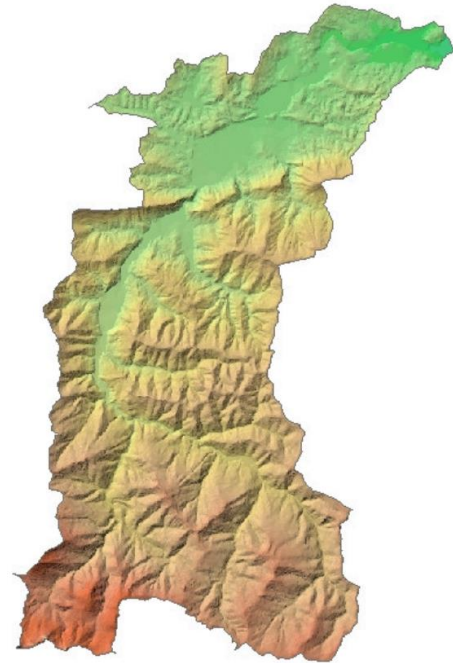


Figura 2 Mapa de relieve de la subcuenca (Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria)

2.2 Hidrografía

Debido a al clima de la zona, se pueden apreciar grandes diferencias en el caudal del río según la época del año. Existe una estación de aforo en el azud de puente San Miguel que registra los datos diarios. Para ver como se comporta el río en un año cualquiera se han representado los datos diarios del año 2015 en la figura 3. Aunque la información proporcionada por un solo año es limitada, se

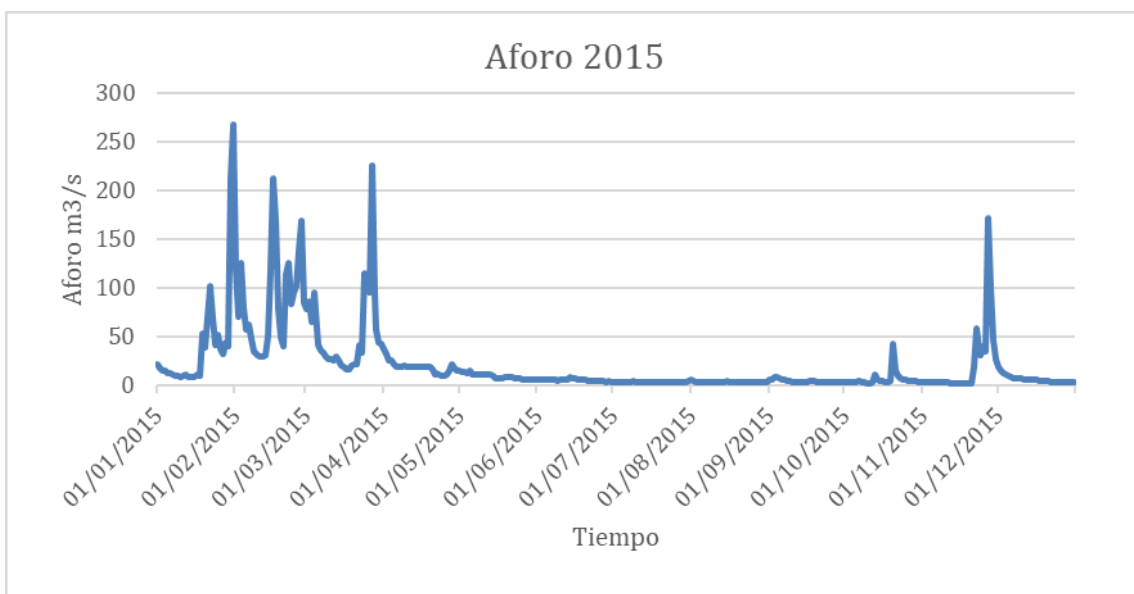


Figura 3 Aforo del río Saja en Puente San Miguel - Año 2015

puede apreciar que en los meses cálidos el cauce se mantiene constante con valores muy pequeños. La media en 2015 para los meses de verano fue de 5 m³/s, alrededor de la mitad de la media anual. A pesar de ser un valor relativamente pequeño, el riesgo de sequia es pequeño puesto que nunca llega a secarse.

En los meses de invierno las precipitaciones son fuertes y se generan caudales mucho mas altos. No solo aumenta el valor medio del caudal, también se generan eventos extremos con cierta frecuencia, normalmente 3 o 4 cada año. En consecuencia, cabezón de la sal es un área muy susceptible a las inundaciones. Estos resultados son coherentes con la frecuencia habitual de las precipitaciones en Cantabria.

2.3 Relieve

El nacimiento del río está situado a una gran altitud, de más de 1800 metros de altura. Los primeros kilómetros los pasa en zonas de alta montaña, caracterizada por fuertes pendientes. A medida que desciende poco a poco las pendientes se suavizan y el río se ensancha entrando en el valle de Cabuérniga. En este primer tramo se pasa de una altitud de 1800 metros a una altitud de 400 en solo sus 15 primeros kilómetros de cauce. Una vez alcanzada esta altitud los valles que cruza están caracterizados por tener pendientes mucho mas suaves, de forma que la mayor parte del tiempo se encuentra bajo 400 metros sobre el nivel del mar. En la figura 4 se ha representado un perfil longitudinal del río donde se aprecian estos cambios de altitud.

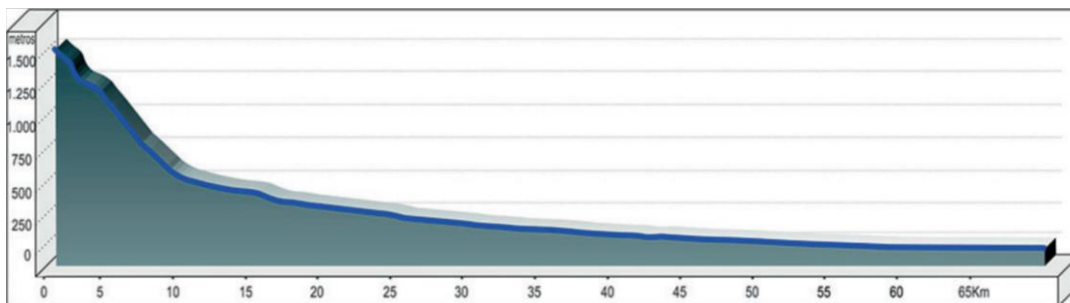


Figura 4 Perfil longitudinal del río (Confederación Hidrográfica del Cantabrico)

En cuanto a la subcuenca la zona del sur es de alta montaña, y a medida que se avanza hacia el norte los valles se abren, entrando en una zona de meseta hasta la desembocadura del río. Alrededor del 30% de la superficie constan con una pendiente de entre 41 y 100%. Esto principalmente ocurre en el cauce alto del río. La mayor parte de la superficie, un 40%, cuenta con una pendiente entre del 21 y el 40%. Estas características se corresponden con parte del cauce alto y parte del cauce medio. Luego, el 30% restante de la superficie tiene una pendiente de entre 0 y 20%, asociada al cauce bajo del río

Con respecto a las altitudes, aunque hay zonas de gran altitud estas solo constituyen un pequeño porcentaje de la superficie total. La confederación

hidrográfica del cantábrico estima que solo el 5% de la superficie cuenta con una altitud mayor a 1200 metros (siendo la altitud máxima 2000 metros). En contraste, la mayor parte de la superficie se encuentra por debajo de los 600 metros de altura. En las figuras 5 y 6 se muestra un mapa de pendientes y elevaciones respectivamente para toda la cuenca Saja-Besaya.

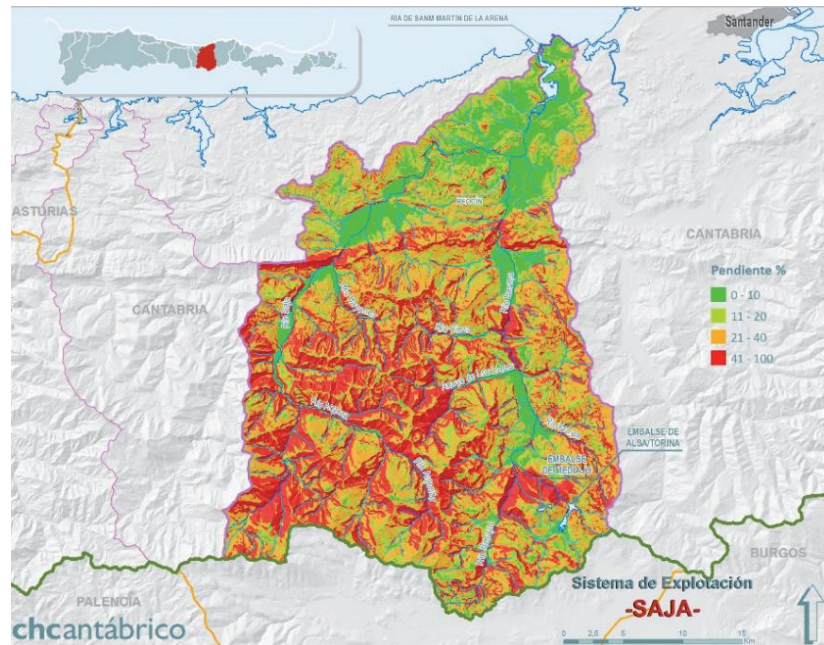


Figura 5 Mapa de pendientes Saja-Besaya (Confederación Hidrográfica del Cantábrico)

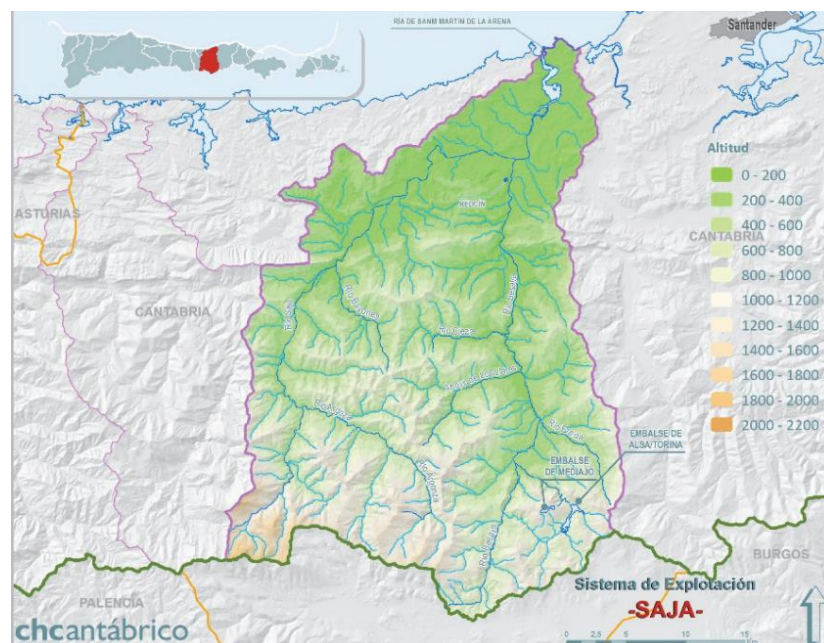


Figura 6 Mapa de elevaciones Saja-Besaya (Confederación Hidrográfica del Cantábrico)

2.4 El suelo

El suelo es quizá uno de los aspectos mas importantes a la hora de determinar como se mueve el agua por la subcuenca a distintos niveles. La forma y tipología de la superficie indicará cuanta precipitación quedará almacenada en charcos o en la propia vegetación, cuanta precipitación pasará al subsuelo y cuanta precipitación pasará directamente a ser escorrentía. Las características del subsuelo determinaran cuanta agua puede almacenar y a que velocidad se moverá por este. Por ello es necesario tener una idea de las características generales del terreno.

2.4.1 Litología

En el área de estudio de este proyecto predominan los conglomerados de areniscas, arenas y margas, existiendo. En la figura 7 se puede ver como la mayor parte del terreno, cauce alto y medio, esta compuesta por estos materiales, existiendo algunas áreas esparcidas con grandes cantidades de yeso además de las rocas ya citadas.

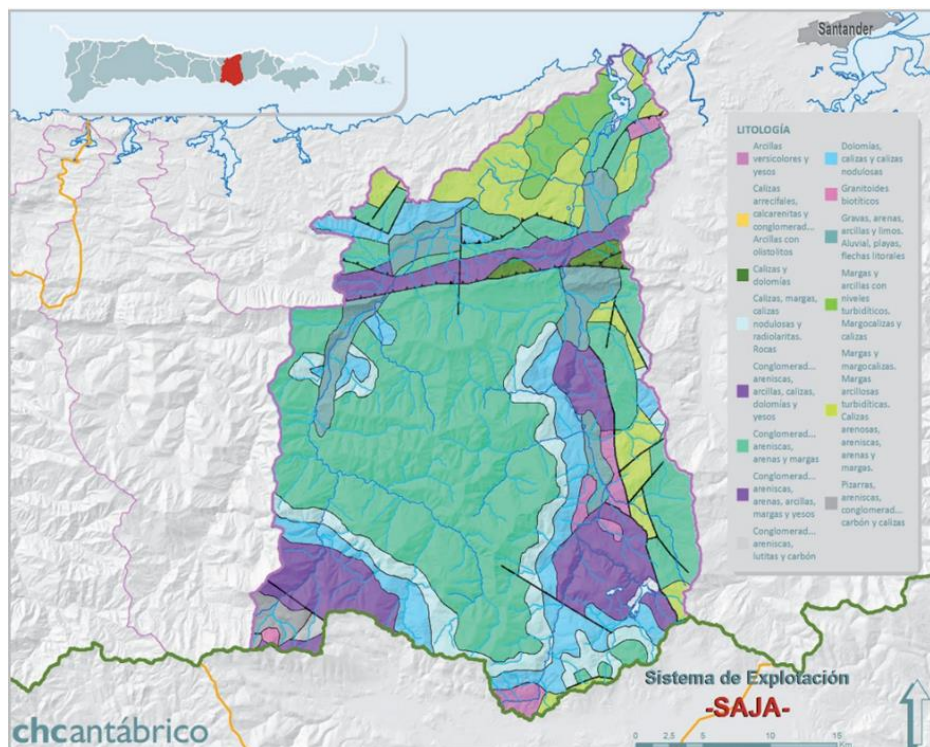


Figura 7 Litología de la cuenca Saja-Besaya (Confederación Hidrográfica del Cantábrico)

Existe una estrecha relación entre Cabezón de la Sal y la geomorfología de la zona. La economía de esta localidad estuvo basada en la extracción de sal debido a las intrusiones salinas cercanas. Cuando se empezó a extraer este mineral se inyectaban grandes cantidades de agua en el subsuelo que después se recogía y posteriormente se calentaba para decantar la sal. Debido al potencial económico de esta actividad, Cabezón de la sal se convirtió en uno de los pocos lugares de la zona donde se emplearon técnicas de minería para explotar este

recurso (Martínez Castizo, 2018). Aunque actualmente esta actividad económica halla cesado, las infraestructuras que aun quedan y la organización de los poblados son consecuencia de ella.

2.4.2 Usos del suelo

Aunque importante por su impacto económico, la minería solo compone un pequeño porcentaje el reparto de usos del suelo de la zona. Las aguas del Saja mantienen una gran cantidad de tierras fértiles empleadas para la ganadería y la agricultura mientras que las zonas de alta montaña están caracterizadas por sus amplios bosques. En la figura 8 se ha representado la distribución de los usos del suelo del área que corresponde al modelo. Los datos se obtuvieron del proyecto

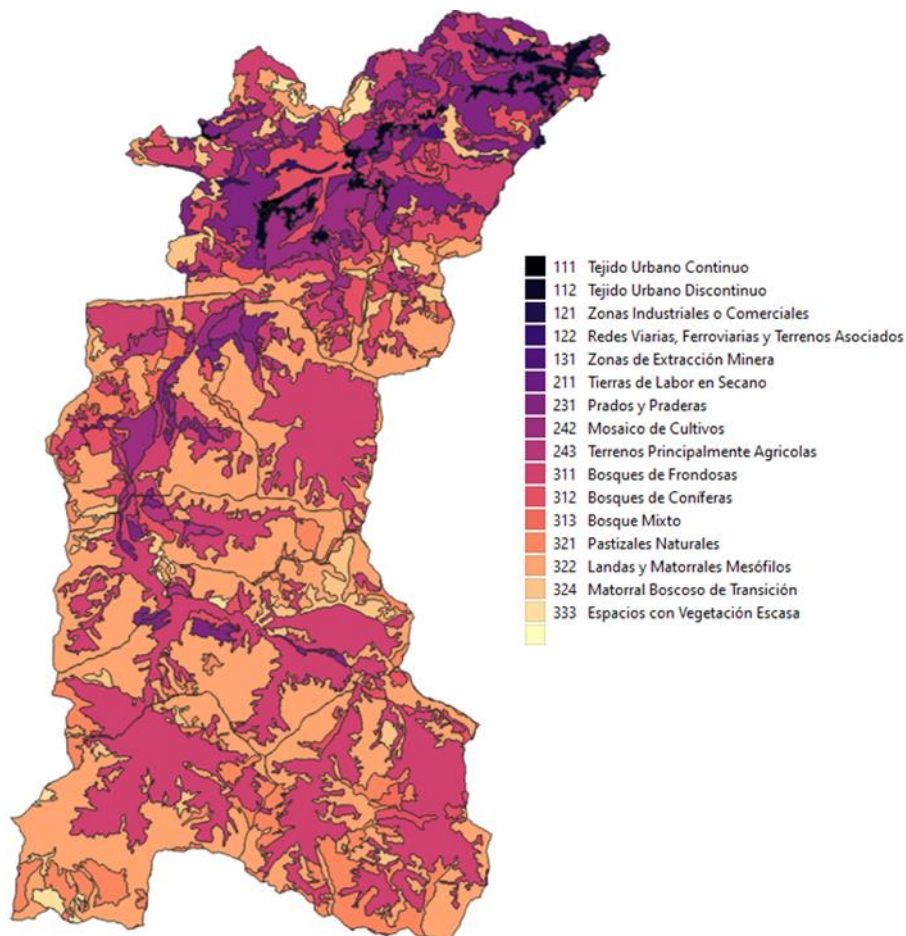


Figura 8 Usos del suelo

Corine Land Cover, una base de datos de la Unión Europea (Ministerio de medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010). Esta base de datos divide el territorio en 5 niveles principales cada uno con sus diferentes subniveles. Primero tenemos las superficies artificiales, entre las que encontramos zonas urbanas; industriales, comerciales y de transportes; y de extracción minera. Cubren un área importante de la zona norte de la subcuenca, donde se concentran los mayores núcleos de población.

En el segundo nivel se consideran las zonas agrícolas, están presentes en nuestro estudio las tierras de labor en secano; prados y praderas; mosaicos de cultivos; terrenos principalmente agrícolas. Están localizadas a las afueras de los poblados y siguiendo el cauce del río, respondiendo a las necesidades de la agricultura y la ganadería y a la fertilidad de las tierras cercanas al Saja.

El tercer nivel incluye las zonas de forestales con vegetación natural y espacios abiertos. Están repartidas por toda la subcuenca, pero especialmente en el cauce alto y medio. La mayor parte la componen bosques de frondosas, coníferas o mixtos. En menor medida aparecen zonas con landas y matorrales mesófilos, matorrales boscosos de transición y espacios con vegetación escasa.

El cuarto nivel se corresponde con las zonas húmedas y el quinto con las superficies de agua. Ninguno de los dos aparece en la zona del estudio. Esto se debe a que la única masa de agua es el curso natural, pero no alcanza un tamaño suficiente como para ser reconocido por el proyecto Corine Land Cover.

2.5 Clima

La precipitación y la temperatura van a ser las dos variables clave en el estudio del cambio climático, puesto que serán la diferencia entre el periodo histórico y los escenarios futuros. Cantabria debido a su proximidad con el mar esta caracterizada por tener un clima oceánico en la mayor parte de la comunidad, con la excepción de la zona de Liébana al oeste donde el clima es oceánico de tipo mediterráneo y al sur donde el clima es continental de tipo mediterráneo.

En este apartado se pretende dar una visión general del clima la zona de estudio. Es necesario considerar que el clima local depende en gran medida del clima global, por lo que además de Cabezón de la Sal se considerarán las características de Cantabria.

2.5.1 Precipitación

En Cantabria las precipitaciones son abundantes y superan el 1000 mm/año en la mayor parte de su superficie. Existen dos puntos donde las precipitaciones son aún mayores, llegando a alcanzar valores superiores a 2000mm/año. Estos son el valle de Miera y Pas y los picos de Europa. La zona mas seca se encuentra en el sur de comunidad, en Campoo-Los Valles donde la precipitación anual es de unos 700 mm/año (Ancell Trueba, y otros).

La variación entre los tres climas se puede ver en la figura 9, donde se puede apreciar como las diferencias entre los 3 climas ya mencionados. La cuenca del Saja-Besaya esta situada en una zona de clima oceánico por lo que cuenta con las mayores precipitaciones de los tres.

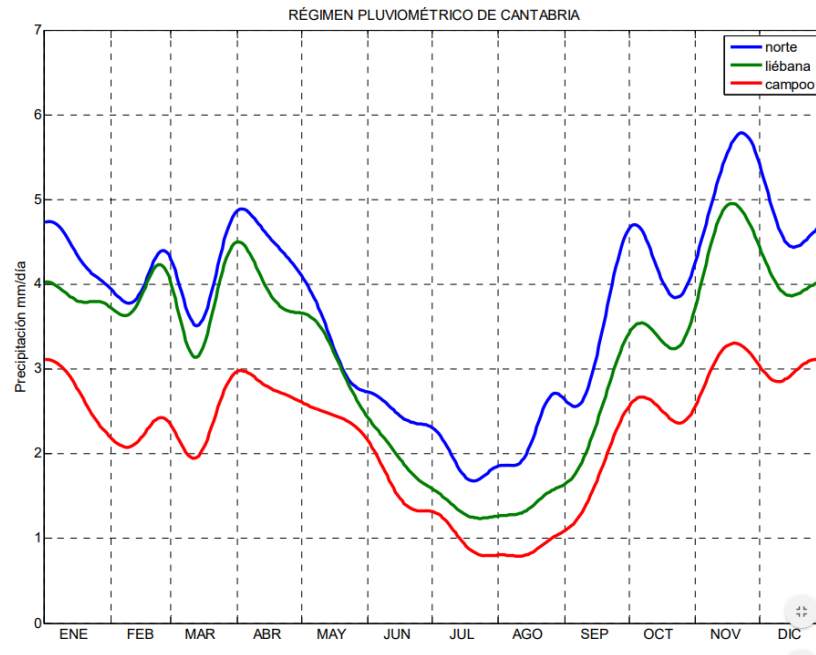


Figura 9 Régimen Pluviométrico de Cantabria (Ancell Trueba, y otros)

Las mayores precipitaciones ocurren en los meses de otoño, teniendo el mayor pico en noviembre, y primavera, con el segundo mayor pico en abril. Los mínimos suceden en los meses de verano. En la figura 10 se han representado la precipitaciones diaria recogida por la red de pluviómetros de AEMET en la cuenca Saja-Besaya durante el año 2015. En ella se aprecia como los picos coinciden con la tendencia de Cantabria. De nuevo, el clima local es dependiente del clima global y regional. También se puede apreciar en esta figura como, aunque se trata de una región húmeda, AEMET estima que solo una vez cada 15 días se produce un evento de precipitación superior a dos horas.

