

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



Estudio de vulnerabilidad al cambio climático de la cuenca del Nansa

Trabajo realizado por: *Alaia Malaina Arjones*

Dirigido: *Manuel del Jesus Peñil*

Titulación: Grado en Ingeniería Civil

Mención: Hidrología

Santander, Junio de 2019



Resumen

Título:	Estudio de la vulnerabilidad al cambio climático de la cuenca del Nansa
Autora:	Alaia Malaina Arjones
Director:	Manuel del Jesus Peñil
Convocatoria:	Junio 2019
Palabras Clave:	Nansa, modelo, subcuenca, series, predicción

El cambio climático es a día de hoy un tema que está cobrando más y más importancia a nivel global a causa de las consecuencias que ya se empiezan a notar en varias partes del mundo. Un ejemplo de ello son los destrozos a las orillas del mar, inundaciones primaverales o veranos demasiado cálidos que cada año se vuelven más habituales en las noticias.

Desgraciadamente para nosotros, España es uno de los países más vulnerables a este proceso a nivel mundial, principalmente por su localización en el globo. Greenpeace no augura nada bueno para nosotros, de hecho sus predicciones incluyen lluvias torrenciales, inundaciones en la zona del Mediterráneo, huracanes, y demás desgracias naturales. A pesar del extremismo que muchos achacan a esta organización, no le podemos dar la espalda a predicciones que estos últimos años hemos empezado a sufrir.

Pero, este cambio climático, tiene muchas consecuencias secundarias ligadas a las cuales no se les suele dar la importancia que se merecen. Una de ellas va ligada al cambio en los regímenes de precipitaciones y temperaturas, que a su vez va ligado a la generación de escorrentía en las cuencas hidrológicas. Si en alguna de estas cuencas estuviera situada una central hidroeléctrica que produjera electricidad de forma continua para la Red Eléctrica Española, la cual suministrase diariamente a multitud de hogares españoles, tendríamos un problema.

Es importante remarcar aquí que actualmente el 30 % aproximadamente de la energía eléctrica consumida por los españoles proviene de centrales hidroeléctricas.

Encontrado el problema, se ha querido estudiar más en detalle el nivel de vulnerabilidad que muestran estas centrales frente al cambio climático ya que una bajada de producción en este sector obligaría a tener que modificar las fuentes de energía estatales. En caso de estar delante de un problema de magnitudes considerables y no abordar dicho problema a tiempo, sería posible que tuviéramos que echar mano de fuentes de energía no renovables o de una mayor importación de energía de Francia. Como suele pasar con las soluciones de última hora, no serían muy acertadas, en este caso ni a nivel ambiental ni a nivel económico.

Para este estudio se ha elegido la cuenca del Nansa, por su proximidad y por ser una cuenca con un gran potencial como fuente de energía hidroeléctrica. Además de ser una gran suministradora de energía en Cantabria.

El protagonista de esta cuenca es el río Nansa, curso fluvial que nace en la unión de pequeños arroyos que surgen en las Sierras de Peña Labra y Peña Sagra, y desemboca en el Mar Cantábrico, a través de la Ría de Tina Menor, en Pesués. Alimentado por una cuenca de 420 km^2 y un desnivel de 1.500 metros, su orografía se presenta óptima para la construcción de un complejo de producción hidroeléctrico.

O al menos eso fue lo que pensó ACCIONA-Energía en 1944, cuando empezaron la construcción de los Saltos del Nansa. Este complejo hidroeléctrico está compuesto por cuatro centrales hidroeléctricas convencionales. Empezando en el embalse de la Cohilla, de 2.5 hm^3 de capacidad, se encuentra la central de Peña de Bejo, con una potencia instalada de 19 MW. Seguida de esta central, unidas por el canal de Rozadío, se encuentran las dos siguientes, la central de Rozadío y la central de Celís. Estas tienen unas potencias instaladas de 12.6 MW y 6.3 MW respectivamente. Finalmente nos encontramos con el embalse de Palombera, el cual conduce parte del agua embalsada a la central de Palombera, con una potencia instalada de 10 MW. La central principal de este complejo es la de Peña de Bejo, ya que controla el agua que llega al resto del sistema.



El estudio se llevó a cabo usando principalmente dos programas de ingeniería: Arc-GIS y Hec-HMS. Con estos programas, y usando las características físicas y topográficas de la cuenca obtenidas de diferentes fuentes, se generaron modelos hidrológicos que simulaban el funcionamiento de la cuenca del Nansa.