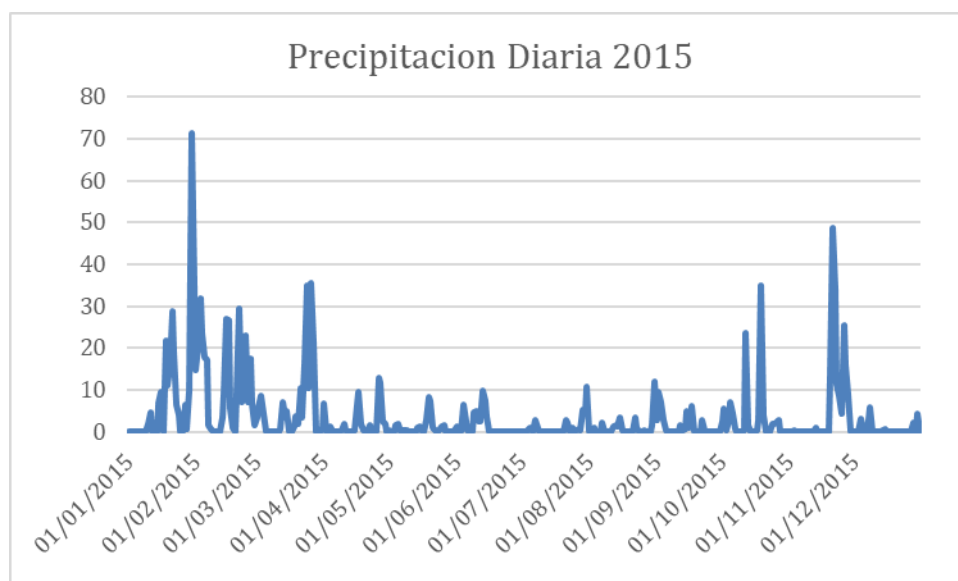


Figura 10 Precipitación diaria en la cuenca Saja-Besaya. Año 2015

La variación entre los datos actuales y las predicciones futuras se detallará en la sección 6 de este estudio. Sin embargo, cabe destacar que según los modelos de cambio climático la tendencia general en Cantabria apunta a una reducción de las precipitaciones, dependiendo esta reducción del escenario de cambio climático que se mire y del modelo empleado.

2.5.2 Temperatura

Al igual que hay grandes variaciones espaciales con la precipitación, existen cambios en la temperatura según la zona de Cantabria en la que nos encontremos. En la figura 11 se han representado estas diferencias. Como se puede, las temperaturas son mas altas en la zona norte de la región, a la que pertenece la cuenca Saja-Besaya. En la zona de Liébana y en la zona de Campoo las máximas son mas pequeñas y las mínimas son mas extremas. Esto es en parte debido al efecto que tiene el mar sobre la temperatura, y en parte a las diferencias de altitud. AEMET estima un descenso de 0,5°C de temperatura cada 100 metros sobre el nivel del mar (Ancell Trueba, y otros).

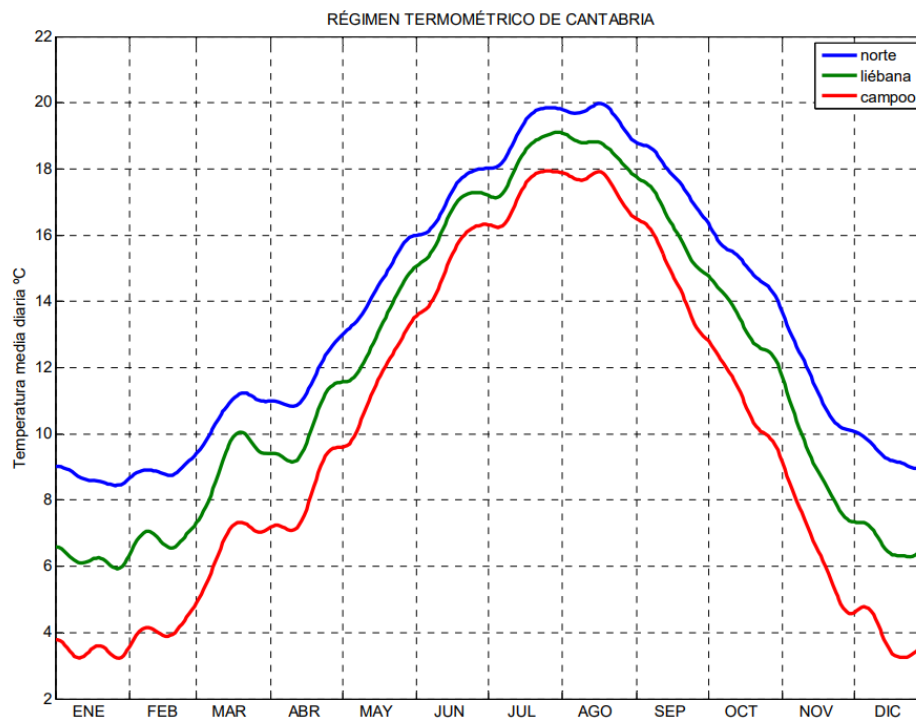


Figura 11 Régimen Termométrico de Cantabria (Ancell Trueba, y otros)

En el área de estudio es necesario considerar que existen variaciones muy grandes de altitud. Como ya se ha mencionado el río nace a una altura de 1800 metros por lo que es de esperar que las diferencias de temperatura entre el cauce alto y el cauce medio sean importantes.

En la figura 12 se ha representado la temperatura media diaria de toda la cuenca para el año 2015, con los datos proporcionados por AEMET. Se puede ver que hay grandes picos en los meses de verano con temperaturas de hasta 25°C, mientras que las temperaturas en febrero son las menores, rozando los cero °C debido a la influencia de las zonas de gran altitud.

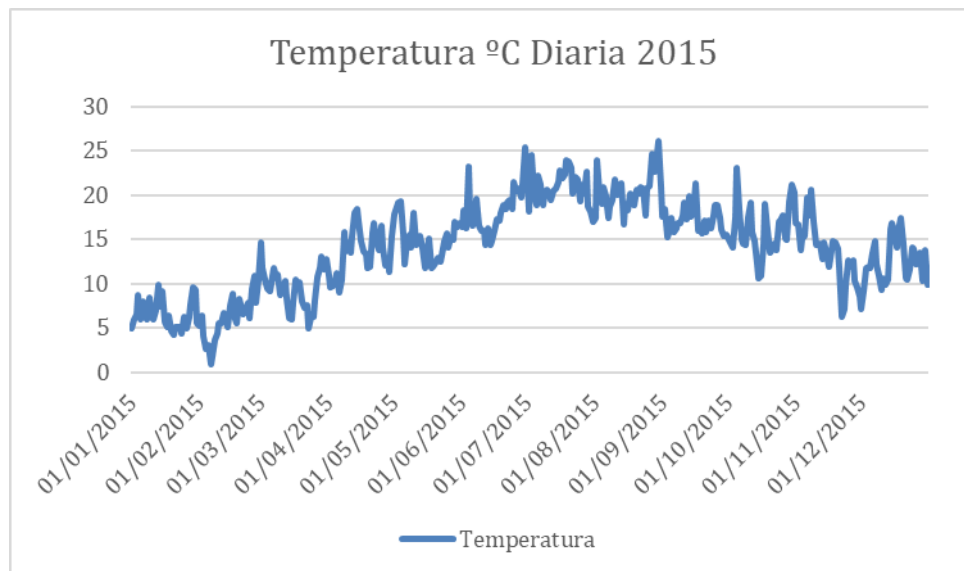


Figura 12 Temperatura media diaria en la cuenca Saja-Besaya. Año 2015

3. Modelo del terreno

El modelo hidrográfico se desarrolló en un entorno HEC-HMS, pero para ello es necesario partir de un modelo del terreno de la subcuenca. Este se desarrolló en un entorno ArcGIS a partir de un modelo digital del terreno proporcionado por el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). En la figura 13 se puede ver este modelo, cubriendo una extensión de toda Cantabria y con una precisión de 25m.

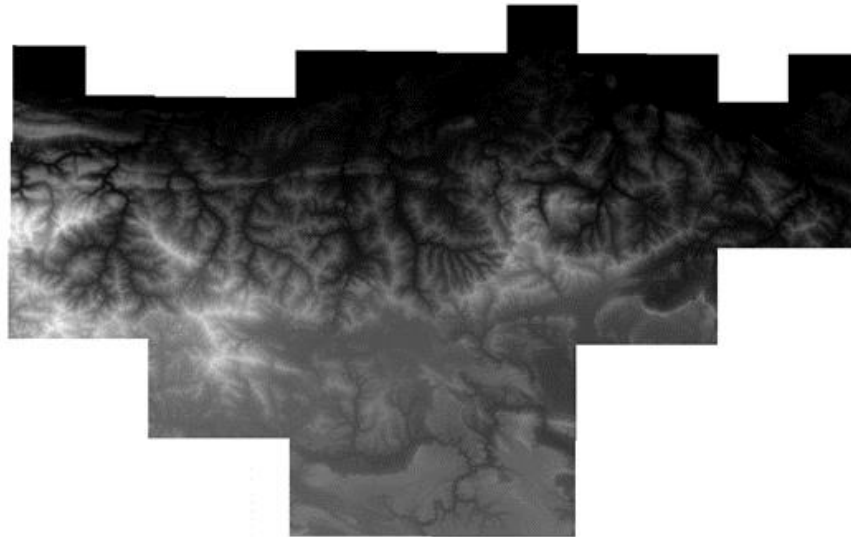


Figura 13 Modelo Digital Del Terreno. Datos del CNIG

Para trabajar con este modelo y generar los datos necesarios para exportarlos al HMS se emplearon las herramientas de HEC-GeoHMS y ArcHydroTools, que permiten trabajar con el MDT para generar las subcuencas y los cauces del sistema. Esto se hizo siguiendo una guía proporcionada por la Autoridad Nacional del Agua (Blanco, 2016).

3.1 Procedimiento

Primero fue necesario realizar unos primeros procesos con el MDT para evitar errores futuros. Estos incluyen un reacondicionamiento de los datos iniciales y el llenado de huecos, que nos permite modificar la elevación de celdas rodeadas por otras de mayor elevación, donde el agua se quedaría atrapada y no podría fluir.

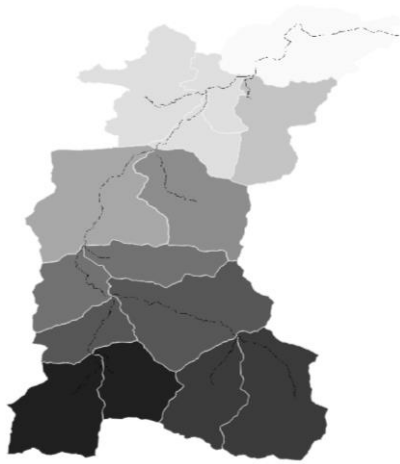


Figura 14 Subcuencas y tramos principales

Posteriormente se procede a calcular la dirección del flujo en cada celda, o lo que es lo mismo, la dirección de la máxima pendiente. Este paso es necesario para poder obtener la acumulación del flujo. Esta última herramienta nos permite obtener un modelo donde cada celda contiene el número agregado de las celdas que se encuentren aguas arriba de ella. Las celdas que contengan los valores mayores serán aquellas que pertenezcan a los cauces del río.

El cálculo se hace mediante la herramienta de definición de corrientes, que devuelve una red de corrientes en las que se incluyen aquellas celdas que contaban con una mayor acumulación del flujo. De esta red se pueden generar los tramos principales a través de la herramienta segmentación de corrientes. Para ello el programa toma un tramo principal y define el resto de los tramos en función de las uniones de los segmentos. Finalmente, con estos datos es posible delinear las subcuencas principales de nuestro modelo. Estos resultados se han representado en la figura 14 mediante el uso del programa de código abierto QGIS.

A partir de este punto es necesario realizar una serie de pasos para acondicionar los datos del terreno a un modelo de HMS, como la obtención de la pendiente o de las líneas de drenaje.

Uno de los pasos más significativos es la unión de las subcuencas. Inicialmente se obtuvieron 15 subcuencas diferentes que en el modelo hidrológico tendrían cada una sus respectivos parámetros. Es práctica común para reducir la carga de trabajo unir aquellas subcuencas adyacentes con características similares en una sola, entendiendo que este paso no tendrá un efecto significativo en los resultados finales. En consecuencia, la calibración del modelo será más sencilla y efectiva, al contar con menos variables.



Figura 15 Subcuencas finales

Para realizar esta unión se tuvieron en cuenta principalmente los usos del suelo recogidos en la sección 2 de este proyecto, puesto que muchos parámetros dependerán de las características de la superficie. Una vez unidas las subcuencas pertinentes también fue necesario

unir los segmentos de cauce de estas. En la figura 15 se han representado las subcuencas finales, pasando de 15 a solo 9, con el nombre según el cual serán referidas a lo largo del proyecto.

Otra de las decisiones más importantes que se tomaron en este momento fue la decisión del punto de escape de la cuenca a estudiar. Hasta ahora se había trabajado con un modelo de toda Cantabria, por lo que la elección de este punto dio lugar a las configuraciones vistas en las figuras 14 y 15.

La primera opción fue elegir cabezón de la sal, puesto que esta es el área de interés de nuestro estudio. Por desgracia, la primera estación de aforo se encuentra aguas abajo del municipio, por lo que hubiera sido imposible calibrar el modelo de haber tomado esta opción, al no disponer de datos históricos de avenidas. En consecuencia, se decidió tomar la primera estación de aforo como punto de escape. Esta se encuentra en Torrelavega, justo antes de la unión del Saja con el Besaya.

Con la cuenca completamente delineada y las subcuencas y tramos finales establecidos se procedió al cálculo de algunos parámetros necesarios. Áreas de las subcuencas, longitudes de los tramos y longitud del tramo mas largo, pendientes de los cauces y de las subcuencas y centros de gravedad de estas se obtuvieron directamente mediante las herramientas que ofrece HEC-GeoHMS. Finalmente se trasladaron todos estos datos a un formato con el que se puede trabajar en HMS para completar el modelo hidrológico, esto se ha representado en la figura 16.

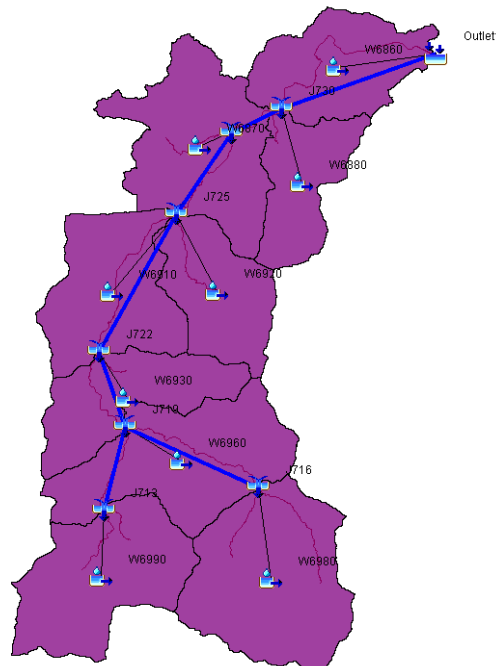


Figura 16 Modelo en HEC-HMS

4. Modelo hidrológico

Los modelos hidrológicos nos permiten representar de forma simplificada el ciclo del agua en el entorno que definamos. En este proyecto el modelo se creó usando el programa HEC-HMS. El objetivo de este apartado es definir las bases teóricas detrás del funcionamiento del programar y ofrecer los criterios básicos que se emplearon para definirle.

Estableciendo una serie de métodos y unas series temporales de entrada, HMS es capaz de generar el hidrograma de una subcuenca (Sanchez San Román, 2015). El calculo se realiza en 4 fases que se exponen a continuación.

4.1. Separación de la lluvia neta

Parte de la lluvia generará escorrentía directamente, mientras que otra parte se quedará retenida en la superficie o se infiltrará en el suelo. El programa utiliza 3 métodos diferentes para realizar este cálculo.

4.1.1 Simple Canopy

Primero se modeló la parte de la precipitación interceptada por la vegetación. Para ello se uso el método simple Canopy. De acuerdo con el manual de uso de HEC-HMS (Scharfenberg, y otros, 2018) este método considera la vegetación como un tanque que almacena toda la precipitación hasta que se llena. A partir de este punto el resto de la precipitación cae a la superficie. Queda definido por dos parámetros el almacenamiento inicial y la capacidad máxima de almacenamiento.

El almacenamiento inicial se da al programa como el porcentaje de la capacidad de almacenamiento que tiene agua. Al ser un valor inicial su impacto en las distintas simulaciones del modelo es mínimo, puesto que se corregirá durante el tiempo de calentamiento. Por tanto, se tomo un valor inicial de 0% para todas las subcuencas.

La capacidad máxima de almacenamiento se da en milímetros. Se obtuvo directamente de los mapas de uso del suelo mencionados en el apartado 2, dando un valor mayor, alrededor de 2 mm, a aquellas subcuencas donde predominan los bosques y valores más pequeños a las zonas donde se encuentran poblados u otras superficies artificiales, valores cercanos a 0,5 mm.

Aunque sea un método opcional y de menor relevancia, se consideró importante incluirle puesto que esta relacionado con la evapotranspiración. Esta depende de la temperatura y por tanto puede verse afectada por el cambio climático.

4.1.2 Simple Surface

La precipitación que no queda interceptada por la vegetación llega a la superficie donde podrá formar escorrentía, quedar almacenada en forma de charcos o ser infiltrada al suelo.

La superficie sigue un modelo muy parecido al de vegetación, en el sentido que cuenta con una capacidad máxima de almacenamiento y un valor inicial. De nuevo, el valor inicial se tomó como cero y el almacenamiento máximo en función del uso del uso del suelo, dentro de un rango de valores entre 40 y 100 mm.

La mayor diferencia entre la vegetación y la superficie es que para que el agua pase de la vegetación a la superficie debe alcanzar el almacenamiento máximo, mientras que para que pase de la superficie al suelo esta condición no es necesaria. Habrá infiltración siempre que haya agua en la superficie, y solo se acumulará cuando la precipitación supere la capacidad de infiltración. La parte de la precipitación que se infiltre quedará almacenada en el suelo, pudiendo formar escorrentía posteriormente.

4.1.3 Soil Moisture Accounting Loss

Este método describe las dinámicas del movimiento del agua en el suelo mediante una serie de parámetros repartidos en cuatro niveles. Primero cuenta con un nivel superficial del que hay que definir dos parámetros.

Uno de ellos es el porcentaje de suelo impermeable. Para obtenerlo se calculó la media para cada subcuenca, tomando como área impermeable aquellos suelos de uso artificial (poblados, minas...) y áreas permeables aquellos suelos con vegetación, según la calificación Corine Land Cover descrita en el apartado 2 (Ministerio de medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010).

El segundo es la infiltración máxima. Para obtenerlo se hizo uso de una base de datos europea de la fundación nacional húngara de investigación científica (OTKA) que cuenta con diferentes valores hidráulicos del suelo a diferentes profundidades hasta 250 metros (Scharfenberg, y otros, 2018). Puesto que este parámetro es de carácter superficial, se obtuvo la media de cada subcuenca a profundidad cero.

En la figura 17 se han representados los mapas europeos de los distintos valores hidráulicos de esta base de datos. THS se refiere al contenido de agua para suelo saturado (equivalente a la porosidad), FC se refiere a la capacidad de campo, WP al punto de marchitez y KS a la conductividad hidráulica para el suelo saturado. Serán necesarios varios de estos valores para definir los distintos métodos del modelo.

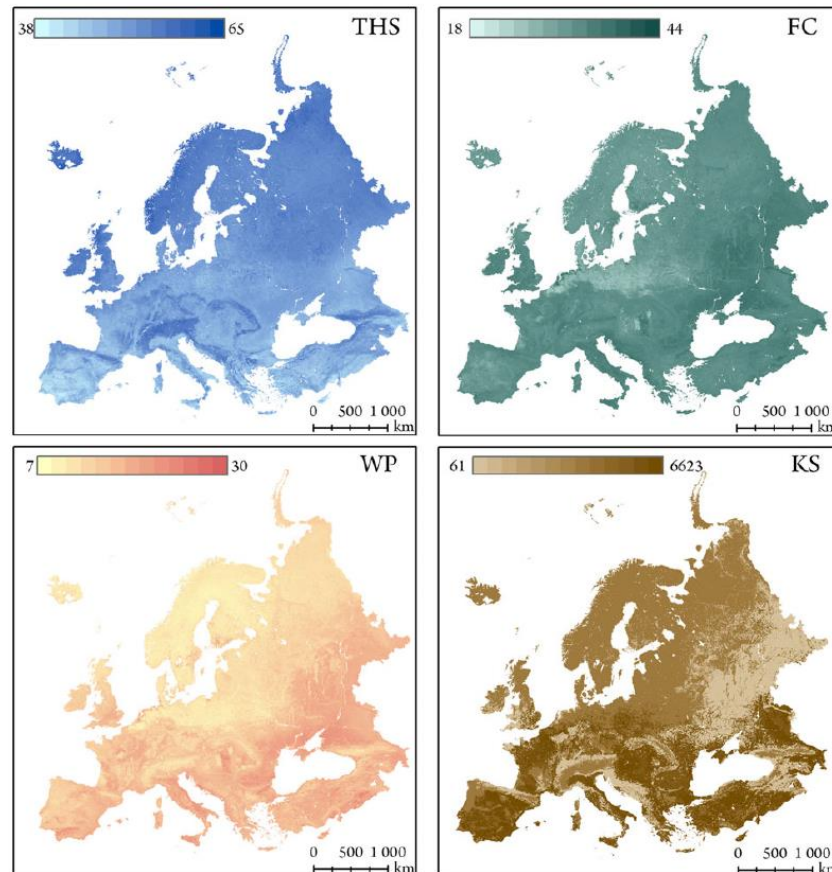


Figura 17 Distintos valores hidráulicos del suelo en Europa (Tóth, y otros, 2017)

El agua que se infiltre pasará al segundo nivel, referido en el programa como suelo. El suelo se comporta como un tanque en el sentido que es capaz de almacenar agua. Como valores iniciales del almacenamiento se tomaron valores relativamente altos, alrededor del 75% puesto que los suelos de Cantabria suelen estar húmedos.

El movimiento del agua en el suelo queda definido por la capacidad de campo, la percolación y el almacenamiento máximo. Los dos primeros valores fueron de obtención directa empleando la base de datos ya mencionada. Además, se obtuvo el valor de la porosidad. El almacenamiento máximo es algo más complicado de obtener, se estimó como el producto entre la porosidad y la profundidad del suelo que se estimó en 20 cm.

El programa considera dos tanques más, llamados subsuelo 1 y 2, idénticos en términos de parámetros y diferenciados por la profundidad. Para su almacenamiento inicial se tomaron valores mayores a los del suelo, del orden del 80% y 90% respectivamente. Los parámetros de almacenamiento máximo, porosidad y percolación se obtuvieron siguiendo los mismos pasos que con el nivel del suelo. Además, los niveles subterráneos cuentan con un coeficiente cada uno que de acuerdo con el manual (Scharfenberg, y otros, 2018) definen el tiempo que tarda el agua almacenada en convertirse en un flujo lateral,

capaz de generar flujo base posteriormente. Se asumieron valores arbitrarios de 100 horas para el nivel subterráneo 1 y 1000 horas para el nivel subterráneo 2, con la idea de ajustarlos después en la calibración.

4.2. Escorrentía directa

Una vez calculado que parte de la precipitación es interceptada o infiltrada, el resto queda como precipitación neta o efectiva capaz de producir escorrentía directa. El método elegido para ello fue el hidrograma unitario de Clark.

4.2.1. Clark Unit Hydrograph

Este método divide el área de la subcuenca en una entre líneas isócronas de forma que toda la precipitación que cae dentro de un mismo área cuenta con el mismo tiempo de retardo (Sánchez San Román), tal y como se ha esquematizado en la figura 18. El programa cuenta con unas expresiones integradas para hacer los cálculos de las diferentes áreas por lo que los parámetros necesarios en este caso son el tiempo de concentración y un coeficiente de almacenamiento.

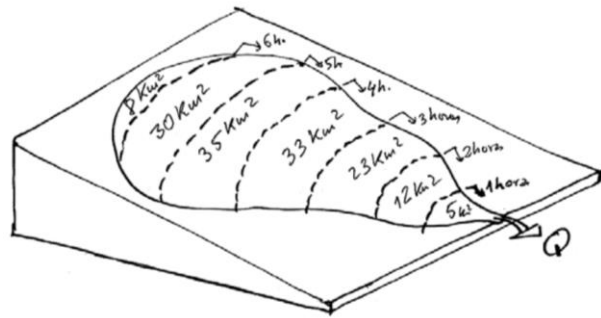


Figura 18 Ejemplo de líneas isócronas (Sánchez San Román)

El tiempo de concentración es el tiempo máximo que tarda el agua en pasar la subcuenca. Se ha obtenido usando la ecuación de Kirpich, modificada a unidades métricas por el profesor Javier Sánchez San Román en sus apuntes para la universidad de salamanca (Sánchez San Román). Para obtener el valor final del tiempo de concentración es necesario conocer la longitud del tramo de cauce y la pendiente media, cuyos valores ya se habían obtenido al realizar la modelización del terreno.

$$t_c = 3,98 \times \left(\frac{L}{s^{0.5}} \right)^{0.77} \quad (1)$$

El coeficiente de almacenamiento es adimensional y se usa para representar los efectos que tiene la capacidad de almacenamiento sobre la escorrentía. Se asumió como valor inicial un 0,75 del tiempo de concentración y posteriormente será calibrado para ajustarlo a las características reales del terreno.

4.3. Escorrentía total

El siguiente paso que realiza el programa es sumar la escorrentía directa generada por la precipitación con la escorrentía básica, si existiese previamente. El método elegido para el modelo es de Linear Reservoir.

4.3.1. Linear Reservoir

El manual de uso especifica que este método debe usarse juntamente con el Soil Moisture Accounting Loss, puesto que toma el agua almacenada en los niveles subterráneos la usa para alimentar el caudal base. Para cada nivel subterráneo tenemos tres parámetros.

El primero es el caudal inicial, el cual se estimó como un tercio del caudal medio anual para cada nivel. El segundo es un coeficiente, una constante de tiempo para cada subcuenca, estrechamente relacionado con su capacidad de respuesta. En cierto modo se comporta como un deposito que recibe y suelta agua, de forma que existe cierto retardo. Como valores iniciales se tomo 100 horas para el nivel 1 y 1000 horas para el nivel 2. Finalmente, el programa pide el número de reservas o acuíferos en cada nivel. Cuanto mayor sea este valor mayor será la atenuación del flujo base. Para el modelo se decidió dejar el valor 1 y se comprobará durante la calibración el valor correcto si resulta ser importante para el modelo.

4.4. Tránsito de Hidrogramas

Una vez calculados la precipitación neta, la escorrentía directa y el flujo base para cada subcuenca, el programa realiza lo que se conoce como transito de hidrogramas para los distintos tramos de rio. El método empleado en este estudio fue el Muskingum Routing.

4.4.1. Muskingum Routing

Para realizar los cálculos el programa asume una simple conservación de masa. Queda definido por el coeficiente K y el coeficiente X.

K representa el tiempo de viaje por el cauce. Se estimó como una fracción del tiempo de concentración y posteriormente será calibrado para ajustarlo al valor real, puesto que conceptualmente son similares. El coeficiente X representa la atenuación entre el caudal de entrada y el de salida. Varía entre 0 y 0,5 y se asumió un valor inicial de 0,25 para todos los tramos. De nuevo, será necesario calibrarlo adecuadamente para obtener resultados fiables.

4.5. Modelo Meteorológico

Hasta ahora los métodos definidos tenían como función representar las características físicas de la cuenca y como condicionan el movimiento del agua por ella. Estos valores se consideran constantes en el tiempo, por lo que no será necesario modificarlos para estudiar los eventos futuros. Para finalizar el modelo queda desarrollar el modelo meteorológico, compuesto por las precipitaciones y la evapotranspiración.

4.5.1. Series temporales de precipitación

El programa necesita una serie temporal de precipitación para cada subcuenca. Para obtenerlas se partió de los datos históricos recopilados por AEMET. La localización de estas se ha representado en la figura 19. Como se puede observar, dentro de nuestra zona de estudio solo hay 2, por lo que fue necesario tomar los datos de todos los pluviómetros cercanos, con el fin de obtener información más fiable, puesto que muchas series temporales están incompletas o contienen errores.

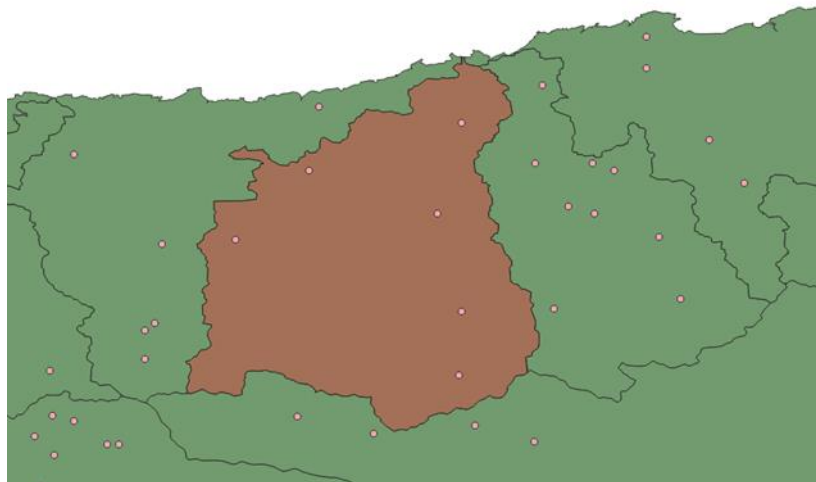


Figura 19 Cuenca del Saja en rojo y red de estaciones de AEMET

El primer paso fue un tratamiento de los registros puesto que existían numerosos días con valores negativos. También se encontraron eventos de precipitación anómalos, con valores muy superiores a los registrados por el resto de los pluviómetros de la zona.

Puesto que el modelo tenía 9 subcuencas, fue necesario generar 9 series temporales de precipitación. Para ello se empleó una interpolación empleando el inverso cuadrado de la distancia, IDW por sus siglas en inglés, Inverse Distance Weighting. La precipitación en los puntos objetivo, en este caso los centros de las subcuencas, será una media ponderada de los valores cercanos. Esta ponderación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. La formulación es la siguiente:

$$p_0 = \frac{\sum_{n=1}^N d_{no}^{-2} p_n}{\sum_{n=1}^N d_{no}^{-2}} \quad (2)$$

En la figura 20 se han representado los centroides de las subcuencas del modelo, donde hemos obtenido las series de precipitación. Se cuentan con datos diarios desde 1911 hasta mayo del 2019 pero debido a los periodos que se van a analizar en este estudio, solo nos serán relevantes aquellos entre 1998 y 2019.



Figura 20 Centroides de las subcuencas del modelo

4.5.2. Evapotranspiración y temperatura

Por último, queda definir el proceso de evapotranspiración en la subcuenca. El método empleado fue el método de Hamon, que calcula la evapotranspiración únicamente a partir de la temperatura. Los datos de la temperatura se calcularon siguiendo el mismo proceso que con las precipitaciones. El tratamiento de datos fue mas sencillo puesto que no se detectaron valores anómalos. Para obtener las series temporales en los centroides de las subcuencas se realizó el mismo procedimiento del IDW con los datos de temperatura:

$$t_0 = \frac{\sum_{n=1}^N d_{no}^{-2} t_n}{\sum_{n=1}^N d_{no}^{-2}} \quad (3)$$

Estas series fueron introducidas en el modelo. Para calcular la evapotranspiración el programa establece una relación empírica con la presión de vapor a la temperatura media diaria. El proceso es el siguiente:

$$EV = k \times 0,165 \times 216,7 \times N \times \left(\frac{e_s}{T + 273,3} \right) \quad (4)$$

T es la temperatura media, N es un factor que se ajusta en función de las horas de sol diarias, K es una constante adimensional y e_s es la presión del vapor de agua que depende únicamente de la temperatura, por lo que el cálculo es directo.

$$e_s = 6,108e^{\left(\frac{17,27T}{T+237,3}\right)} \quad (5)$$

En el entorno HEC-HMS solo es necesario proporcionar los datos de temperatura y una constante la cual se estableció en 0,1651 mm/g/m³. Una vez definidos todos estos métodos el modelo es funcional, en el sentido que introduciendo una serie de datos y temperaturas obtendremos los distintos hidrogramas de las subcuencas. Si contrastásemos los resultados del modelo con los registrados se observaría que hay una gran diferencia entre lo que obtiene el modelo y la realidad. Para corregir esto es necesario ajustar los parámetros mediante un proceso conocido como calibración y validación.

5. Calibración y validación del modelo

Para realizar el proceso de calibración fue necesario introducir en el programa la serie temporal de caudales registrados. La estación de aforo del Saja esta situada en el azud de Puente San Miguel, cerca Torrelavega. Puesto que a la hora de delimitar el punto de escape de la subcuenca se tomo esta misma estación, se pueden comparar directamente los resultados. En la figura 21 se han representado los datos disponibles, que van desde marzo del 2013 hasta mayo del 2019.

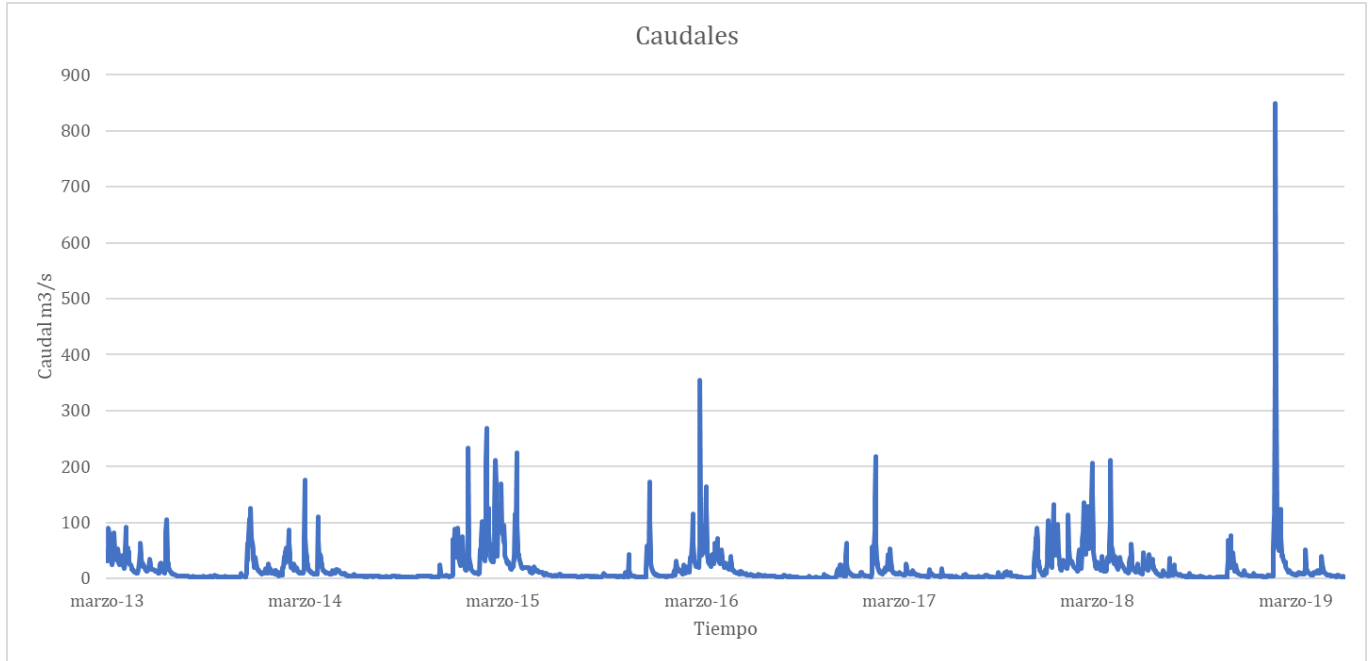


Figura 21 Caudales registrados

5.1. Criterios para la calibración

En la figura 21 se han representado los resultados iniciales del programa, en negro los caudales observados y en azul los caudales obtenidos por el modelo. Para medir como de bueno es el ajuste contamos con dos parámetros que el HMS calcula directamente.

El primer parámetro es un coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe, muy utilizado para medir el poder predictivo de los modelos hidrológicos. Inicialmente se obtuvo un valor de -0,161. El rango de valores posibles varia entre menos infinito y 1, siendo 1 el valor más deseable y a medida que decrece el valor obtenemos un peor ajuste. Un valor igual a 0 se obtiene cuando las observaciones se ajustan al valor promedio (Cabrera). Se obtiene de la siguiente forma:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (6)$$

Como criterio para saber como de bueno es el ajuste se han tomado aquellos establecidos por Molnar (Molnar, 2011 citado en Cabrera, s.f.) recogidos en la tabla 1. En concreto, se tomaron como validos valores superiores a 0,5.

NASH-SUTCLIFFE	AJUSTE
<0,2	Insuficiente
0,2-0,4	Satisfactorio
0,4-0,6	Bueno
0,6-0,8	Muy Bueno
>0,8	Excelente

Tabla 1 Criterios para el ajuste del Nash-Sutcliffe

El segundo parámetro es el sesgo, llamado por el programa Percent Bias. Nos indica en porcentaje la diferencia entre el caudal total que pasa por el punto de salida modelado y observado. Inicialmente se obtuvo un valor de 58,48%. Se tomaron como aceptables valores tanto positivos como negativos, siempre menores que el 10%, considerando como óptimo un valor igual a 0.

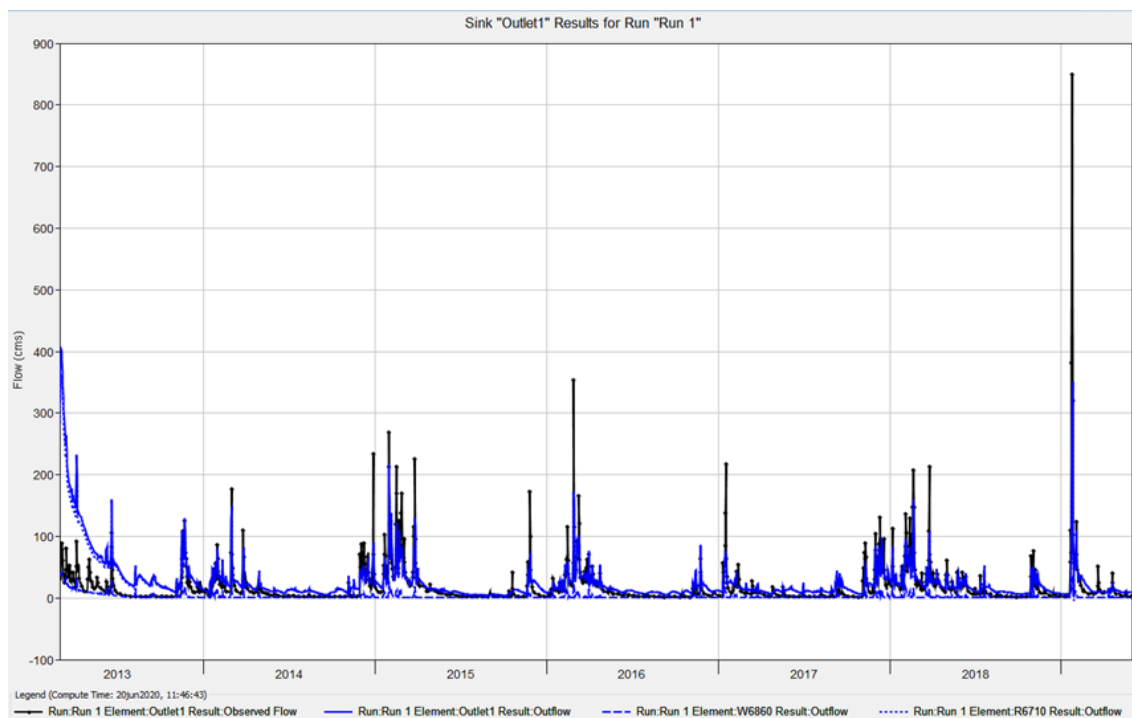


Figura 22 Resultados antes de la calibración

5.2. Metodología

El proceso de calibración-validación es sencillo y requiere la división de la serie temporal en 3 partes.

Durante los primeros meses es necesario dejar un tiempo de calentamiento durante el cual no se incluyen los caudales en el cálculo del parámetro Nash-

Sutcliffe y el sesgo. En este ejemplo se tomó desde marzo de 2013 hasta diciembre del mismo año. Al hacer esto conseguimos que valores iniciales como flujo base o almacenamiento del agua en las distintas profundidades del suelo se corrijan por si solos y tiendan a valores naturales. En la figura 22 se puede apreciar como durante el primer periodo los caudales modelados son demasiado altos, pero rápidamente descienden los valores.

Después del tiempo de calentamiento tenemos el periodo de tiempo que se dedicó a la propia calibración. Se tomaron los años 2014, 2015 y 2016. El programa HMS es capaz de hacer una calibración automática un parámetro cada vez. Esto es, para un parámetro seleccionado realiza una serie de iteraciones probando con distintos valores hasta optimizar una función objetivo, en nuestro caso el Nash-Sutcliffe o el sesgo. El programa sin embargo no es capaz de obtener el modelo óptimo por si solo y ciertos ajustes manuales fueron necesarios.

Una vez que se alcanza un ajuste bueno durante la calibración es necesario comprobar que las predicciones del modelo siguen siendo adecuadas para periodos para los que no han sido calibrado. Esto se conoce como validación y se tomaron los años restantes de la serie temporal de caudales, 2017, 2018 y 2019. En caso de que durante la validación las predicciones no sean positivas será necesario seguir calibrando.

Durante el proceso de calibración se comprobó que no todos los parámetros tienen el mismo impacto sobre la subcuenca. Por ejemplo, la percolación de la capa superior del suelo y su almacenamiento apenas cambiaron entre calibraciones. Los parámetros del segundo nivel del subsuelo apenas influyeron el hidrograma final, indicando que los movimientos de agua subterránea tienen poco efecto en los eventos extremos. Como era de esperar,

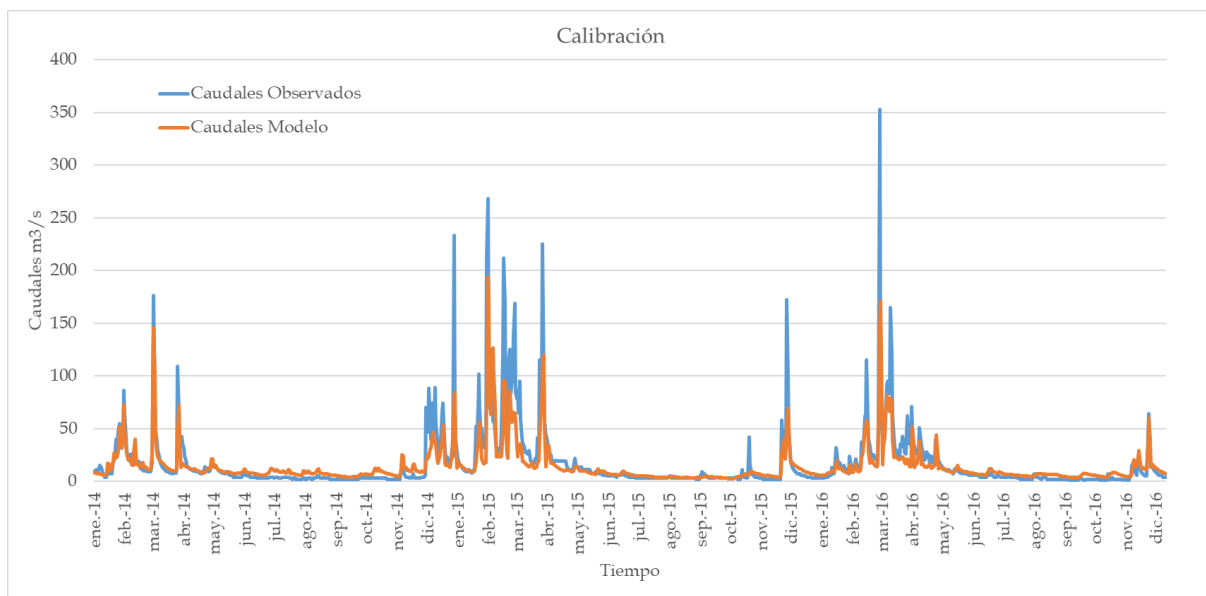


Figura 23 Resultados de la primera calibración

valores como el tiempo de concentración de método del hidrograma unitario de

Clark sufrieron mínimas modificaciones al estar basado en propiedades físicas de las subcuencas.

Tras la primera serie de interacciones se obtuvieron resultados muy positivos con un sesgo de -0,43 y un Nash-Sutcliffe de 0,616. Al realizar las comprobaciones durante el periodo de validación los valores cayeron por debajo del límite que se había establecido, con un sesgo valido de -0,76 y un Nash-Sutcliffe de 0,482, menor que 0,5. En la figura 23 se han superpuesto los caudales del modelo con los caudales observados durante el periodo de calibración, y en la figura 24 durante el periodo de validación.

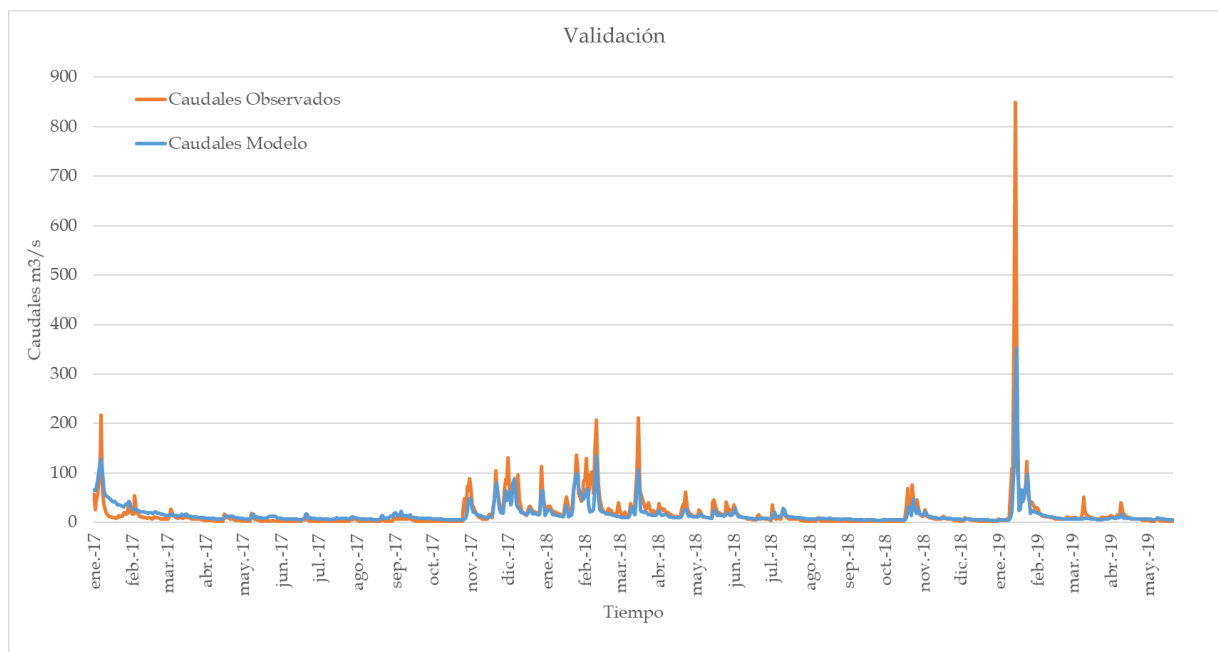


Figura 24 Resultados de la primera validación

Fue necesario por tanto seguir calibrando el modelo. Para ello se hicieron ciertos ajustes manuales puesto que las calibraciones automáticas del programa apenas eran capaces de mejorar el modelo. En las dos figuras se puede ver que el modelo predice con cierta exactitud el caudal base y responde bien a los cambios de precipitación, pero falla en modelar los eventos extremos, prediciendo caudales inferiores.

Para corregirlo fue importante bajar la capacidad de almacenamiento del nivel subterráneo uno y su percolación, mejorando así la respuesta de la subcuenca. También se modificaron los parámetros del método de Muskingum por razones similares.

Una vez se reajustaron los parámetros relacionados con estas características y se llegó a valores de 0,641 para el Nash-Sutcliffe y -1,03% para el sesgo. En la validación se obtuvo un sesgo de -2,59% y un Nash-Sutcliffe de 0,546. Aunque siguen siendo peores que los de la calibración, quedan dentro de los

límites que habíamos considerado por lo que se dio por finalizado este paso. En las figuras 25 y 26 se han representado las series de caudales.