Primero, se diseñó el modelo topográfico en Arc-GIS. Después, se exportaron los datos obtenidos a Hec-HMS para terminar de modelar la cuenca incluyendo datos físicos de la misma. A parte de estos datos, se descargaron de AEMET los datos observados de precipitaciones y temperaturas en la zona. De esta forma, el programa disponía de todos los elementos necesarios para generar la escorrentía de nuestro río principal, el río Nansa.

Para asegurar el correcto funcionamiento del modelo final en Hec-HMS, se descargaron series de caudales de los datos de aforo de la Cohilla y de Palombera. Se compararon los datos observados con los que generaba el modelo en el periodo 1998-2004 y se calibró para que fueran lo más parecidos posibles. Posteriormente se validó el correcto funcionamiento del modelo volviendo a comparar los datos observados por los generado por el modelo, esta vez en el periodo de 1989-1995. Se comprobó que ambas series de datos eran similares.

Una vez conseguido el modelo de la cuenca, se procedió a obtener las variaciones de cambio climático en el periodo futuro elegido, 2045-2065. Para ello, se hizo uso de la base de datos de CORDEX. De aquí se descargaron las series de precipitaciones y temperaturas en la zona de la cuenca generadas en el periodo 1950-2100 para el peor de los escenarios diseñados, denominado RCP8.5. En este escenario había disponibles 19 predicciones generadas a partir de distintos mode-los climatológicos más el denominado ensemble, serie calculada de la media de las 19 anteriores. Se decidió que se iban a utilizar las dos series más extremas para el caso de nuestra cuenca, una serie con valores promedio, y el ensemble, que es la serie que se suele utilizar en la práctica habitual.

Gracias a estas series, se calcularon las variaciones de precipitaciones y temperaturas que iba a sufrir la cuenca en las próximas décadas, y se generaron las predicciones climáticas en el periodo 2045-2065.

Con esto y el modelo previamente diseñado, se generaron las predicciones de variación de caudal en el río Nansa.

Primero, se observó que las predicciones del ensemble son efectivamente una buena predicción media de los distintos modelos diseñados. El error respecto al resto de predicciones no superaba los 2 m^3/s , que aplicándolo a estos valores supondría un $\pm 10\%$ de variación respecto al ensemble. Teniendo en cuenta que son predicciones climáticas a 50 años vista, es un error más que aceptable.

Finalmente, comparando los resultados del periodo de referencia y los del ensemble en el periodo futuro, se pudo observar que el caudal en el río Nansa tiende a disminuir paulatinamente, con la excepción de eventos puntuales, donde la escorrentía tendrá valores anormalmente altos. En el periodo estudiado, 2045-2065, la disminución de caudal rondaría el 12.5% respecto a los valores actuales, según el ensemble.

Esto supondría una bajada en la producción de energía hidroeléctrica en los Saltos del Nansa bastante considerable, de un 30 % aproximadamente según un estudio que se llevó a cabo posterior a este. Además, esta bajada se notaría mayormente en los momentos en los que la central está a máximo rendimiento, porque es ahí cuando tendría que hacer uso de la mayor cantidad de volumen embalsado posible. Esto es importante, ya que los momentos de mayor rendimiento, son los periodos del día en los que la demanda de energía es mayor. Según el método de tasación de la energía eléctrica en España, estos periodos son en los que la energía generada se vende a mayor precio. Por lo que este 12.5 % menos de caudal afectaría directamente a la disminución de la producción de energía más cara producida por la central, aumentando las pérdidas económicas que pudiera acarrear.

Por lo que muy posiblemente sería necesario en un futuro no muy lejano modificar o bien las leyes de explotación de las centrales o bien modificar directamente la estructura del complejo para poder optimizar la gran fuente de energía que supone la cuenca.

Esta conclusión coincide con las predicciones hechas por muchos estudios sobre las consecuencias del cambio climático en España. Por lo que este problema no se limita a esta cuenca cántabra, sino que es muy probable que la mayoría de las centrales españolas de este tipo vayan a sufrir unos cambios del estilo. Por ello, sería recomendable que de manera más o menos urgente se empezaran a proponer mejoras de las centrales hidroeléctricas, en caso de querer seguir utilizándolas de forma eficiente y económica.



Abstract

Title:Study of the climate change vulnerability of the Nansa basinAuthor:Alaia Malaina ArjonesDirector:Manuel del Jesus PeñilCall:June 2019Key Words:Nansa, model, subbasin, series, prediction

The climate change is a global issue that is getting more and more importance every year due to its consequences which are starting to be suffered in serveral parts of the world. Some clear examples are the devastating damages originated in beach shores, spring floodings or summers with abnormally high temperatures, which every year become more usual.