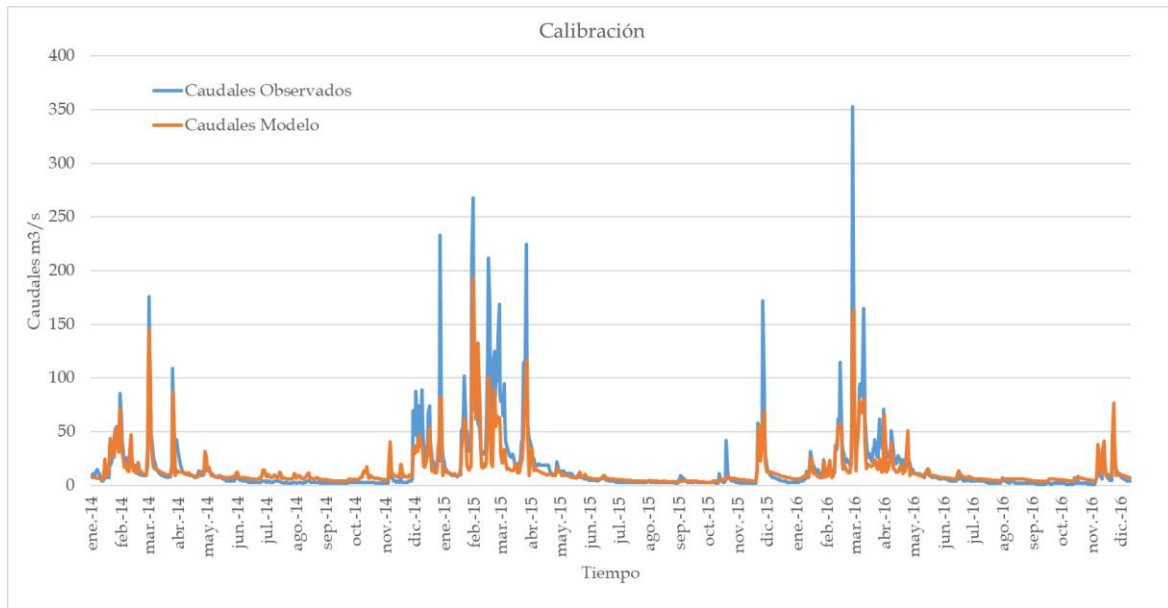


Figura 25 Calibración final

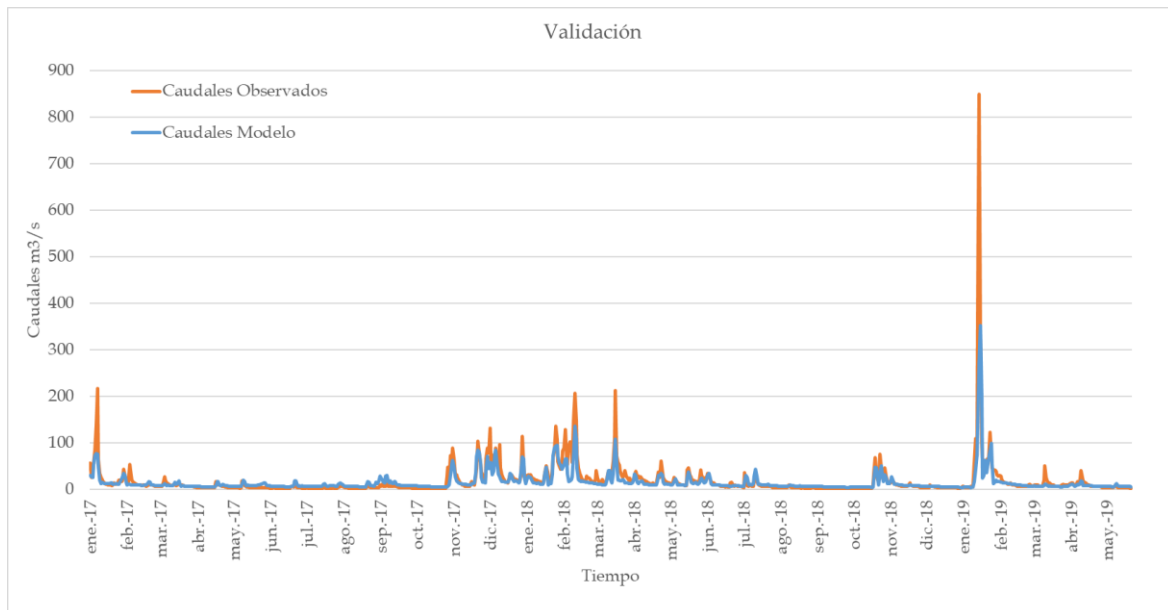


Figura 26 Validación final

Con el modelo calibrado podemos introducir cualquier combinación de temperaturas y precipitaciones y obtener una estimación de como será la respuesta de la cuenca. Por tanto, para el estudio de como afectara el cambio climático a la zona se obtuvieron predicciones de como el cambio climático va a afectar a la temperatura y precipitación.

6. Estudio del cambio climático

El objetivo de este apartado es ofrecer unas bases teóricas sobre la importancia del cambio climático y los métodos que se han usado en este estudio para analizarlo.

6.1. Predicciones globales

En 1998 varias organizaciones internacionales crearon el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, también conocido como IPCC, con el objetivo de que los gobiernos tuvieran una fuente fiable en la que apoyarse para desarrollar las políticas de cambio climático (The Intergovernmental Panel on Climate Change, s.f.). Puesto que está apoyada por todos los países miembros de la ONU se considera una fuente objetiva.

En 2014 esta organización publicó el quinto informe de síntesis (IPCC, 2014) donde teoriza sobre las causas y el posible alcance del cambio climático. Para ello define distintos escenarios basándose en las diferentes trayectorias de concentración representativa o RCP, diferenciadas por los distintos niveles de emisión de CO₂. En la figura 27 se puede ver un gráfico de la IPCC que muestra como se relacionan los niveles de emisión con cada escenario.

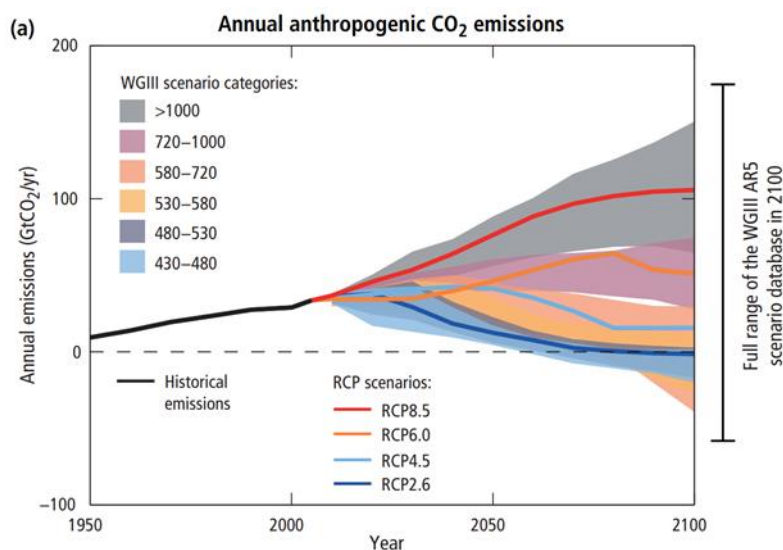


Figura 27 Emisiones de CO₂ y escenarios de cambio climático (IPCC, 2014)

En este estudio se han considerado 2 escenarios. Primero el de RCP 8,5, el cual se daría si las emisiones de CO₂ continuaran creciendo como lo han hecho históricamente, sin leyes y políticas ambientales que las limiten o mitiguen. Por otro lado, se estudiará el escenario de RCP 4,5, un escenario intermedio que asume cierto crecimiento de las emisiones hasta que las políticas ambientales puedan frenarlo, estabilizándose.

En la conferencia sobre el clima de París en el 2015 los países miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático ratificaron un convenio según el cual se comprometían a mantener las emisiones de CO₂ de tal forma que el incremento de la temperatura media global se mantenga por debajo de 2°C, teniendo como objetivo 1,5°C, respecto a los niveles preindustriales (United Nations Climate Change). Esto se cumpliría según el escenario de RCP 2,6, tal como se puede apreciar en la figura 28.

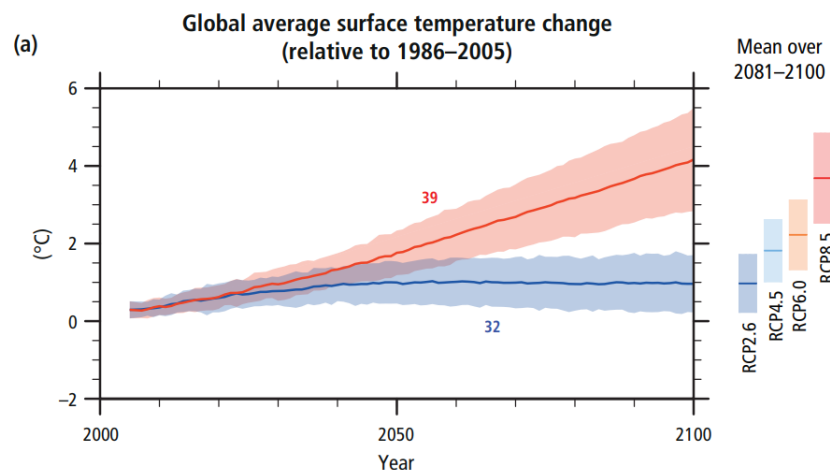


Figura 28 Incremento de la temperatura media global (IPCC, 2014)

Las predicciones globales no afectarán a todo el mundo por igual. Hay sitios donde los efectos serán mayores y otros que sufrirán menos las consecuencias. Mediante el uso de diferentes modelos globales la IPCC calculó como se distribuirían los cambios de temperatura y precipitación sobre la superficie terrestre. Los resultados, figura 29, muestran para Cantabria descenso en la precipitación de entre el 20 y el 10% para el escenario RCP de 8,5 en los próximos 100 años. En cuanto a la temperatura se prevé un aumento de 3 grados de media. El escenario RCP de 2,5 es mucho mas positivo, con solo un aumento de 1,5°C de media y un descenso menor del 10% de precipitación.

Aunque los cambios parezcan pequeños, podrían desencadenar procesos muy dañinos. Por ejemplo, el aumento de la concentración de CO₂ supone que cada vez mas cantidad de este gas se disuelve en el océano, bajando su pH. Otros cambios como la modificación del albedo o el aumento de huracanes e inundaciones, así como de periodos de sequia son consecuencias derivadas muy probables. Sin embargo, las predicciones apuntan a que la mayoría de estos cambios solo empezarán a ser notables a finales de siglo.

Como cualquier otra predicción de futuro, existe cierto grado de incertidumbre en los resultados de estos escenarios que debe tenerse en cuenta. Es posible que muchas de las predicciones no sean del todo correctas y los efectos del cambio climático no sean tan grandes como plantea la IPCC. A pesar de esto siguen siendo las predicciones mas fiables que existen actualmente.

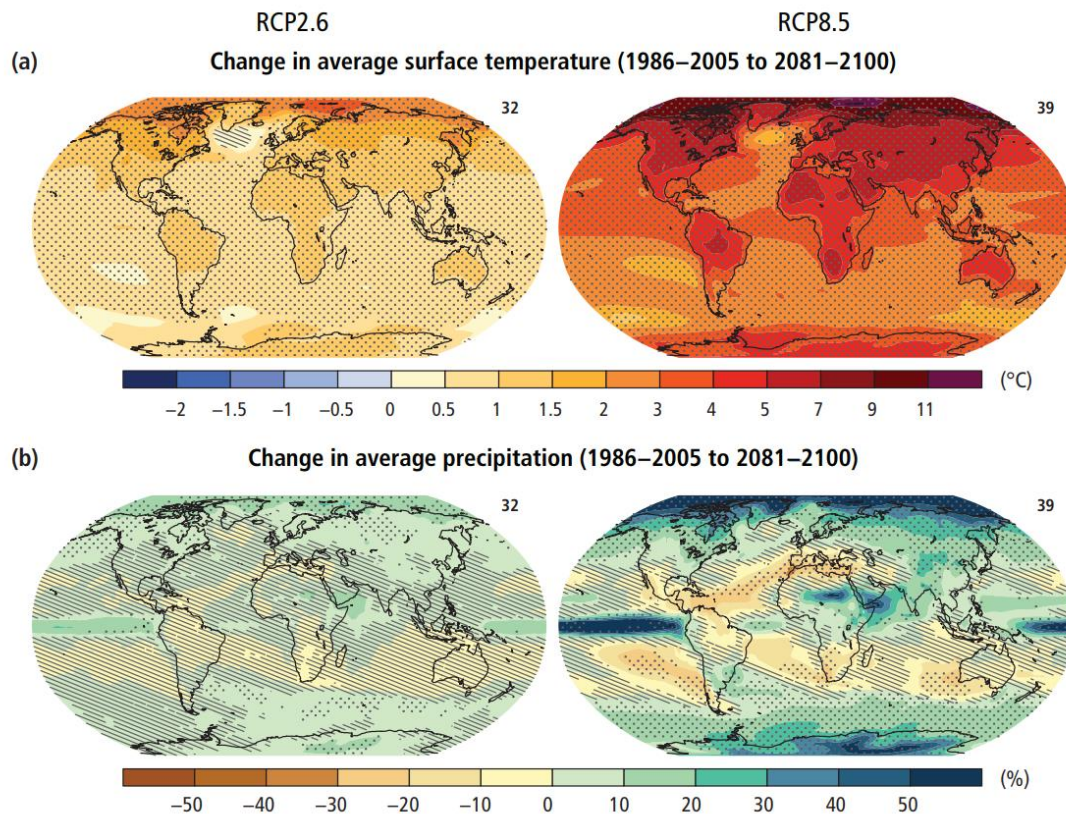


Figura 29 Cambio globales de temperatura y precipitación (IPCC, 2014)

6.2. Predicciones locales

Puesto que Cabezón de la Sal es un área muy pequeña en la escala global, utilizar los datos calculados por los modelos globales llevaría a resultados poco fiables. Los modelos de cambio climático no dejan de ser representaciones de la realidad incompletas, y en el caso de los modelos globales las escalas, tanto espaciales como temporales, a las que trabajan implican pasar por alto detalles y procesos que suceden a escalas más pequeñas.

Para realizar predicciones a escala regional existen los llamados modelos regionales de cambio climático. El proyecto CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) ofrece una serie de predicciones a escalas entre 12 km y 50 km en Europa basadas en los modelos globales. De acuerdo con la guía de uso de EURO-CORDEX, para hacerlo toman los resultados globales como condiciones frontera para los modelos regionales (Benestad, y otros, 2017).

Estos modelos regionales tampoco son perfectos. Puestos que están basados los escenarios de RCP, dependientes de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, cada uno de estos modelos utiliza diferentes parámetros físicos y diferentes modelos numéricos, dando lugar a resultados muy variados para una misma región según que modelo se use. Para reducir el grado de

incertidumbre, se recomienda tomar la media de la mayor cantidad de modelos posibles.

En España los datos de estos modelos regionales han sido recogidos por la plataforma sobre adaptación al cambio climático (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico) donde se han obtenido las predicciones en Cabezón de la Sal hasta el año 2100 según los siguientes modelos climáticos y la media de todos ellos.

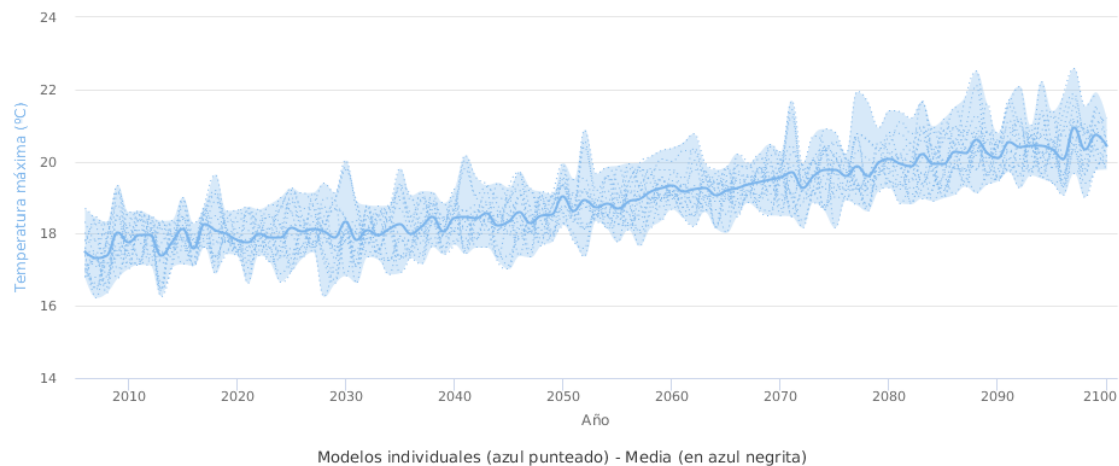
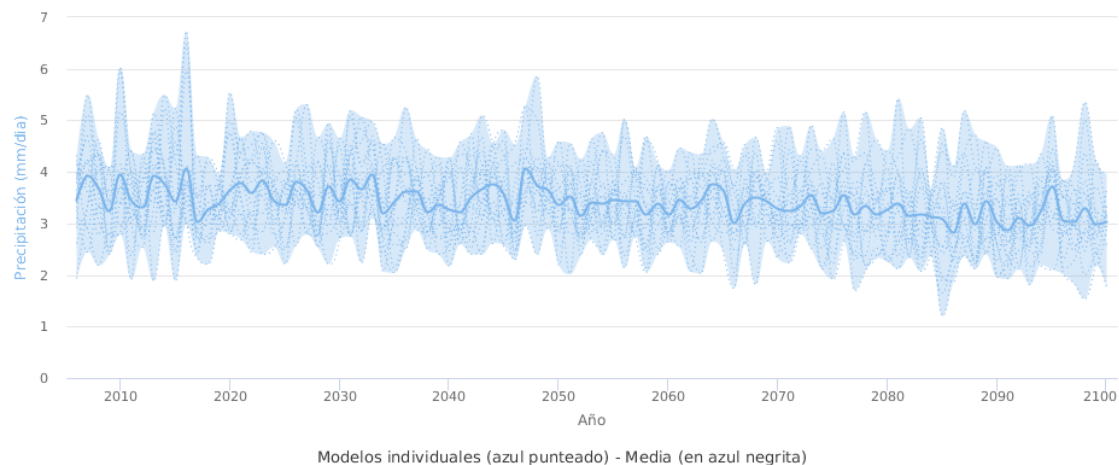
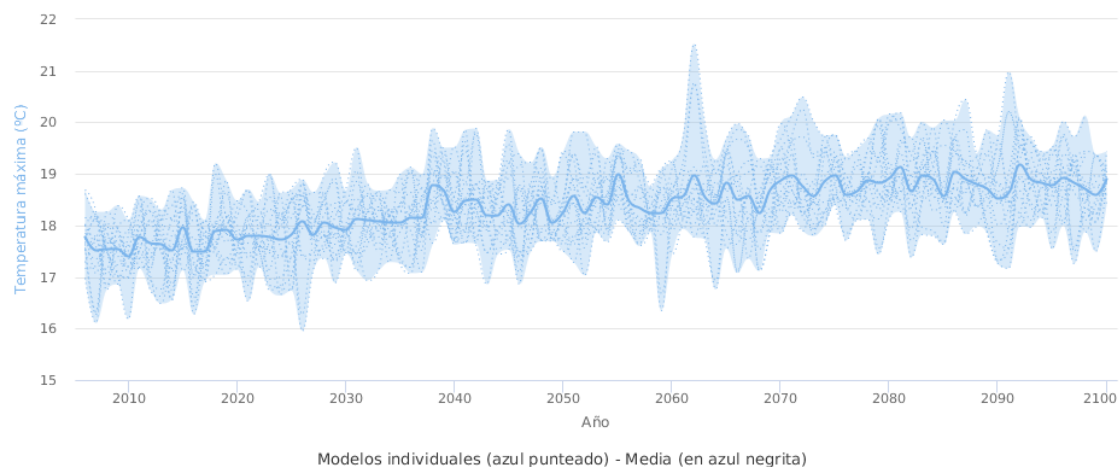
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1_CNRM-ALADIN53_v1
ICHEC-EC-EARTH_r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v1
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1_SMHI-RCA4_v1
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1
MPI-M-MPI-ESM-LR_r2i1p1_MPI-CSC-REMO2009_v1
NCC-NorESM1-M_r1i1p1_DMI-HIRHAM5_v2
MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1_KNMI-RACMO22E_v2
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1
ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17_v1
IPSL-IPSL-CM5A-MR_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1
MPI-M-MPI-ESM-LR_r1i1p1_SMHI-RCA4_v1a
IPSL-IPSL-CM5A-MR_r1i1p1_IPSL-INERIS-WRF331F_v1
ICHEC-EC-EARTH_r3i1p1_DMI-HIRHAM5_v1

Tabla 2 Modelos de cambio climático

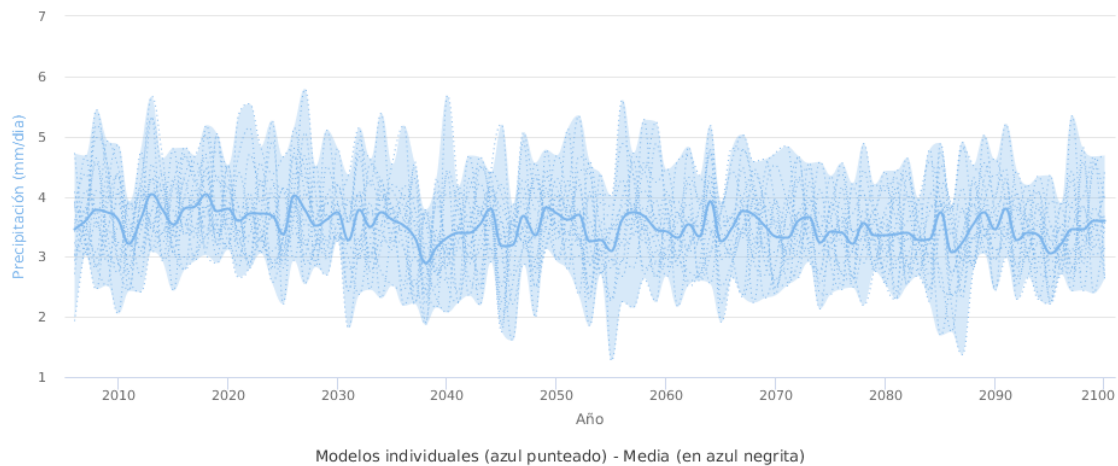
Las guías de uso de EURO-CORDEX recomiendan además comparar varios escenarios de cambio climático, diferentes RCP, para obtener resultados robustos.

Las predicciones locales de estos modelos para Cabezón de la Sal son las siguientes. Para el escenario RCP 8,5 se muestra un aumento de las temperaturas de alrededor de 2,5°C para el año 2100, figura 30, y un descenso de las precipitaciones de unos 0,3 mm, figura 31.

Las predicciones para el escenario RCP 4,5 muestran un aumento de las temperaturas de 1°C para el 2100 y un descenso en la media diaria de las precipitaciones de 0,2 mm, figuras 32 y 33.

Escenarios AdapteCCa - Temperatura máxima - Datos en rejilla ajustados (media) - RCP 8.5 - Año completo
Fuente: <http://escenarios.adaptecca.es>
Figura 30 Predicciones de cambio climático en Cabezón de la Sal. RCP 8,5 Temperatura
Escenarios AdapteCCa - Precipitación - Datos en rejilla ajustados (media) - RCP 8.5 - Año completo - Cabe
Fuente: <http://escenarios.adaptecca.es>
Figura 31 Predicciones de cambio Climático en Cabezón de la Sal. RCP 8,5 Precipitación
Escenarios AdapteCCa - Temperatura máxima - Datos en rejilla ajustados (media) - RCP 4.5 - Año completo
Fuente: <http://escenarios.adaptecca.es>
Figura 32 Predicciones de cambio climático en Cabezón de la Sal. RCP 4,5 Temperatura

Escenarios AdapteCCa - Precipitación - Datos en rejilla ajustados (media) - RCP 4.5 - Año completo - Cabe

Fuente: <http://escenarios.adaptecca.es>*Figura 33 Predicciones de cambio climático en Cabezón de la Sal. RCP 4,5 Precipitación*

De acuerdo con la IPCC (IPCC, 2017) existe cierto sesgo en los modelos climáticos, por lo que no sería correcto usar estas predicciones directamente. De acuerdo con Matthias Zahn y Hans von Storch en un estudio sobre la frecuencia de temperaturas mínimas en el polo norte, una forma de trabajar con estos datos es empleando el método de deltas (Decreased frequency of North Atlantic polar lows associated with future climate warming, 2010). El método consiste en comparar periodos futuros y pasados del mismo modelo, y aplicar los incrementos, positivos o negativos, a los datos históricos. En el proyecto Klimatec del país vasco del 2016 (Elaboración de escenarios regionales de cambio climático de alta resolución sobre el País Vasco, 2016) se detallan algunas limitaciones de este método. Por ejemplo, se asume cierto margen de error, ya que es equivalente a asumir que los sesgos que se producen son lineales, y esto no siempre es así.

Antes de realizar este paso fue necesario elegir las fechas en las que se van a realizar las simulaciones. En cuanto a los datos actuales solo se tienen datos registrados desde 2013 hasta 2019, con la excepción de un año completo en 1945, por lo que fue necesario utilizar el modelo para obtener periodo de tiempo mas grande. Se introdujeron los datos de precipitación y temperatura desde 1998 a 2018 y se obtuvieron así los caudales que se compararán con los del futuro.

En cuanto a los periodos de futuro, de acuerdo con el estudio del IPCC (IPCC, 2014) las variaciones durante los años 2016-2035 serán similares para todos los escenarios, por lo que se decidió escoger un periodo posterior. Cuanto mas lejana sean en el tiempo las predicciones, se vuelven menos relevantes puesto que la incertidumbre crece mucho. Por ello, se decidió tomar 2048-2068 como periodo futuro.

Con los periodos de tiempo establecidos fue posible calcular los deltas de cambio climático tal como se ha definido. Las ecuaciones 7 y 8 muestran este proceso de manera simplificada. Por otro lado, los deltas no son constantes a lo

largo del año, si no que existen ciertas variaciones de carácter mensual. En este estudio se ha considerado un delta para cada estación del año.

$$Precipitacion_{2048-2068} = Precipitacion_{1998-2018} + Delta \quad (7)$$

$$Delta = Modelo_{2048-2068} - Modelo_{1998-2018} \quad (8)$$

Los deltas obtenidos para cada uno de los dos escenarios se pueden ver en las figuras 34 y 35.

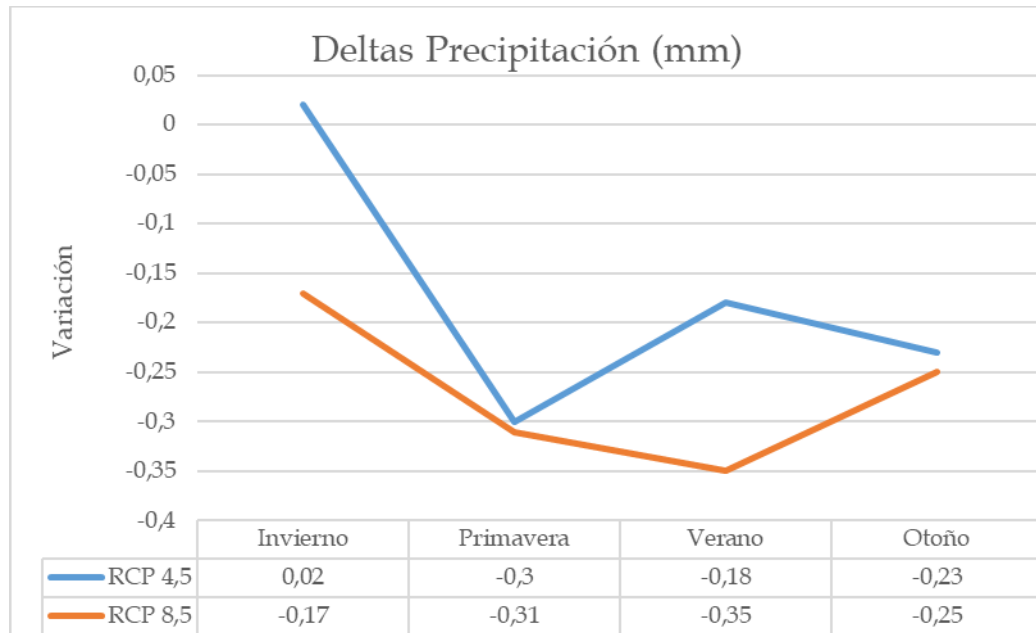


Figura 34 Deltas de precipitación

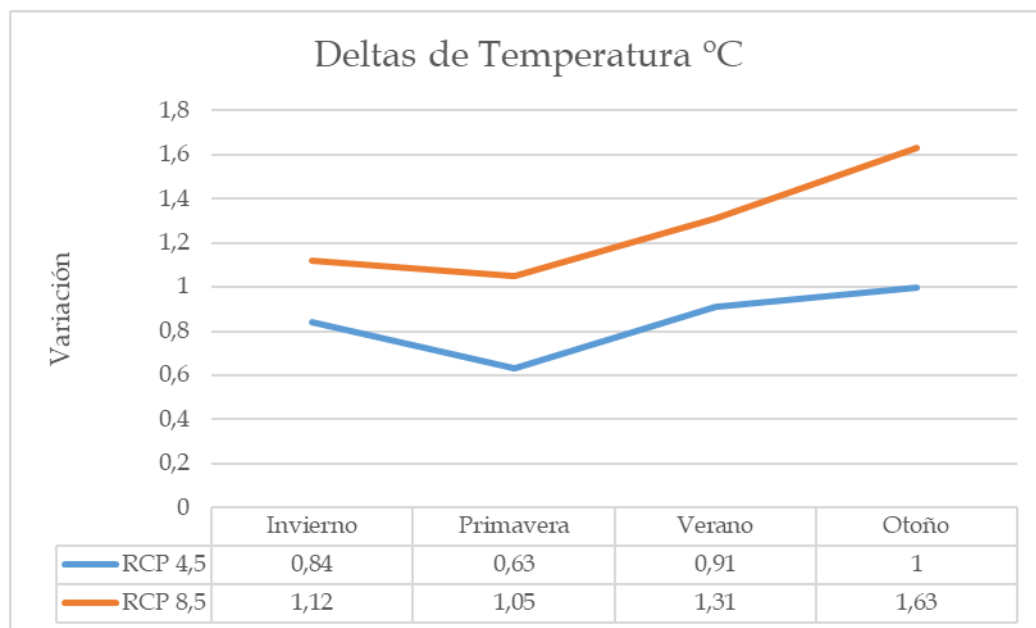


Figura 35 Deltas de temperatura

Curiosamente en el caso de las precipitaciones los dos escenarios sacan conclusiones diferentes. Para un escenario RCP 4,5 las precipitaciones de

invierno apenas cambian, y en verano solo lo hacen con en $-0,18$ mm. El escenario RCP 8,5 predice cambios mayores en estas dos estaciones, pero en las estaciones de primavera y otoño las proyecciones son muy similares. En cuanto a la temperatura los deltas son mas parecidos en ambos casos, existiendo unos $0,5^{\circ}\text{C}$ de diferencia entre los dos escenarios futuros.

Una vez obtenidos estos deltas se procedió a aplicarlos a las series históricas de precipitación y temperatura, obteniendo así las predicciones de ambos escenarios futuros. Estas predicciones se introdujeron en el modelo HMS para generar las series de caudales futuras.

7. Análisis estadístico

Llegados a este punto contamos con 3 series de caudales, una histórica para los años 1998-2018 y 2 futuras para los años 2048-2068 para diferentes escenarios de RCP, una de 4,5 y otra de 8,5. El objetivo de este apartado es realizar un análisis que permita comparar estas 3 series. A continuación, se han representado las series de caudales para dar un poco de contexto a los datos con los que tratamos.

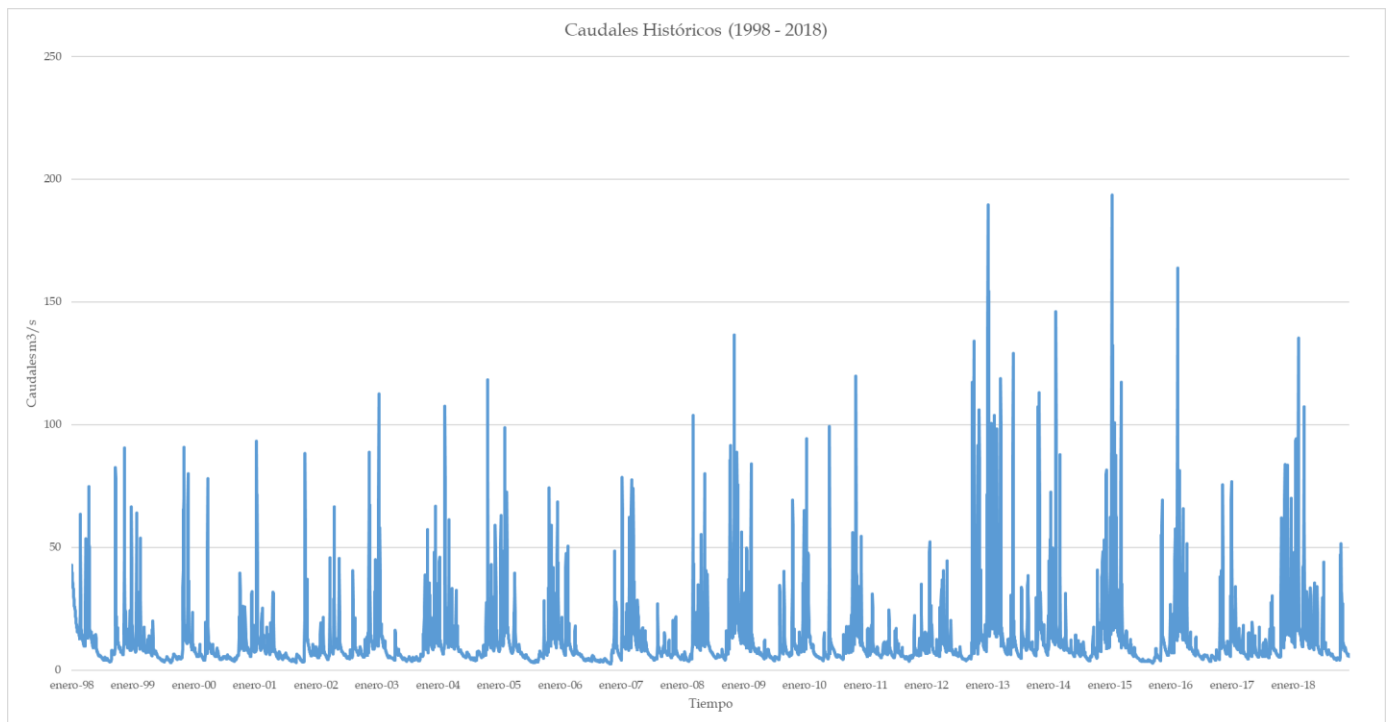


Figura 36 Caudales históricos

En la figura 36 se han representado los caudales históricos y en la figura 37 se han superpuesto los caudales futuros. Al ser obtenidos por el método de los deltas tienen distribuciones muy similares por lo que a simple vista se pueden hacer observaciones que luego se contrastarán con parámetros estadísticos. De primeras se observa como los caudales del escenario con menores emisiones de CO₂ muestra caudales más altos. Esto concuerda con la tendencia de cambio climático de mayor temperatura y menor caudal, como ya se vio en el cálculo de los deltas.

Para poder tener una mejor idea de la diferencia entre ambas series futuras se han tomado los datos de un año cualquiera, 2060, y se ha representado en la figura 38. Se puede apreciar que las únicas diferencias se producen en los picos, mientras que en la mayor parte del año los caudales son muy parecidos.

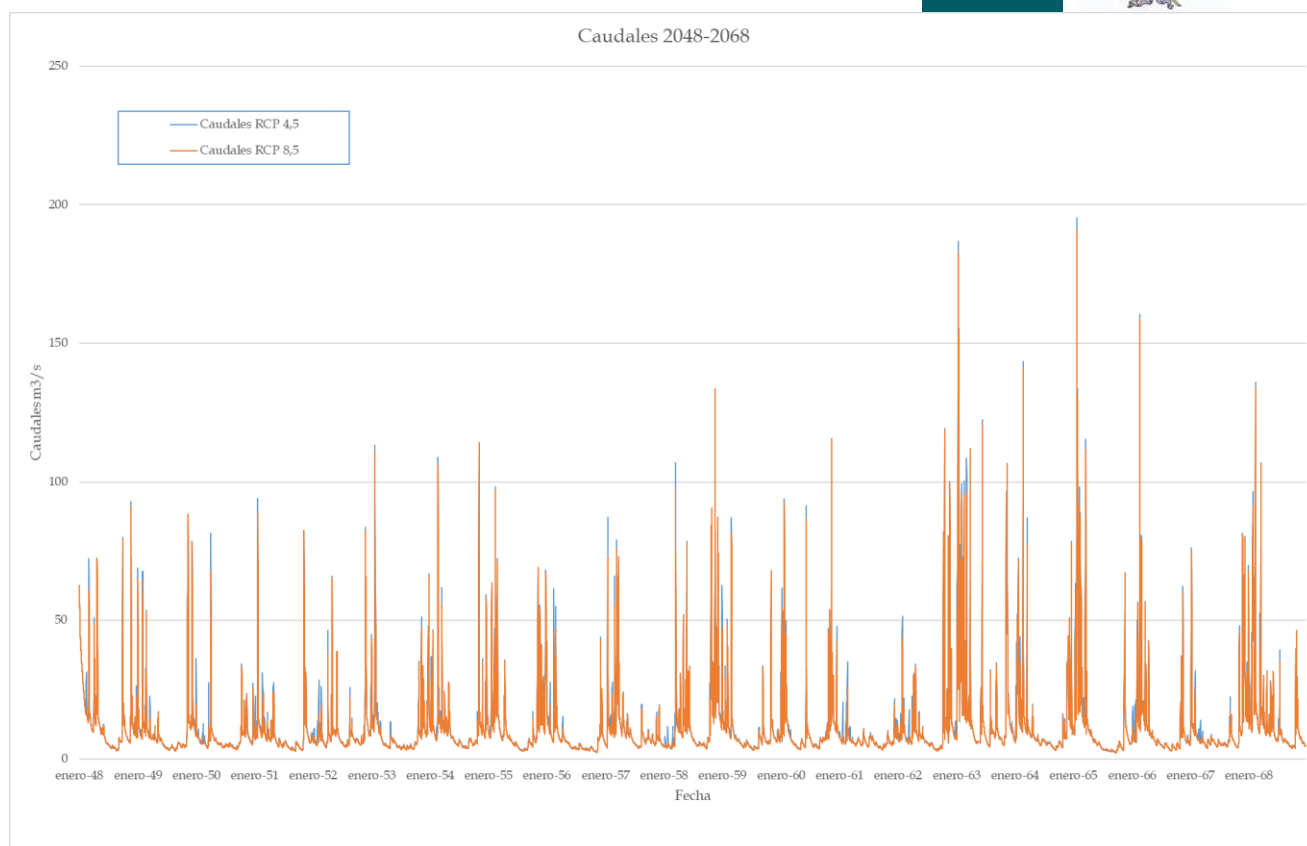


Figura 37 Caudales 2048-2068 para RCP 4,5 (azul) y RCP 8,5 (naranja)

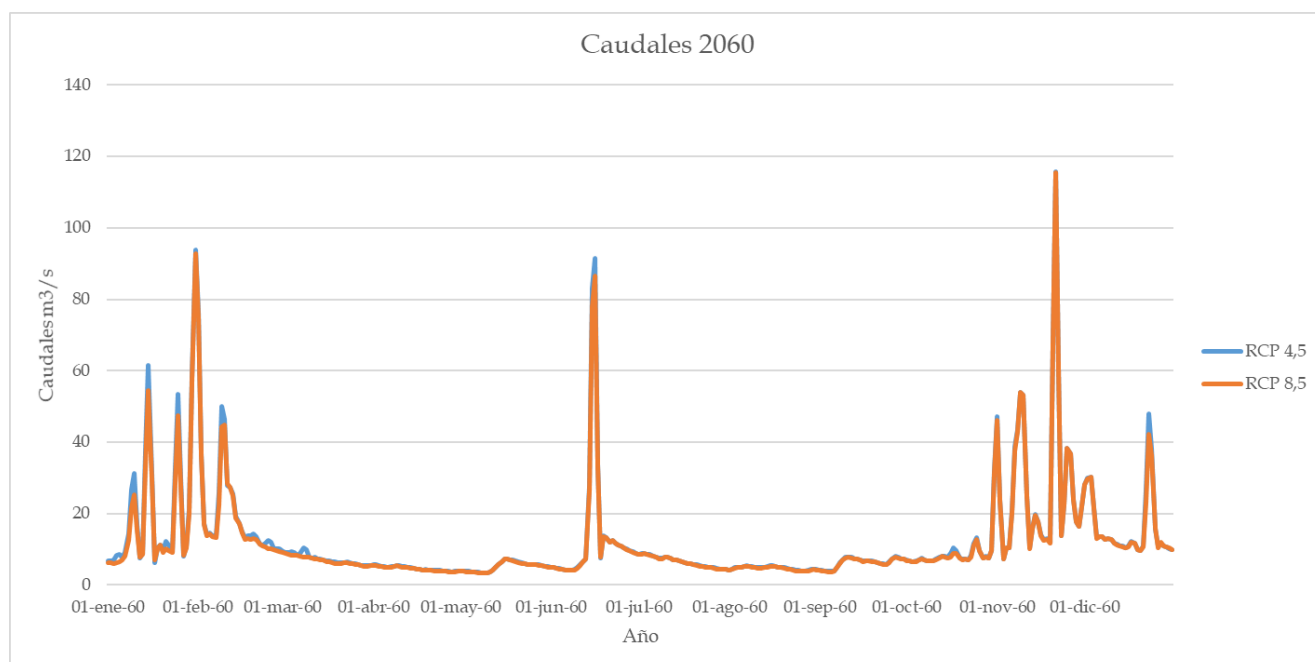


Figura 38 Comparación de caudales 2060

Por ofrecer una ultima comparación antes de proceder con el propio cálculo de los parámetros estadísticos se han superpuestos los caudales históricos con los caudales. Es necesario mencionar que como ambas series están generadas por el mismo modelo, cualquier error de sesgo será igual en ambas. Se ve de nuevo como los caudales son mayores para la serie histórica y disminuyen en el futuro.

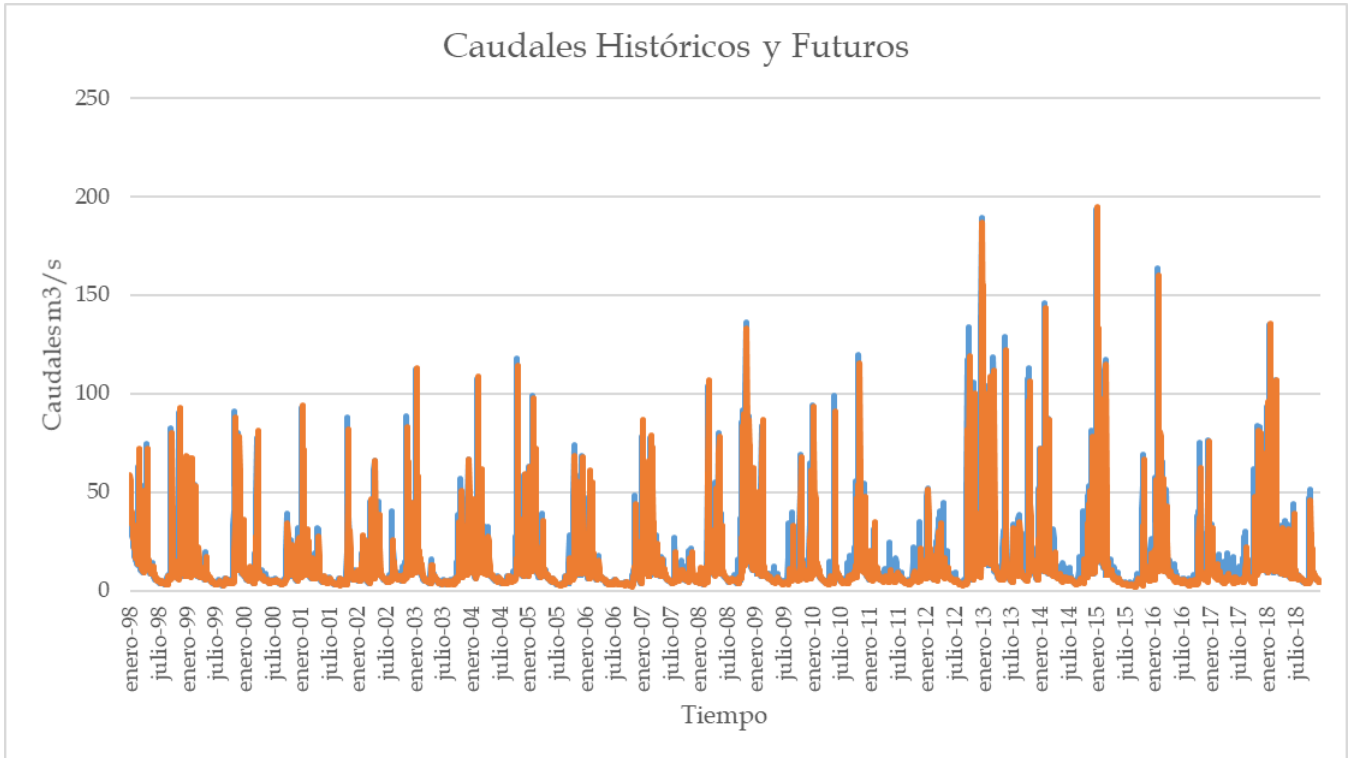


Figura 39 Caudales históricos y RCP 4,5

Una vez que se obtuvo una visión general de los datos, se procedió a trabajar con diferentes parámetros estadísticos.

7.1. Serie Histórica

El estudio estadístico se comenzó con la creación de un histograma para ver como era la distribución de caudales representado en la figura 40. Como se puede apreciar hay gran cantidad de valores grandes mayores a 50 m³/s mientras que los valores pequeños son escasos, nunca llegando a cero. Por ello se creyó necesario un estudio de eventos extremos que se detallará adelante. A parte del histograma se calcularon otros parámetros como la media, moda, máximos o mínimos.