Unluckily for us, Spain is one of the most vulnerable countries in the world to this process, basically due to its location in the globe. Greenpeace doesn't predict anything good for us, actually, its forecasts include torrential rainfalls, flood in the mediterranean area, huracanes, and many other natural disasters. In spite of the extremist thoughts this association is normally linked with, it's impossible to ignore forecasts which we have actually started to suffer in the past few years.

Moreover, this climate change has several second order consequences to whom people don't give the importance they deserve. One of them is linked to the variation in the precipitation and temperature regimes, which at the same time is linked with the generation of stream flows in hydrologic basins. If any hydroelectric plant, producing electricity in a continuous way for the "Red Eléctrica Española", which daily provides energy to a huge number of spanish houses, was located in any of these basins, we would definitely have a serious problem in front of us.

It is important to point out that nowadays, approximately the 30% of the electric energy consumed by the spanish population is generated by hydroelectric plants located in hydrologic basins.

Once the problem is found, it looked interesting knowing more in detail about the level of vulnerability these basins show against the climate change, knowing that a decrease of productivity in this sector could lead to a modification in the way the different sources of energy generation are used. In case we faced a problem of considerable reach and we didn't deal with it soon enough, it would be possible the need to increase the use of no renovable energy sources or the need to import a bigger amount of energy, mainly from France. As it is usually common in last minute solutions, it wouldn't be suitable neither for the environment nor for the economy.

The basin of Nansa was the chosen one for this study, because of its proximity and its great potencial as a source of hydroelectric energy generation, besides being one of the most important energy suppliers of Cantabria.

The main character of this basin is the Nansa river, which is born in the merging of little streams in Sierras de Peña Labra y Peña Sagra, and runs into the Cantabric Ocean, through the Tina Menor sea inlet in Pesués. It is nurished by a 420 km^2 basin and its total height variation is around 1,500m. Being like that, the orography looks extraordinary for the construction of a hydroelectric energy generation complex.

Or, at least, that was what ACCIONA-Energía thought in 1944 when they started to build the Saltos del Nansa. This hydroelectric complex is formed by four conventional hydroelectric plants. Starting in the Cohilla reservoir, with a capacity of $2.5Hm^3$, the Peña de Bejo plant can be found, with an installed power of 19MW. After this, connected by the Rozadío channel, the next two plants are located. Its names are the Rozadío plant and the Celís plant, which have an installed power of 12.6 MW and 6.3 MW, respectively. Finally, the Palombera reservoir can be found, which diverts part of its water to the channel connecting with the Palomebra plant. It has an installed power of 10 MW. The main hydroelectric plant of this complex is Peña de Bejo, because it controls the water that gets to the rest of the system.



The study was carried out using two main engineering programs: Arc-GIS and Hec-HMS. With these programs, and the physical and topographic characteristics of the basin obtained from different sources, we were able to create a hydrologic model which could simulate the behaviour of the Nansa basin.

Firstly, the topographic model was designed with Arc-GIS. The data obtained from that model was then exported to Hec-HMS to finish modelling the basin by including the physical data. Apart from that, we required the data related with the observed precipitation and temperatures in the area during the last years, which was downloaded from AEMET. In this way, the program had all the information needed to generate the flows through the Nansa river.

To make sure that the model was running in accordance to the reality in our basin, we downloaded data related to the flows of the river during the last years from the Cohilla and Palombera data gatherers. These values were compared with the ones calculated by the model in the period 1998-2004, which made possible to calibrate the model so that it could predict the flows of the river with the least amount of errors possible. After that, the values calculated by the model were again compared with the ones downloaded but this time in a different period. In this way, we could assure that the model was able to predict correctly the river flow in any time window. This time the chosen period was 1989-1995. It was verified that the model worked correctly.

Once the basin model was finished, the prediction of the climate change variations was carried out during the period 2045-2065. We used the database called CORDEX to download the series of the predictions of precipitation and temperature values during the time period 1950-2100. This predictions were generated in the worst designed future scenario, called RCP8.5. 19 different predictions were available based on several climatological models plus the media of all of them, called ensemble. It was decided to make use of the two worst future scenarios for our basin, a scenario with average values, and the ensemble, which is normally used by default.