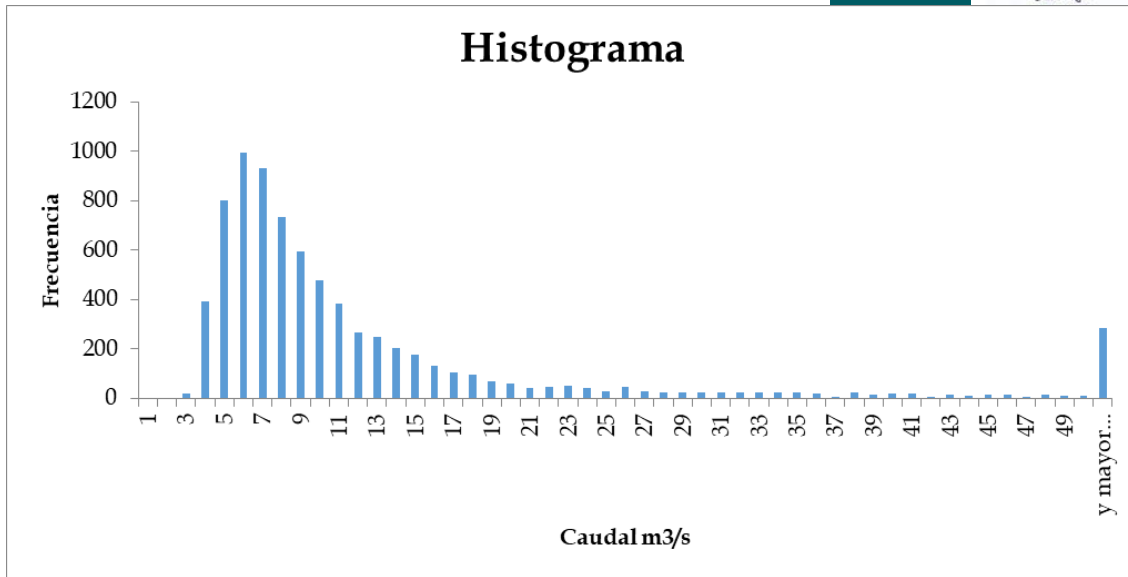


Figura 40 Histograma de la serie histórica

Media	12,90 m³/s
Moda	6 m³/s
Mediana	8 m³/s
Máximo	193,6 m³/s
Mínimo	2,5 m³/s

Tabla 3 Parámetros estadísticos de la serie histórica

A continuación, se procedió a tratar de encontrar un ajuste adecuado de los datos. Puesto que la distribución es claramente asimétrica hizo un primer intento utilizando una de las distribuciones más utilizadas en hidrología, la distribución normal logarítmica. Aguilera Navarro describe este método en su memoria sobre la estimación de funciones de distribución de probabilidad (Aguilera Navarro, 2007). La metodología es similar a la distribución normal, pero tomando dos parámetros, alfa y beta, de forma que alfa es la media del logaritmo de los caudales y beta su desviación estándar:

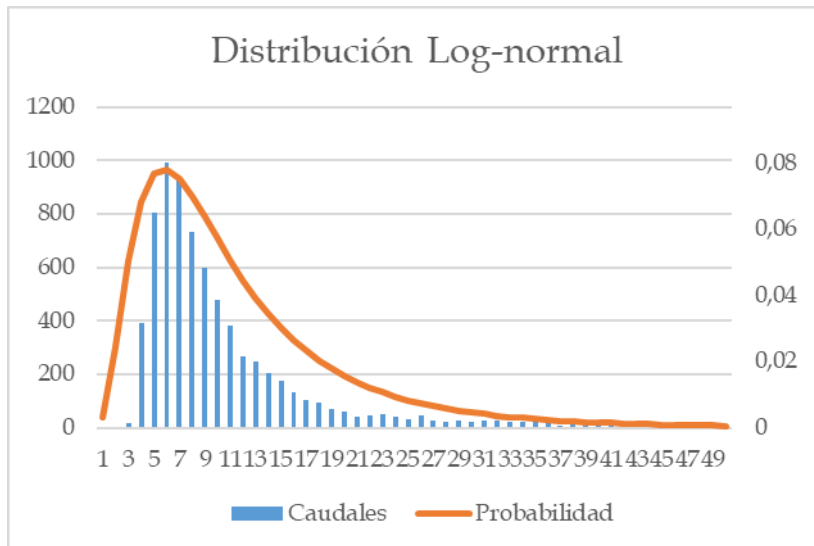
$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n} \quad (9)$$

$$\beta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - \alpha)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (10)$$

Alfa y Beta sustituyen a la media y desviación de la función de densidad de probabilidad normal por lo que la función queda:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} \quad (11)$$

Tras realizar el ajuste se obtuvieron los siguientes resultados:



Alfa 2,23324

Beta 0,6952524

Tabla 4 Parámetros Log-Normal Serie Histórica

Figura 41 Ajuste Log-Normal serie histórica

Aunque a primera vista el ajuste se consideró bueno el siguiente pasó fue buscar si había otras distribuciones que ofreciesen mejores resultados. Para ello se ha utilizado el código proporcionado por Michael Allen (Allen, 2018) que nos permite realizar el ajuste a diferentes distribuciones y escoger la mejor de ellas. Los resultados han representado en la figura 42.

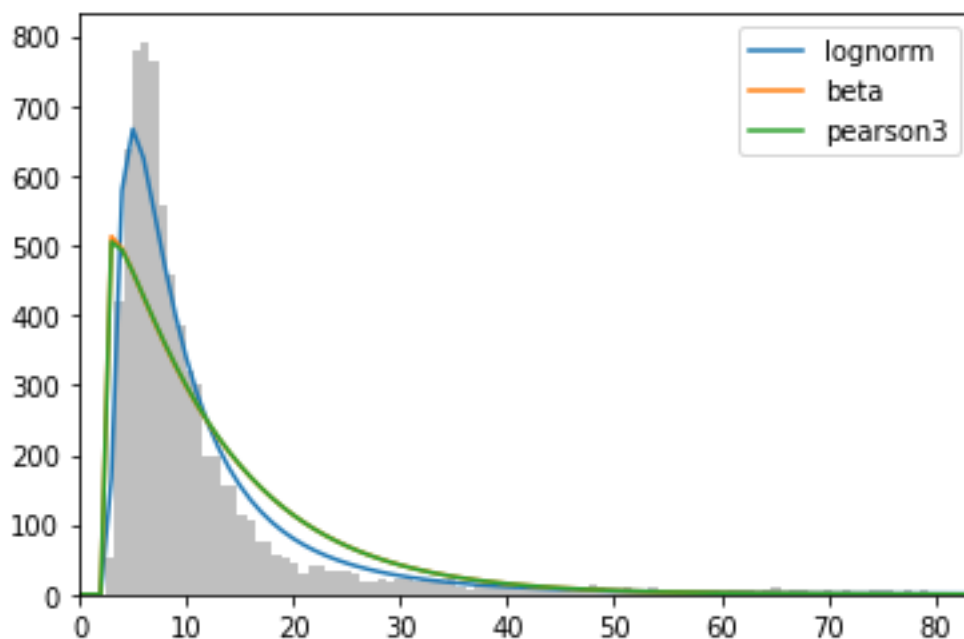


Figura 42 Mejores ajustes de la serie histórica

Como se puede apreciar el mejor ajuste viene dado por la distribución normal logarítmica ya estudiada. Las distribuciones Beta y Pearson III también ofrecen buenos resultados, pero algo peores. Para comprobar como de bueno son los ajustes el código crea diagramas cuantil-cuantil y diagramas de probabilidad. En la figura 43 se han representado estos diagramas para la función logaritmo-normal. Los gráficos correspondientes a las funciones Beta y Pearson se han incluido en el anexo B.

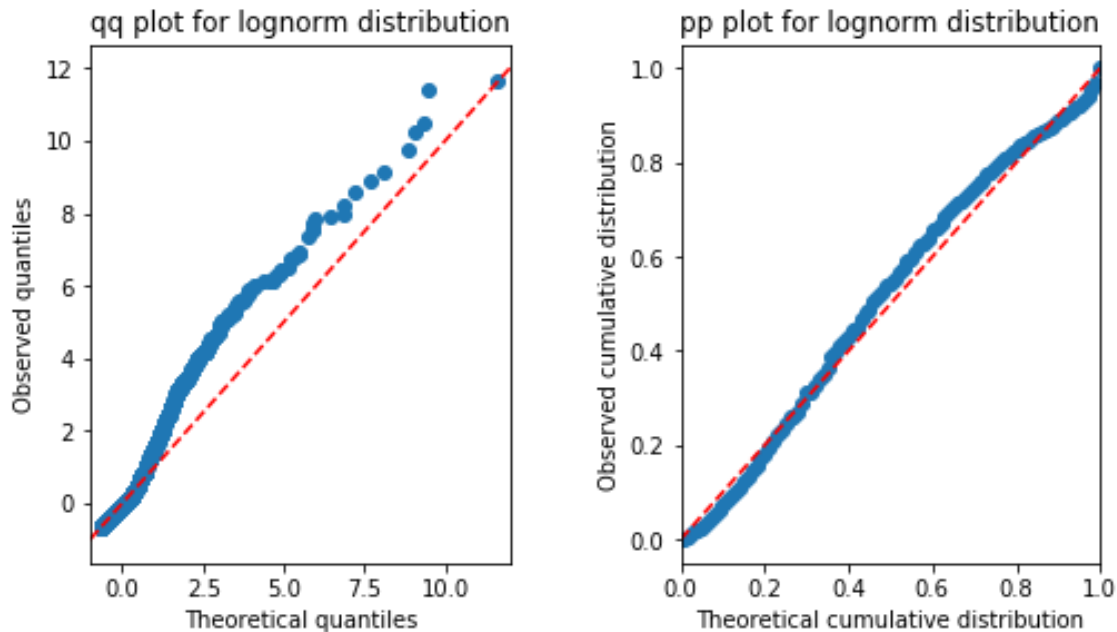


Figura 43 Diagramas QQ y PP. Ajuste logarítmico-normal. Serie histórica

Una vez definida la serie Histórica se procedió a realizar el mismo análisis para las series futuras.

7.2. Escenario RCP 4,5

El histograma se ha representado en la figura 44. Como se puede apreciar los caudales son mas pequeños lo que hace que todo el grafico se desplace hacia la izquierda. Aun así, sigue habiendo gran cantidad de eventos mayores que 50 m³/s. Curiosamente, al calcular los parámetros estadísticos se obtuvo un máximo mayor y un mínimo menor, aunque estas variaciones son muy pequeñas como para ser significantes.

Media	12,04 m ³ /s
Moda	6 m ³ /s
Mediana	7,3 m ³ /s
Máximo	195,3 m ³ /s
Mínimo	2,2 m ³ /s

Tabla 5 Parámetros estadísticos RCP 4,5

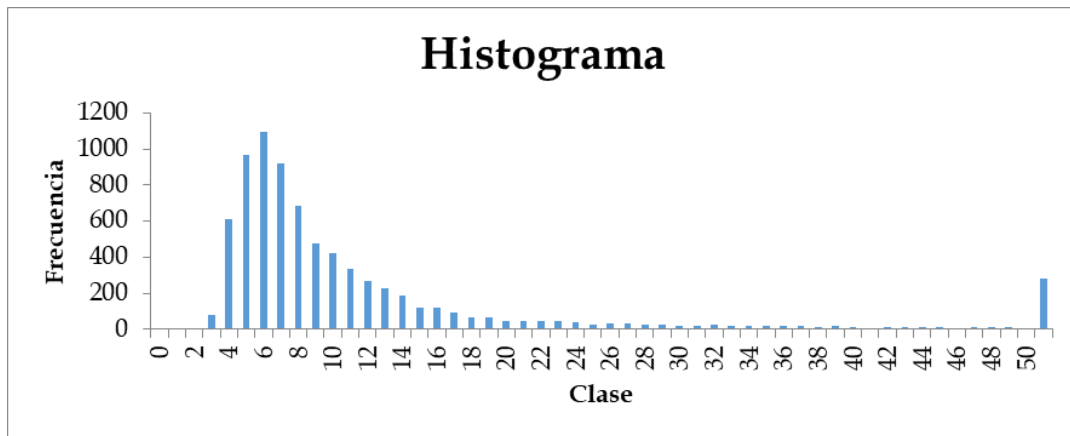
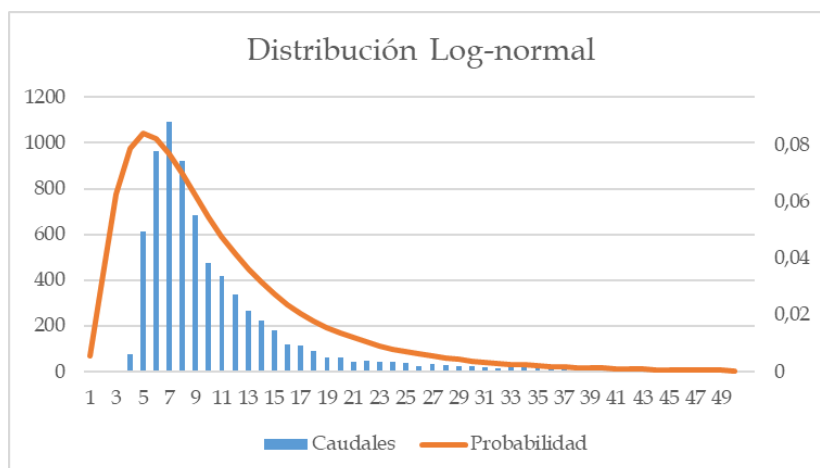


Figura 44 Histograma del escenario de RCP 4,5

A la hora de elegir un ajuste, puesto la serie histórica y esta son parecidas se decidió que una distribución logarítmica normal era adecuada. El proceso para obtenerla fue el mismo y los resultados pueden verse en la siguiente figura.



Alfa 2,148561
Beta 0,709929

Tabla 6 Parámetros
Log-Normal RCP 4,5

Figura 45 Ajuste logarítmico normal escenario RCP 4,5

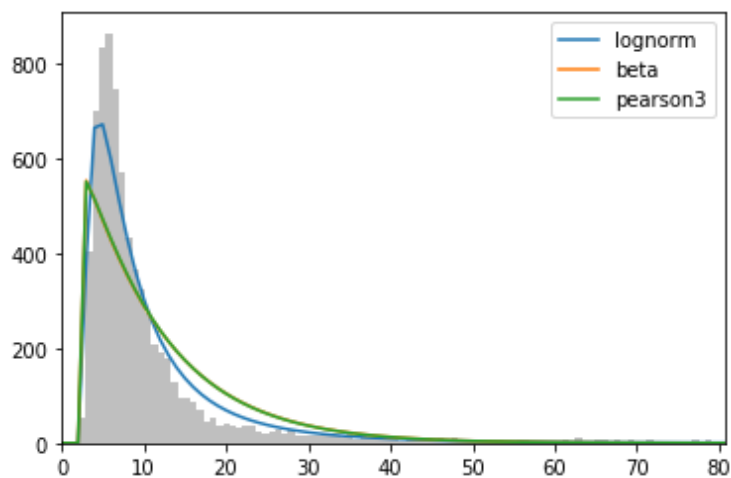


Figura 46 Mejores ajustes de la serie de RCP 4,5

De nuevo se decidió comprobar si existían mejores aproximaciones. Los resultados del código se pueden ver en la figura 46. De nuevo la distribución log-normal fue la mejor, quedando las distribuciones Beta y Pearson III en segundo y tercer lugar. Puesto que los resultados entre la serie de 1998-2018 y el escenario de RCP 4,5 2048-2068 son similares, se espera que también lo sean los del escenario de RCP 8,5. En la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos del análisis de este último escenario.

7.3. Escenario RCP 8,5

El histograma se ha representado en la figura 47 y los parámetros estadísticos en la tabla 7.

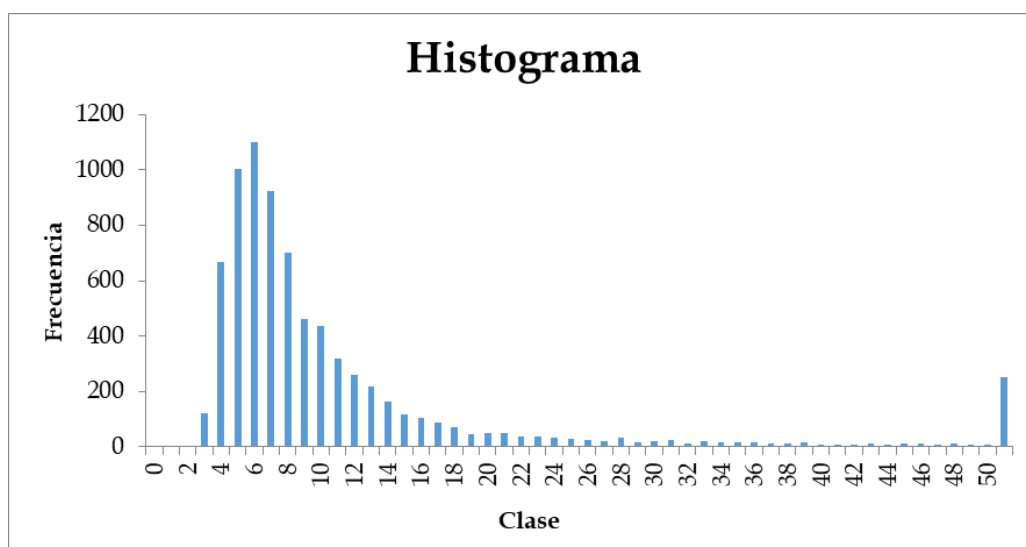


Figura 47 Histograma del escenario RCP 8,5

Media	11,56 m ³ /s
Moda	5,6 m ³ /s
Mediana	7,1 m ³ /s
Máximo	191 m ³ /s
Mínimo	2,1 m ³ /s

Tabla 7 Parámetros estadísticos RCP 8,5

De nuevo, a medida que aumentan los niveles de CO₂ disminuyen los caudales. Sin embargo, los eventos extremos siguen sucediendo en gran medida, por lo que les ha dedicado la siguiente sección para estudiarlos. Para finalizar el estudio de este escenario se procedió con el ajuste a la distribución logarítmica normal y la comparación de los diversos ajustes. Los resultados fueron los esperados según el estudio de las series anteriores, habiendo diferencias debido a la disminución de los caudales, pero no suficiente como ser relevante.

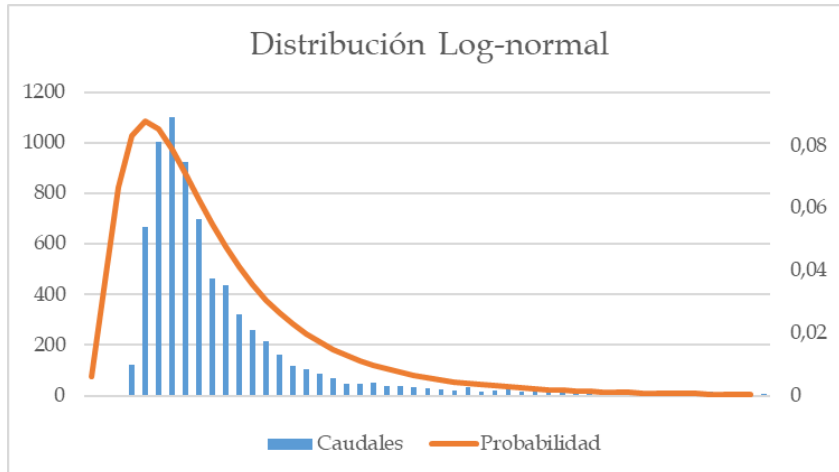
**Alfa** 2,11278045**Beta** 0,70131081

Tabla 8 Parámetros
Log-Normal RCP 8,5

Figura 48 Ajuste logarítmico normal escenario RCP 8,5

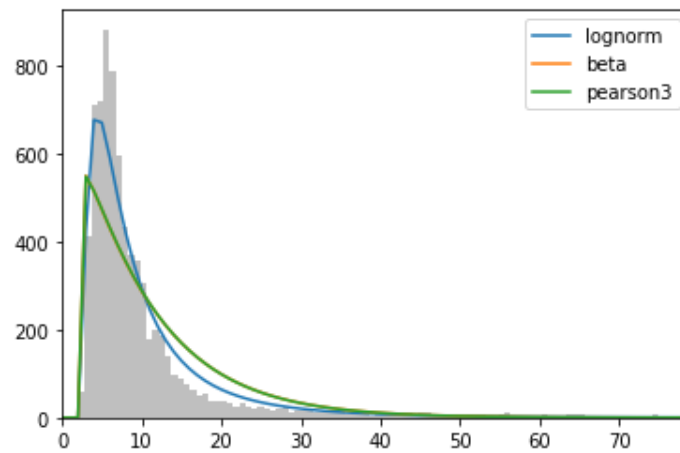


Figura 49 Mejores ajustes de la serie de RCP 8,5

7.4. Eventos Extremos

Uno de los métodos más utilizado en hidrología para realizar el estudio de valores extremos es el método de Gumbel, que nos permite estimar la probabilidad de ocurrencia de los distintos eventos. Esta probabilidad de ocurrencia esta ligada al periodo de retorno.

Tal y como se ve en la ecuación 11, la probabilidad de un evento es inversa a su periodo de retorno, es decir, si un evento se presenta cada 10 años, su probabilidad de ocurrencia será de $1/10=10\%$. En contraste, si un evento sucede con una probabilidad de 0,04 su periodo de retorno será $1/0,04=25$ años (Román, 2008). Así podemos definir varios periodos con sus distintas posibilidades. En la tabla 9 se recogen una serie de periodos con su probabilidad de ocurrencia relacionada.

$$\text{Periodo de retorno} = \frac{1}{\text{Probabilidad}} \quad (11)$$

PERIODO DE RETORNO	PROBABILIDAD
5	0,8
10	0,9
25	0,96
50	0,98
100	0,99
500	0,998

Tabla 9 Periodos de retorno

La formulación de Gumbel nos permite establecer la relación entre la probabilidad y los caudales. La formulación es la siguiente:

$$probabilidad = e^{-e^{-y}} \quad (12)$$

La probabilidad queda entonces definida por la constante de Euler y la variable “y” la cual es una variable intermedia obtenida a partir de distintos parámetros estadísticos. Para obtenerla es necesario tomar los valores máximos anuales de cada año. De los 20 valores, y para cada una de las a tres series, se obtuvo entonces la media $\bar{x}$ y la desviación típica s_x de la muestra (Bernis, 2009).

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} \quad (13)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (14)$$

La variable intermedia y queda definida por los siguientes parámetros (Román, 2008):

$$y = \alpha(x - u) \quad (15)$$

Donde x es la variable principal y representa la probabilidad de que se presente un valor inferior a este, es nuestro caso, los distintos caudales. Para obtener α y u necesitamos además de la media y la varianza dos parámetros obtenidos en la siguiente tabla:

Nº DE DATOS	μ_y	σ_y
10	0,4952	0,9496
15	0,5128	1,0206
20	0,5236	1,0628
50	0,5485	1,1607
75	0,5559	1,1898

Tabla 10 Parámetros de Gumbel (Román, 2008)

Puesto que nuestras series de caudales son de 20 años, tomamos $\mu_y = 0,5236$ y $\sigma_y = 1,0628$. Finalmente tenemos todos los datos para obtener α y u mediante las siguientes formulas:

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{s_x} \quad (16)$$

$$u = \bar{x} - \frac{\mu_y}{\alpha} \quad (17)$$

En resumen, para cada valor de un caudal, la variable x , podemos obtener la variable intermedia con los parámetros α y u . Finalmente, introduciendo el valor de la variable y en la ecuación 12 obtenemos la probabilidad de ocurrencia.

En la tabla 9 hemos obtenido las distintas probabilidades para cada periodo de retorno por lo que el cálculo necesario es el inverso. En la ecuación 18 se ha despejado la variable x que representan los caudales en función de la probabilidad p y los parámetros anteriores.

$$x = \frac{-\ln(-\ln(p))}{\alpha} + u \quad (18)$$

Así se obtuvieron los valores de los caudales para distintos periodos de retorno. Estos valores se han representado en la tabla 11.

Periodo de Retorno	Probabilidad de no excedencia	1998-2018 Caudal (m3/s)	2048-2068 RCP 4,5 Caudal (m3/s)	2048-2068 RCP 8,5 Caudal (m3/s)
5	0,8	147,98	145,90	143,78
10	0,9	176,18	173,28	172,00
25	0,96	211,80	207,89	207,66
50	0,98	238,23	233,56	234,12
100	0,99	264,46	259,05	260,38
500	0,998	325,08	317,93	321,06

Tabla 11 Periodos de retorno

8. Conclusiones

Antes de analizar los resultados merece la pena recordar los objetivos que han movido el estudio, siendo el principal la amenaza del cambio climático. Cabezón de la Sal es una comunidad que ha tenido que lidiar con frecuentes inundaciones en los últimos años por lo que se han tenido que aplicar medidas económicas para proteger los bienes materiales y las vidas de sus habitantes. Debido a la gran magnitud de estas medidas es importante preguntarse si serán suficiente para frenar los daños de las inundaciones futuras y no solo de las actuales. Los resultados de este estudio concuerdan que sí, estas medidas continuarán siendo efectivas, pues los efectos del cambio climático no tendrán un gran impacto a nivel de caudales.