Thanks to these series, the precipitation and temperature variations that the basin was going to suffer in the next decades were calculated, and the climate change predictions in the period 2045-2065 were generated.

With all this information and the model previously created, the predictions of the variation of the river Nansa flow were generated.

Firstly, we observed that the predictions made by the ensemble show very efficiently the average of the designed prediction models. The errors with respect to the rest of the predictions didn't exceed $2m^3/s$, which applying to those values would suppose a $\pm 10\%$ variation. Taking into account that we are working with predictions looking 50 years ahead, it can be a completely acceptable error.

Finally, comparing the results obtained in the reference period and in the future period through the ensemble, we could observe that the tendency of the river flow is that of reducing year by year, except from punctual events, where the river flow would have abnormally high values. During the studied period, 2045-2065, the reduction of flow would be around 12.5% with respect to the actual values.

This would lead to a quite considerable decrease of the hydroelectric energy generation in the Saltos del Nansa, approximately a 30% decrease according to a study carried out after this one. Moreover, this decrease would mostly affect during the periods when the hydroelectric plant is working at its maximum efficiency. This is important to consider, because the moments in which the plant is working at the highest efficiency is the part of the day when the energy demand is the highest, and so when its selling price is also the highest. So that 12.5% decrease of flow would directly affect to the decrease of the most expensive energy generation, multiplying the loses it would carry.

Because of all that I have said before, it is possible that in the near future the hydroelectric power complex would need a modification either in the using laws of the plants or in the complex structure, so that they could optimize the basin exploitation.

This conclusion coincides with the predictions made by several studies about the effects of climate change in Spain. So the problem is not just a problem in a basin located in Cantabria, but it is a problem that will probably affect a big part of the hydroelectric plants of this type all over Spain. Because of that, it would be advisable to start thinking about ways to optimize the hydroelectric plants in some way, in case we want to continue using them in an efficient and economic way.



Agradecimientos a Jesus Casado por ayudarme en todo lo posible para mejorar el TFG.



Índice

1 INTRODUCCIÓN	8
2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	10
2.1 Ubicación geográfica	10
2.2 Relieve	11
2.2.1 La cuenca	11
2.2.2 El río	11
2.3 Usos de suelo y ocupación	
2.4 Aprovechamiento	13
2.5 Climatología	14
2.5.1 Clima en la Península	14
2.5.2 Clima en la cuenca del Nansa	
	10
21 Dates diméticas	18
<u>D.1 Datos cimiaticos</u>	
R 1 2 Prediggión de gambie elimítica	10
2.2 Dates de afere	
2.2 Dates entegráficos	
3.3 Datos cartografica	
2.2.2. Propiedades del cuelo	
$b.3.3 USOS \ def \ Sueloi \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ $	
4 METODOLOGÍA	26
$4.1 \text{Clima} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	
4.1.1 Elección de estaciones meteorológicas	
4.1.2 Elección de los escenarios de futuro	
4.1.3 Cálculo de las series de futuro	
4.2 Hidrografía	
4.3 Modelado hidrológico	31
4.3.1 Modelo de la cuenca	
4.3.2 Modelo meteorológico	
$4.3.3 \text{Control} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	
4.3.4 Calibración y validación	



$5 \mathrm{R}$	RESULTADOS	39
5.	.1 Calibración del modelo hidrológico	39
	5.1.1 Valores de las subcuencas	39
	5.1.2 Calibración con la estación de aforo de la Cohilla	40
	5.1.3 Calibración con el aforo de Palomberal	41
	5.1.4 Análisis de sensibilidad	43
	5.1.5 Validación de la Cohilla	43
5.	.2 Selección de series de futuro	45
5.	.3 Visualización de caudales	47
	5.3.1 Resultados en la Cohilla	47
	5.3.2 Resultados en Palombera	55
5.	.4 Análisis estadístico	60
<u>6 C</u>	CONCLUSIONES	63
AT	ablas de valores de las subcuencas de calibración	66
ВТ	ablas de deltas de las estaciones meteorológicas	68
C Se	eries de caudales	71
DΗ	Iidrogramas y distribuciones gamma	76



1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático, como bien es sabido por la población mundial a día de hoy, es el esperado resultado del aumento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero resultantes de las actividades humanas. Muchos gases de efecto invernadero, incluido el dióxido de carbono, CO_2 , ocurren naturalmente y mantienen la tierra caliente encerrando parte del calor terrestre en la atmósfera. Sin embargo, desde la primera Revolución Industrial a finales del siglo XVIII, se han acumulado cada vez más y más cantidades desorbitadas de CO_2 en la atmósfera. Este fenómeno se ha dado en particular a causa del transporte y la quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad. Se cree que otros gases, como los CFC (clorofluorocarbonos, componente base de los aerosoles) empeoran el proceso. Este aumento de concentraciones de gases dañinos causan un aumento significativo en la temperatura terrestre a niveles mayores que en cualquier otra época del pasado. Según el consenso científico actual, en caso de continuar con las tasas actuales de crecimiento económico y poblacional, las temperaturas medias globales aumentarán en 3°C para final de siglo. Acompañado de esto estaría un aumento en los niveles de precipitación global de un 15%.