Esto no significa que Cabezón de la sal y por extensión la cuenca del Saja esté libre de los efectos del cambio climático. Al ser una zona cuya economía es dependiente de la agricultura y la ganadería los cambios en precipitación y temperatura tienen un impacto directo en la capacidad de producción de la zona. En términos de caudales se ha observado un descenso generalizado del caudal medio. Aunque en las épocas de lluvia no se espera que halla problemas por falta de agua, los caudales en verano son mucho menores, por lo que es posible, aunque improbable, que se tengan que tomar medidas en el futuro para asegurar un abastecimiento suficiente.

Los periodos de retorno apuntan a que los eventos de inundación serán más infrecuentes en el futuro, aunque las variaciones son del orden del 3-5% por lo que es factible asumir que serán tan relevantes como lo son ahora. Curiosamente el modelo de RCP 4,5 frente al modelo de RCP 8,5 predice mayores caudales para periodos de retorno relativamente cortos y menores caudales para periodo de retorno largos. La explicación de porque sucede esto es bien sencilla mirando los deltas y el régimen pluviométrico actual de Cantabria. Como ya se ha explicado, los eventos mayores de precipitación suceden en el mes de noviembre, y los segundos eventos mas grandes suceden en los meses de marzo y abril. Si miramos los deltas vemos que las precipitaciones en invierno apenas varían para el RCP 4,5 y varían muy poco para el escenario RCP 8,5. En otoño las variaciones son mayores y similares para ambos por lo que en los años cuando el caudal máximo se produce en este periodo los dos escenarios dan respuestas similares, mientras que en los años cuando el evento máximo se produce el invierno se obtienen valores más altos en el escenario de RCP 4,5.

Al final todos estos cambios no dejan de ser menores por lo que parece natural preguntarse si realmente la cuenca del Saja no es vulnerable a cambios en el clima o si simplemente no se ha considerado un periodo de tiempo suficientemente lejano como para que los cambios sean notables. En Cantabria ya se han registrado cambios en temperatura y precipitación por lo que solo es de esperar que la tendencia continúe. Aunque es cierto que si se hubiese considerado un periodo de tiempo posterior las variaciones hubieran sido

mayores, es más que improbable que en solo 20 o 40 años más estos cambios sean significativos.

También es importante considerar que las inundaciones no vienen solo dadas por una serie de precipitaciones y temperaturas, si no que también están condicionadas por las características físicas del suelo. Nuestro modelo esta creado y calibrado con las características actuales de la cuenca hidrográfica, y muchas de estas están sujetas a cambiar en el futuro, ya sea de forma natural o por acción humana. Por esto mismo es importante tener en cuenta que de haber considerado un periodo en un futuro más lejano se estaría asumiendo una incertidumbre mayor que afectaría a la propia relevancia de los resultados.

Del mismo modo es necesario tener en cuenta que las estructuras y obras de protección frente a inundaciones tienen un tiempo de vida limitado. Aunque las presas se calculan para grandes periodos de hasta 100 años, otras obras más comunes y que se realizan actualmente como canalizaciones cuentan con periodos mucho mas pequeños, de entre 10 o 20 años.

Aunque los resultados sean positivos no es posible extrapolarlos mas allá del área analizada. Quizá se pueda asumir que en Cantabria las cuencas hidrográficas tendrán una progresión parecida, pero al mismo tiempo el cambio climático no afecta a todos los lugares por igual. Cabezón de la Sal parece estar entre los pocos sitios privilegiados donde estos efectos serán mínimos, al menos dentro de los límites de este estudio.

No se puede descartar tampoco que la zona no se vea indirectamente afectada por cambios en los alrededores, tanto climáticos como sociales. El aumento del nivel del mar podría, por ejemplo, generar movimientos demográficos de las zonas de costa hasta el interior y así con numeroso ejemplos. Por desgracia muchos de estos cambios van más allá de lo que los modelos actuales pueden predecir por lo que existe una gran incertidumbre detrás de todas estas posibilidades.

Al final la realidad del cambio climático es complicada y existen muchas predicciones pesimistas al respecto. Merece la pena por tanto concluir el estudio con una nota positiva y es que aún queda mucho tiempo antes de que Cabezón de la Sal se enfrente a las consecuencias del calentamiento global, dejando un gran margen de seguridad para estudiar y tomar las medidas necesarias.

Bibliografía

Aguilera Navarro, María Alejandra. 2007. Estimación de funciones de distribución de probabilidad para caudales maximos en la región del maule. Talca : Universidad de TALCA, 2007.

Allen, Michael. 2018. Distribution fitting to data. [En línea] 3 de Mayo de 2018. <https://pythonhealthcare.org/2018/05/03/81-distribution-fitting-to-data/>.

Ancell Trueba, Rafael y Célis Díaz, Ramón. Termopluviometria de Cantabria durante el periodo 1981-2010. s.l. : Agencia Estatal de Meteorología .

Ayuntamiento de Cabezón de la Sal. 2013. Página Oficial del Ayuntamiento de Cabezón de la Sal. *El Gobierno y la Confederación Hidrográfica del Cantábrico ponen fin a las inundaciones en núcleos de Cabezón y Mazcuerras por el desbordamiento del Saja.* [En línea] 25 de Noviembre de 2013. <http://www.cabezondelasal.net/2013/11/25/el-gobierno-y-la-confederacion-hidrografica-del-cantabrico-ponen-fin-a-las-inundaciones-en-nucleos-de-cabezon-y-mazcuerras-por-el-desbordamiento-del-saja/>.

Benestad, Rasmus, y otros. 2017. Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use. *EURO-CORDEX Guidelines.* [En línea] 08 de 2017. <https://www.euro-cordex.net/imperia/md/content/csc/cordex/euro-cordex-guidelines-version1.0-2017.08.pdf>.

Bernis, Josep Maria Franquet. 2009. El caudal mínimo medioambiental del tramo inferior del río Ebro. *Caudales mínimos medioambientales. Periodos de retorno.* Tortosa : UNED, 2009, págs. 103-105.

Blanco, Eusebio Ingol. 2016. Tutorial: Modelamiento Hidrológico Geoespacial Usando HEC-GeoHMS. s.l. : Autoridad Nacional del Agua, 2016.

Cabrera, Juan. *Calibración de Modelos Hidrológicos.* Lima, Peru : Universidad Nacional de Ingeniería.

Confederación Hidrográfica del Cantabrico. chcantabrico.es. *Rio Saja.* [En línea] https://www.chcantabrico.es/documents/20143/83020/rio_saja.pdf/aa1a855a-354f-bb19-1b98-150d67017d70.

Confederación hidrográfica del cantábrico, O.A. [chcantabrico](http://chcantabrico.es). *Sistemas de explotacion - Saja.* [En línea] https://www.chcantabrico.es/sistemas_explotacion/saja.

Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria. Directiva Marco del Agua en Cantabria. *Rios Saja.* [En línea] <http://dmacantabria.cantabria.es/visorWeb/pdf/RIOS/SAJA.pdf>.

Decreased frequency of North Atlantic polar lows associated with future climate warming. **Zahn, Matthias y von Storch, Hans. 2010.** 2010, Nature, págs. 309-312.

Directiva marco del agua Cantabria. [dmacantabria](http://dmacantabria.es). *Cuenca del Saja-Besaya.* [En línea] <http://dmacantabria.cantabria.es/visorWeb/pdf/RIOS/SAJA.pdf>.

Elaboración de escenarios regionales de cambio climático de alta resolución sobre el Pais Vasco. **ihobe. 2016.** 2016, Proyecto Klimatek, págs. 16-19.

IPCC. 2017. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* s.l. : Cambridge Univ. Press, 2017.

—. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland : s.n., 2014, pág. 151 pp.

Martínez Castizo, Daniel. 2018. Cabezón de la Sal: De la destrucción del patrimonio a la recuperación de la identidad salinera. *Diario16*. 3 de Marzo de 2018.

Ministerio de medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2010. Metodología de producción de la base de datos CLC-Change 2000-2006. Enero de 2010. pág. 30.

Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. AdapteCCA.es. [En línea] AdapteCCA.es.

Molnar, Peter. 2011. *Calibration of Hydrological Models. Hydrological Processes and Modelling*. Switzerland : Swiss Federal Research Institute WSL. , 2011.

Román, F. Javier Sánchez San. 2008. Hidrologia USAL. *Distribuciones estadísticas*. [En línea] Marzo de 2008. http://hidrologia.usal.es/Complementos/estadistica/distr_esta.pdf.

Sanchez San Román, F. Javier. 2015. HEC-HMS Manual Elemental. Salamanca : s.n., Marzo de 2015.

Sánchez San Román, Javier. Hidrograma unitario de Clark. *Hidrologia USAL*. [En línea] <http://hidrologia.usal.es>.

Scharfenberg, Bill, y otros. 2018. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual*. 2018.

Tóth, Brigitta, y otros. 2017. 3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution. *Hydrological Processes*. [En línea] 2017. <https://doi.org/10.1002/hyp.11203>.

United Nations Climate Change. cop23.unfccc.int. *What is the Paris Agreement?* [En línea] <https://cop23.unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/what-is-the-paris-agreement>.

A. Parámetros del modelo

Parámetros físicos:

SUBCUENCA	ÁREA (KM2)	COORDENADA X UTM	COORDENADA Y UTM	ELEVACIÓN (METROS)
W6990	60,02375	407.842,56	4.800.268,64	121,26
W6980	75,169	400.128,52	4.795.807,76	125,57
W6960	68,192	405.873,44	4.793.715,76	592,70
W6930	41,928	395.170,86	4.787.562,06	227,85
W6920	39,794	401.099,64	4.787.590,00	264,55
W6910	53,791	396.040,24	4.781.590,62	788,01
W6880	33,183	399.083,28	4.778.065,99	590,54
W6870	67,529	404.111,01	4.771.427,23	1343,68
W6860	45,944	394.601,02	4.771.505,36	1121,13

Tabla 12 Parámetros Físicos del Modelo

Parámetros después de la calibración

PARÁMETRO	W6990	W6980	W6960	W6930	W6920	W6910	W6880	W6870	W6860
Simple canopy Max storage mm	0,0120	0,0010	0,0145	0,0882	0,1573	0,1250	0,9086	0,1591	0,2954
Simple surface Max storage mm	46,57	56,12	73,38	88,49	73,52	77,19	62,87	35,86	4,11
SMA Maximum infiltration mm/hr	98,22	46,36	13,14	0,04	0,08	12,05	10,41	5,98	4,41
SMA Soil storage mm	114,00	110,00	108,00	108,00	107,00	106,00	110,00	106,00	100,00
SMA Tension storage mm	0,17	0,24	0,31	0,39	0,46	0,54	0,61	0,69	0,76
SMA Soil percolation mm/hr	0,70	0,76	0,54	0,05	0,08	0,37	0,19	0,08	0,37
SMA GW1 Storage mm	44,25	57,00	46,28	33,62	24,81	20,26	0,05	2,82	14,85
SMA GW1 Percolation mm/hr	2,30	2,26	2,04	2,07	2,18	2,38	2,51	2,70	2,94
SMA GW1 Coefficient hr	47,74	80,67	113,59	130,05	142,85	151,19	154,06	150,25	138,27
SMA GW2 Storage mm	207,09	282,97	387,96	446,67	392,42	374,93	410,31	158,66	77,95
SMA GW2 Percolation mm/hr	0,59	0,63	0,46	0,10	0,12	0,14	0,11	0,10	0,02
SMA GW2 Coefficient hr	1111,10	1222,20	1333,30	1444,40	1555,60	1666,70	2370,30	1888,90	2000,00

CLARK - Time of concentration hr	0,56	1,26	1,99	1,41	1,37	2,49	0,95	2,78	3,90
CLARK - Storage coefficient hr	0,42	0,95	1,50	1,06	1,03	1,86	0,71	2,08	2,92
BASEFLOW - GW1 Initial m³/s	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
BASEFLOW GW1 Coeff. hr	12,36	4,89	4,82	5,26	1,45	2,31	4,65	1,02	11,88
BASEFLOW GW1 Reservoirs	1	1	1	1	1	1	1	1	1
BASEFLOW - GW2 Initial m³/s	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
BASEFLOW GW2 Coeff. hr	40,00	3,64	32,04	6,30	75,04	25,48	280,00	597,68	861,31
BASEFLOW - GW2 Reservoirs	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 13 Parámetros finales

PARÁMETRO	R6710	R6720	R6750	R6770	R6790	R6800	R6810
Muskingum Routing K hr	5	4	3,5	3	2,8	2,3	2
Muskingum Routing X	0,2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,3	0,35

Tabla 14 Parámetros finales

Parámetros antes de la calibración

PARÁMETRO	W6990	W6980	W6960	W6930	W6920	W6910	W6880	W6870	W6860
Simple canopy Max storage mm	1,5	1,5	1,5	1	1,8	0,8	2	0,4	0,3
Simple surface Max storage mm	80	80	80	70	90	85	100	60	50
SMA Maximum infiltration mm/hr	7,02	7,58	5,35	0,48	0,82	3,66	1,94	0,82	0,36
SMA Soil storage mm	114,00	110,00	108,00	108,00	107,00	106,00	110,00	106,00	100,00
SMA Tension storage mm	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
SMA Soil percolation mm/hr	0,70	0,76	0,54	0,05	0,08	0,37	0,19	0,08	0,37
SMA GW1 Storage mm	450	441	441	441	432	432	441	432	423
SMA GW1 Percolation mm/hr	0,6318	0,6822	0,4815	0,0432	0,0738	0,3294	0,1746	0,0738	0,0324

SMA GW1 Coefficient hr	100	100	100	100	100	100	100	100	100
SMA GW2 Storage mm	1290	1290	1290	1275	1275	1290	1290	1290	1290
SMA GW2 Percolation mm/hr	0,59	0,63	0,46	0,10	0,12	0,14	0,11	0,10	0,02
SMA GW2 Coefficient hr	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
CLARK - Time of concentration hr	0,557	1,262	1,995	1,409	1,374	2,485	0,951	2,776	3,898
CLARK - Storage coefficient hr	0,418	0,946	1,496	1,056	1,031	1,864	0,713	2,082	2,924
BASEFLOW - GW1 Initial m³/s	17,76	17,76	17,76	17,76	17,76	17,76	17,76	17,76	17,76
BASEFLOW GW1 Coeff. hr	100	100	100	100	100	100	100	100	100
BASEFLOW GW1 Reservoirs	1	1	1	1	1	1	1	1	1
BASEFLOW - GW2 Initial m³/s	17,76	17,76	17,76	17,76	17,76	17,76	17,76	17,76	17,76
BASEFLOW GW2 Coeff. hr	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
BASEFLOW - GW2 Reservoirs	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 15 Parámetros antes de la calibración

PARÁMETRO	R6710	R6720	R6750	R6770	R6790	R6800	R6810
Muskingum Routing K hr	2,339	1,6657	1,4911	0,84514	1,1969	0,75704	0,33445
Muskingum Routing X	0,2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,3	0,35

Tabla 16 Parámetros antes de la calibración

B. Estaciones meteorológicas

Red de estaciones pluviométricas empleadas

CÓDIGO	RED	NOMBRE	X	Y	DATUM
9008E	AEMET	VILLASUSO	4449770.172815947	5598316.565024087	epsg:25830
9005	AEMET	ESPINILLA	4359377.000749743	5733224.576166123	epsg:25830
9001	AEMET	REINOSA	4397004.5298892995	5676020.992772786	epsg:25830
1161I	AEMET	ROZADIO	4296417.531545702	5844922.694280207	epsg:25830
1160I	AEMET	EMBALSE DE LA COHILLA	4289413.746701492	5845142.541715762	epsg:25830
1159O	AEMET	UZNAYO	4281561.626659967	5852452.824600584	epsg:25830
1156	AEMET	COBRECES	4384348.6585386265	5735481.829689002	epsg:25830
1151	AEMET	LOS CORRALES DE BUELNA	4444719.447462825	5633037.838584477	epsg:25830
1120	AEMET	SEL DE LA CARRERA	4788449.575490578	5082632.0918052485	epsg:25830
1115	AEMET	PUENTE ARCE	4797160.632684801	5102352.5879624225	epsg:25830
1144	AEMET	MOLLEDO DE PORTOLIN	4449288.181754495	5613677.876034356	epsg:25830
1140	AEMET	SANTA MARÍA DE AGUAYO	4444909.066867037	5612339.496828947	epsg:25830
1139E	AEMET	ONTORIA	4380021.179463006	5733303.713485349	epsg:25830
1136E	AEMET	TERÁN	4333937.389040427	5790942.356399591	epsg:25830
1131I	AEMET	TORRELAVEGA (SNIACE)	4460370.271422464	5621138.359453233	epsg:25830
1129	AEMET	CASTAÑEDA	4786726.820753976	5107223.275344156	epsg:25830
E055	CHC	TORRELAVEGA	412801.131971	4801214.219303	epsg:25830
A707	CHC	RUENTE	398837.977136	4792183.33797	epsg:25830
A708	CHC	CORRALES DE BUELNA (LOS)	413840.289906	4789023.36251	epsg:25830
Q119	CHC	ARENAS DE IGUAÑA	413866.111596	4784213.91559	epsg:25830
P071	CHC	SAN MIGUEL DE AGUAYO	416409.04	4767180.46	epsg:25830

Tabla 17 Estación pluviométricas

Red de termómetros empleada

CÓDIGO	RED	NOMBRE	X	Y	DATUM
9005	AEMET	ESPINILLA	400069	4764006	epsg:25830
9001	AEMET	REINOSA	407236	4761653	epsg:25830
1161I	AEMET	ROZADIO	387429	4786487	epsg:25830
1160I	AEMET	EMBALSE DE LA COHILLA	386644	4776342	epsg:25830
1159O	AEMET	UZNAYO	385663	4771730	epsg:25830
1156	AEMET	COBRECES	401745	4804316	epsg:25830
1151	AEMET	LOS CORRALES DE BUELNA	413712	4790139	epsg:25830
1144	AEMET	MOLLEDO DE PORTOLIN	415810	4777462	epsg:25830
1131I	AEMET	TORRELAVEGA (SNIACE)	416112	4801833	epsg:25830
E055	CHC	TORRELAVEGA	412801.131971	4801214.219303	epsg:25830
A707	CHC	RUENTE	398837.977136	4792183.33797	epsg:25830
A708	CHC	CORRALES DE BUELNA (LOS)	413840.289906	4789023.36251	epsg:25830
Q119	CHC	ARENAS DE IGUAÑA	413866.111596	4784213.91559	epsg:25830
P071	CHC	SAN MIGUEL DE AGUAYO	416409.04	4767180.46	epsg:25830

Tabla 18 Estaciones termométricas

Estación de Aforo

COD_SAIH	E055
COD_ROEA	1242
RED_estaci	CHC
Sistema	Saja
Río	Saja
UBICACIÓN	Río Saja en el Azud del Puente San Miguel
MUNICIPIO	Torrelavega
PROVINCIA	Cantabria
X_ETRS89_U	412801.1
Y_ETRS89_U	4801214.2
precip	1
caudal	0
nivel	1
Taire	1
amonio	0
conduct	0
oxigeno	0
pH	0
Tagua	0
turbidez	0
inicio	21/10/2011
fin	31/05/2019

Tabla 19 Estación de aforo

C. Análisis estadístico

Ajustes estadísticos de la serie histórica:

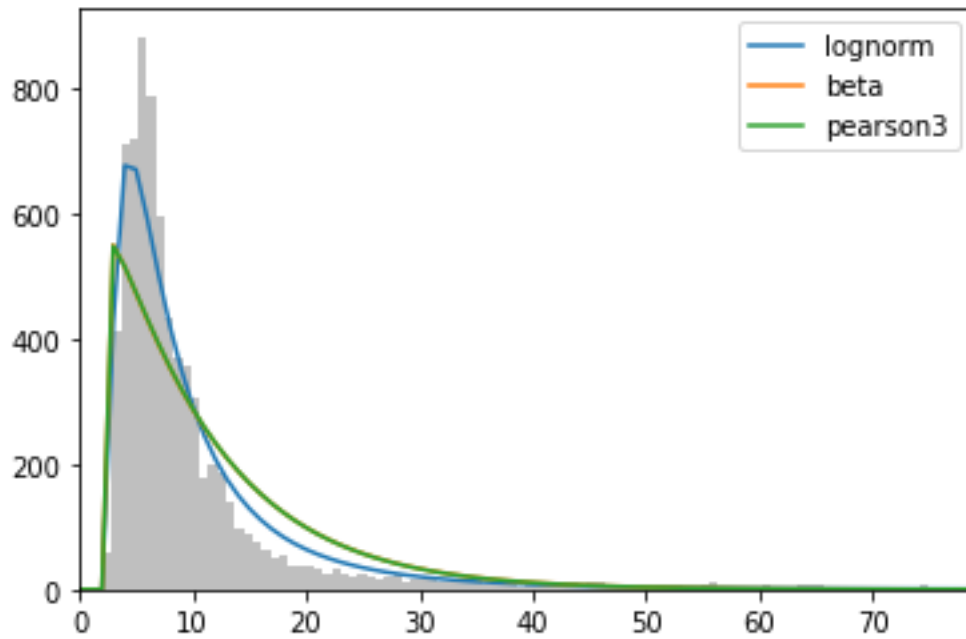


Figura 50 Mejores ajustes estadísticos serie Histórica

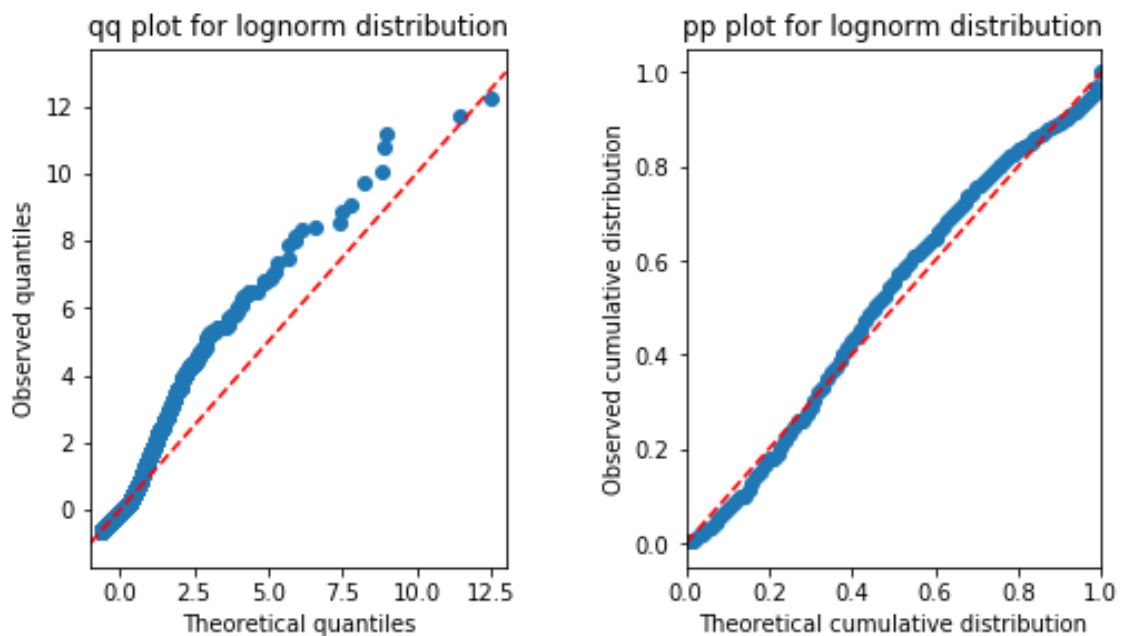


Figura 51 Diagramas QQ y PP. Serie Histórica. Distribución log-normal

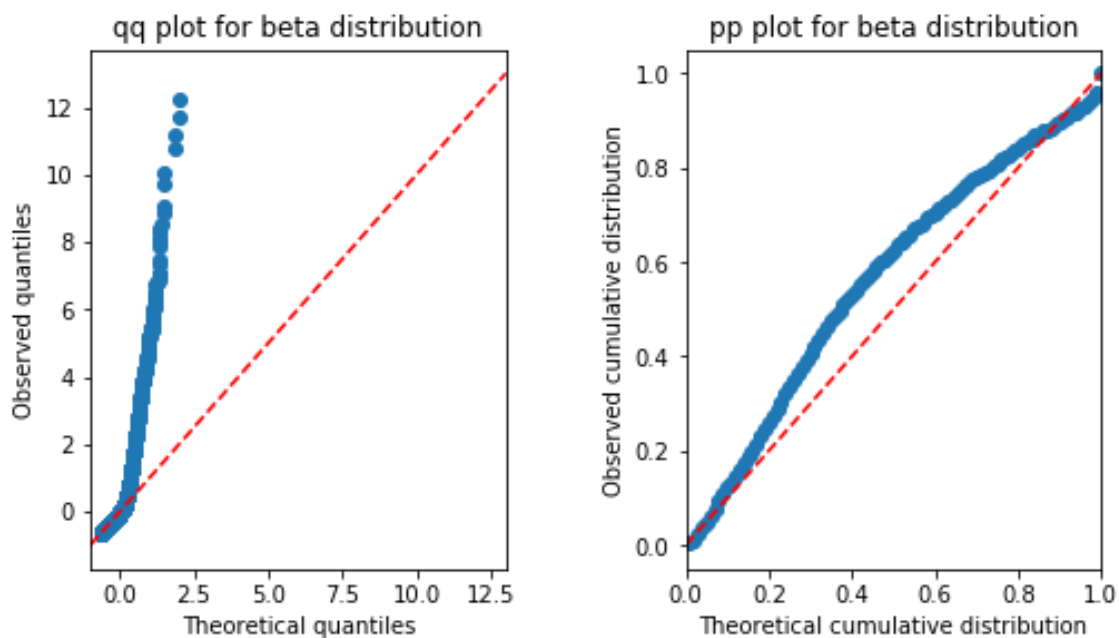


Figura 52 Diagramas QQ y PP. Serie Histórica. Distribución beta

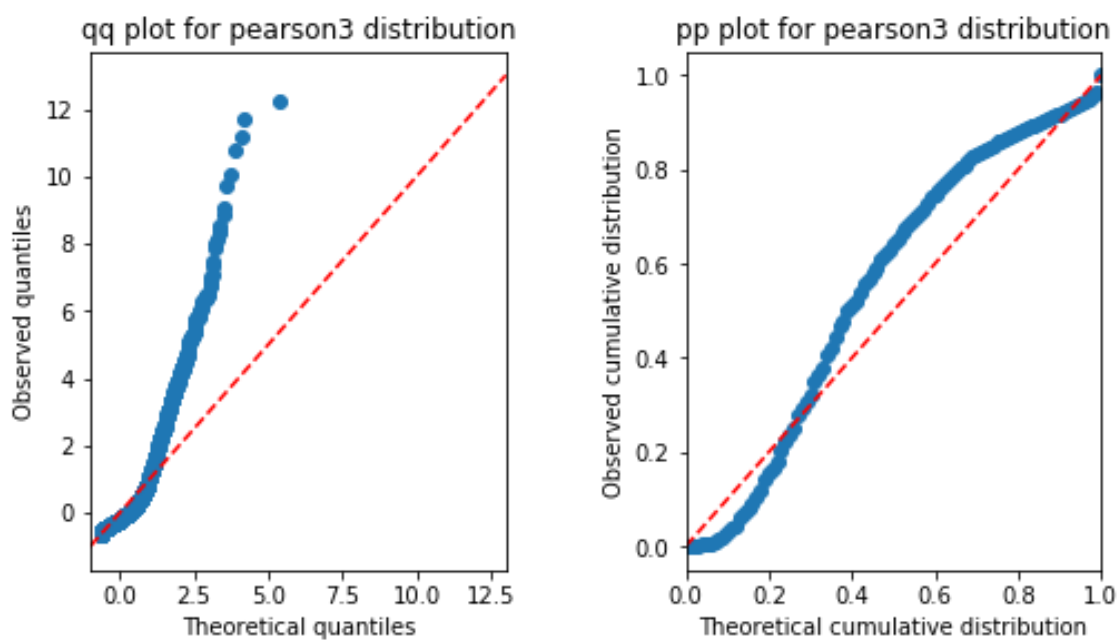


Figura 53 Diagramas QQ y PP. Serie Histórica. Distribución Pearson III

Ajustes estadísticos serie RCP 4,5

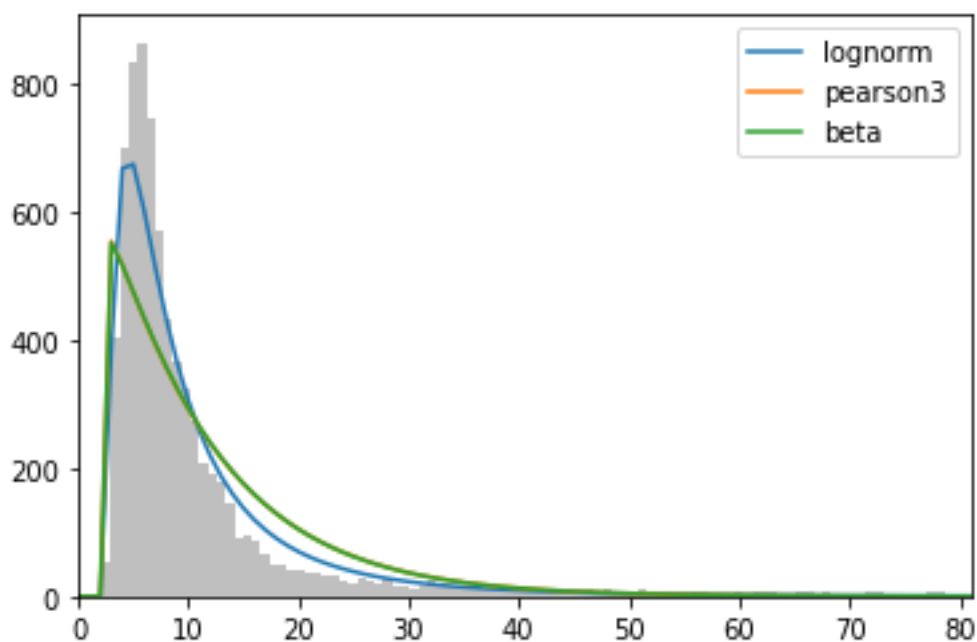


Figura 54 Mejores ajustes estadísticos RCP 4,5

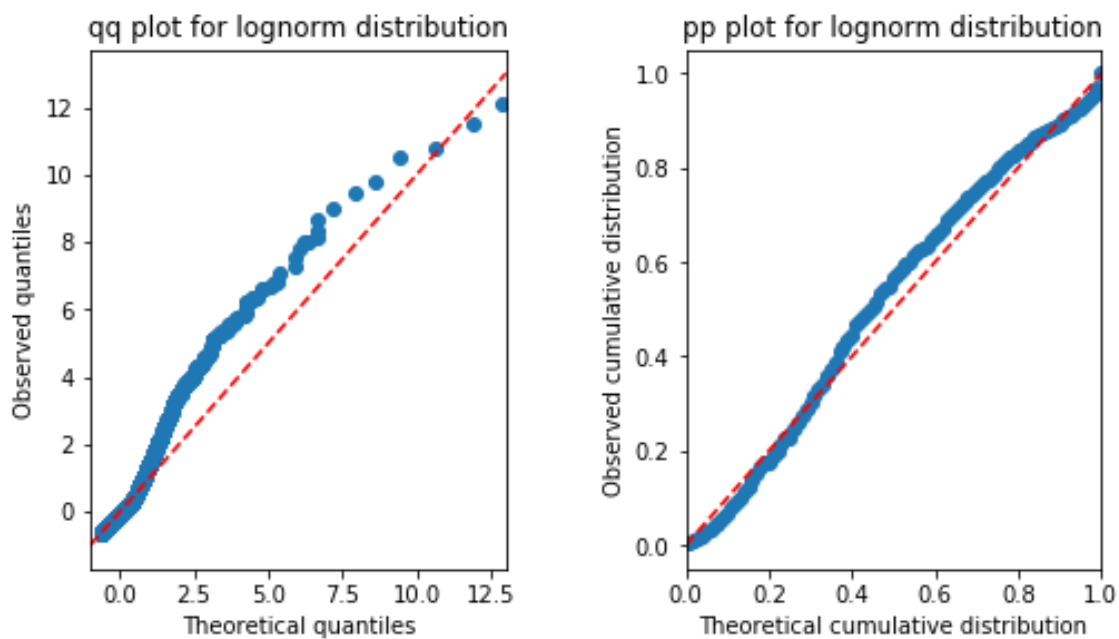


Figura 55 Diagramas QQ y PP. RCP 4,5. Distribución log-normal

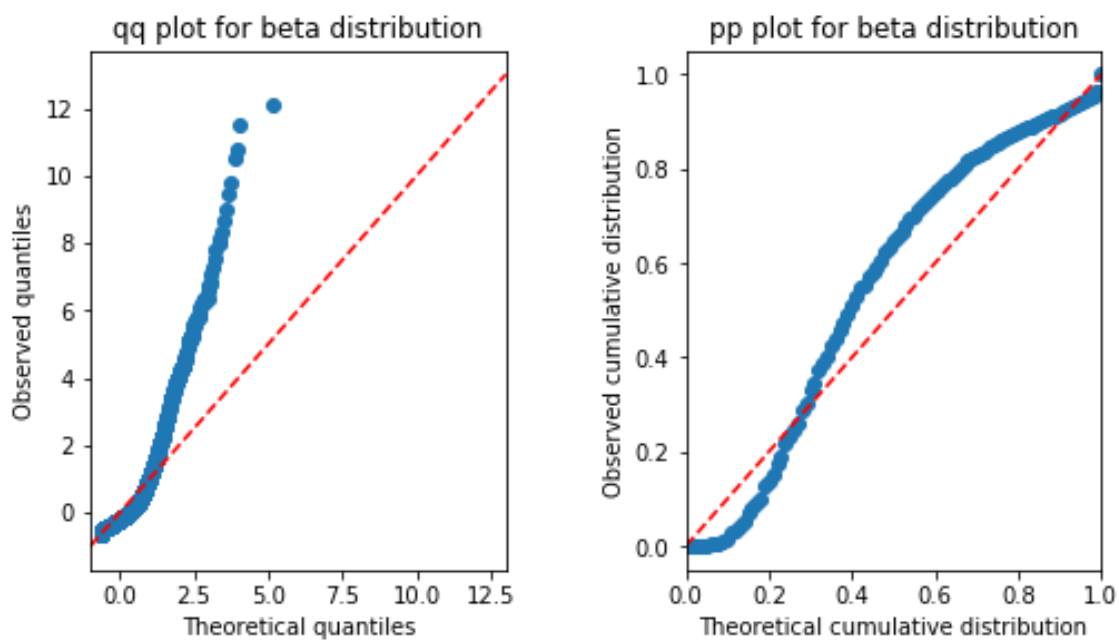


Figura 56 Diagramas QQ y PP. RCP 4,5. Distribución beta

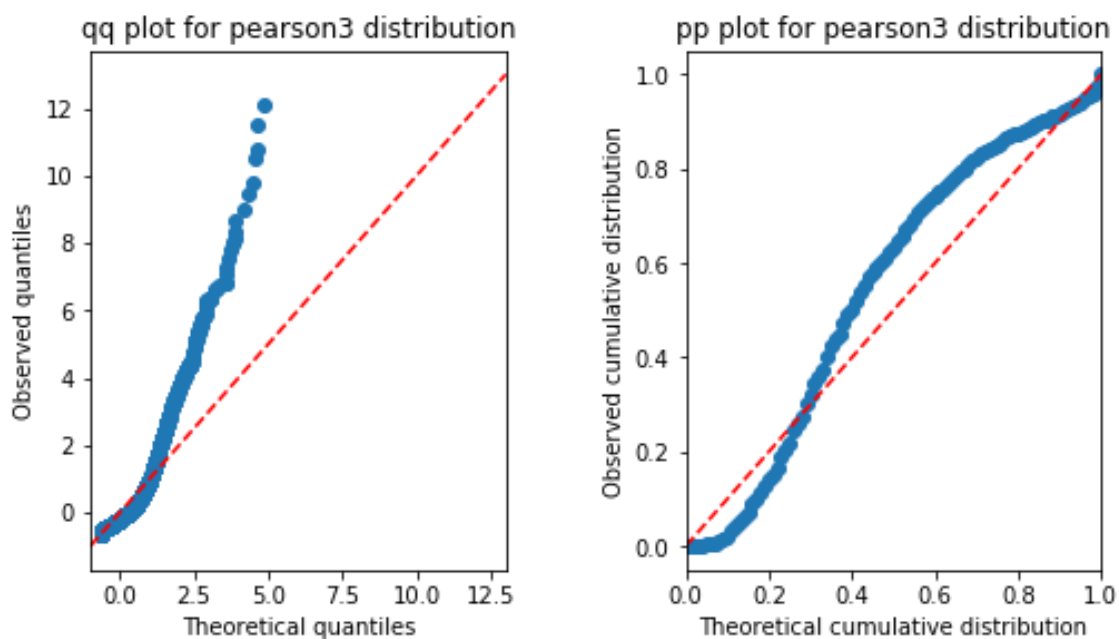


Figura 57 Diagramas QQ y PP. RCP 4,5. Distribución Pearson III

Ajustes estadísticos serie RCP 8,5

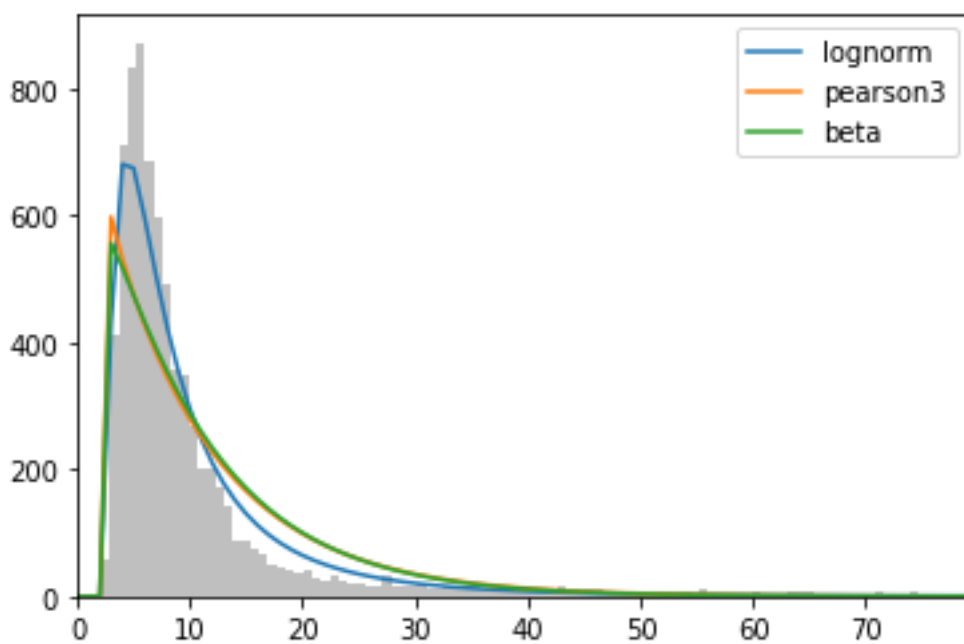


Figura 58 Mejores ajustes estadísticos RCP 8,5

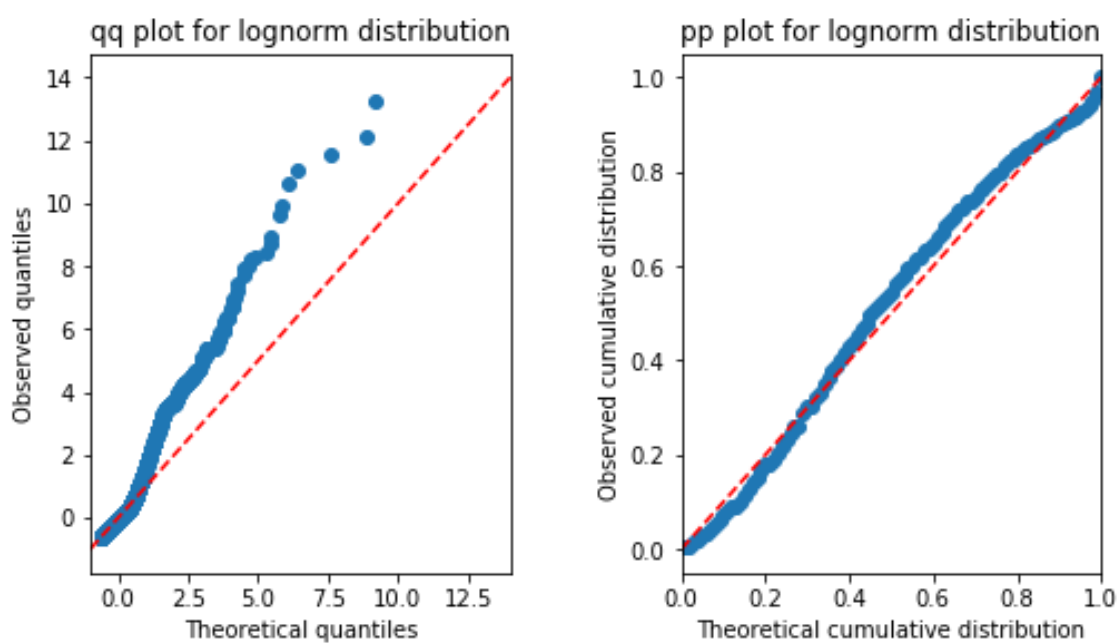


Figura 59 Diagramas QQ y PP. RCP 8,5. Distribución log-normal

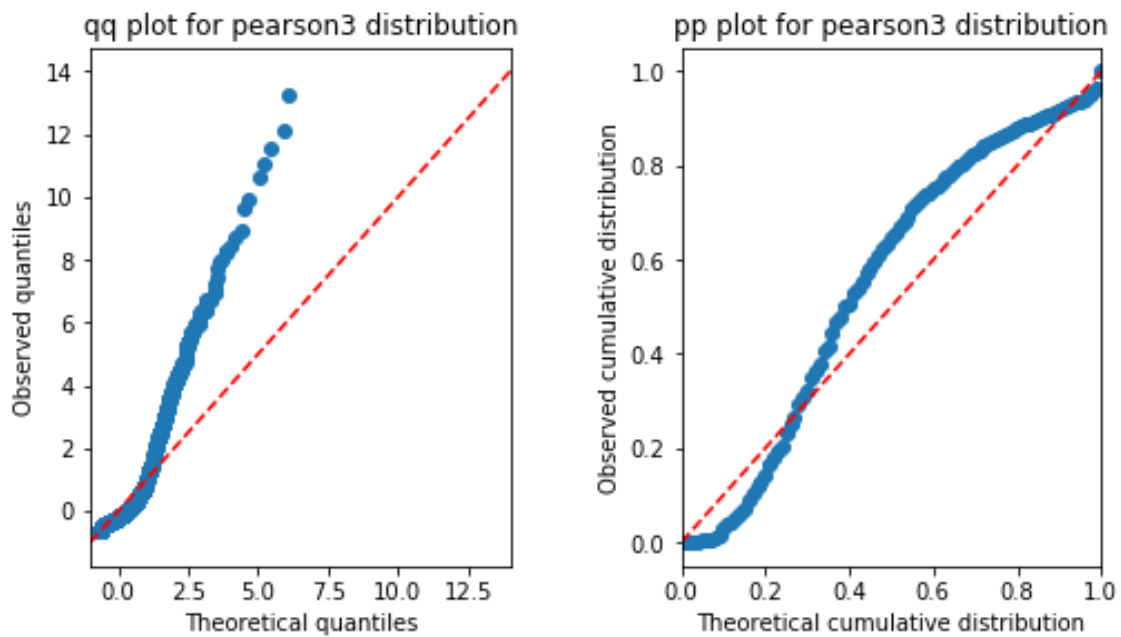


Figura 60 Diagramas QQ y PP. RCP 8,5. Distribución beta

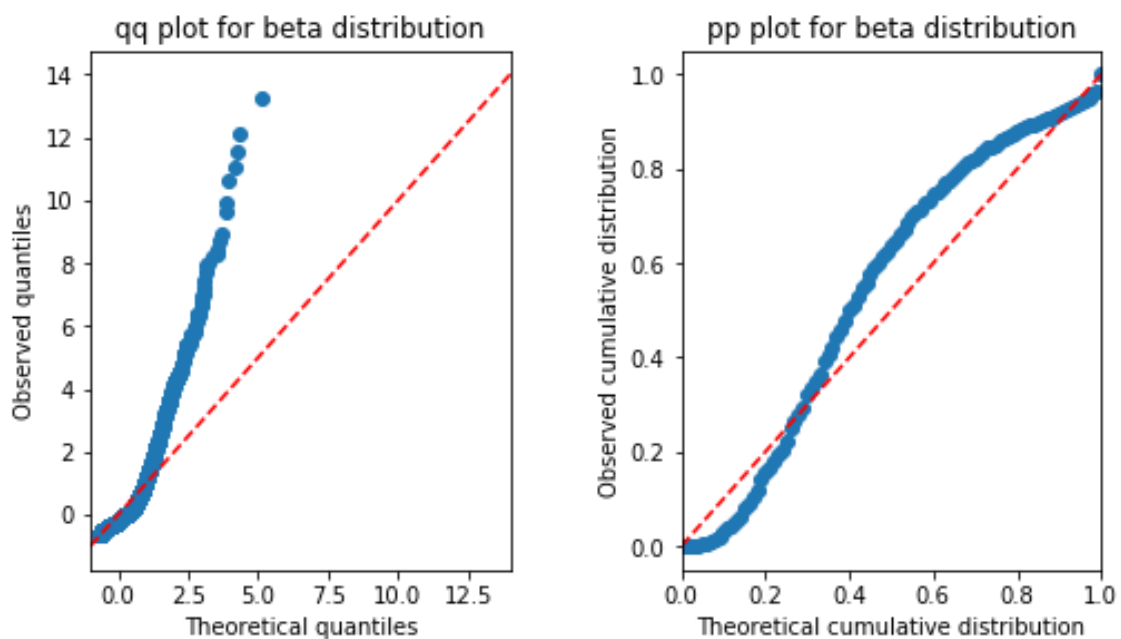


Figura 61 Diagramas QQ y PP. RCP 8,5. Distribución Pearson III

Caudales Máximos

Año	Max. Histórico 45 m3/s	Año	Max. RCP 45 m3/s	Max. RCP 85 m3/s
1998	90.6	2048	93	91.5
1999	91	2049	88.4	88.3
2000	78	2050	81.6	67.8
2001	93.3	2051	94.1	89.1
2002	88.8	2052	83.6	82.5
2003	112.6	2053	113.1	111
2004	118.4	2054	114.3	114.3
2005	99	2055	98.2	97.1
2006	68.6	2056	68.1	67.1
2007	78.7	2057	87.2	75.9
2008	136.7	2058	133.5	133.6
2009	84	2059	87.1	81.4
2010	120	2060	115.7	115.4
2011	35.1	2061	35.1	26.1
2012	134.2	2062	119.2	118.8
2013	189.6	2063	186.8	182.9
2014	146.1	2064	143.5	141
2015	193.6	2065	195.3	191
2016	164	2066	160.5	158.6
2017	83.9	2067	81.4	80.8
2018	135.4	2068	135.9	134.2

Tabla 20 Caudales máximos anuales

Distribución Gumbel	Serie histórica	RCP 4,5	RCP 8,5
Media	111.30	110.27	107.07
Desviación	39.93	38.79	39.97
μ_y	0.5236	0.5236	0.5236
σ_y	1.0628	1.0628	1.0628
α	37.5713	36.4975	37.6087
u	91.6277	91.1566	87.3748

Tabla 21 Parámetros de la distribución Gumbel