España es uno de los países a nivel mundial más vulnerable a este hecho. Según Greenpeace, España se encuentra en pleno proceso de cambio climático, con lo que se prevé que en los próximos años aumenten considerablemente los fenómenos meteorológicos extremos. Partiendo de los datos empíricos observados, Greenpeace augura un aumento de olas de calor, lluvias torrenciales e inundaciones en pueblos y ciudades del Mediterráneo, así como una mayor presencia de huracanes en la península Ibérica, un fenómeno atípico hasta la fecha. A ello habrá que sumar la subida del nivel del mar, la intensificación de los incendios y la desertificación.

Hay varios datos proporcionados por Greenpeace que son dignos de mención. Entre ellos, que en las últimas décadas las temperaturas medias en España se han incrementado un 50 % más que la media del hemisferio Norte y el triple que la media global, aproximadamente 1.5° C. A día de hoy el 20 % de la Península se puede considerar desierto, y hay un gran riesgo de llegar al 75 % a finales de siglo. Siete de las diez cuencas hidrográficas con mayor sequía crónica de Europa se encuentran en España y se han perdido más del 80 % de los glaciares pirenaicos. De hecho, para 2050 se podrían perder totalmente de forma irreparable. El calentamiento del océano es el factor principal del aumento de los huracanes, siendo en 2017 la primera vez que un huracán rozó las costas de Europa. Y muchas consecuencias más que se quedan fuera del marco meteorológico.

Para parar esto, o atenuarlo por lo pronto, se han ido estableciendo acuerdos internacionales entre países para regular las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero) y optimizar la producción y el consumo de la energía. El más actual es el Acuerdo de París, que se pondrá en marcha en 2020, cuando finalice la vigencia del Protocolo de Kioto. Este acuerdo fue negociado durante la XXI Conferencia sobre Cambio Climático (COP 21) por los 195 países miembros de las Naciones Unidas cuyo objetivo principal fue reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza".

Según estas conferencias, uno de los agravantes de este cambio climático proviene de los sistemas actuales de generación de energía, ligado al abrupto aumento de su demanda a nivel mundial. Por ello, muchas políticas apuestan por el desarrollo de energías renovables, entre ellas la energía hidroeléctrica.

La energía hidroeléctrica se presenta muy atractiva ya que no necesita ningún combustible para su funcionamiento y las infraestructuras tienen una vida útil muy larga. Además, tiene una eficiencia de un 70%-80%, mientras que otro tipo de centrales, como pueden ser las térmicas, no superan el 40%. Sin embargo, estas mismas grandes infraestructuras pueden suponer el desplazamiento de poblaciones y un gran impacto en la ecología de la zona. A causa de esto, mucha gente se presenta reacia al desarrollo de esta fuente de energía. Aún así, muchos gobiernos creen que la energía hidroeléctrica es crucial para el desarrollo de la economía.



Sin embargo, la efectividad a largo plazo de esta fuente de energía esta cogida con pinzas a causa del cambio climático. Aunque muchos piensen que un aumento de las precipitaciones beneficiarán la producción de este sistema, al ser este aumento solamente en forma de lluvias torrenciales puntuales, no hace más que dificultar la planificación y el correcto funcionamiento de las centrales.

Además, si bien es cierto que las épocas lluviosas podrían ser aún más húmedas, las épocas calurosas de sequía también aumentarían. Esto supondría que en la época del año en la cual menos caudal tienen los ríos, habría mayor demanda de energía (para aparatos refrigerantes de todo tipo principalmente). Esto podría suponer un problema por la imposibilidad de generar energía mediante este sistema.

Este efecto de las sequías se vería aumentado por la evapotranspiración causada por el gran aumento de las temperaturas. Ya que causaría que durante el resto del año la escorrentía de los ríos y por consiguiente la producción de estas centrales disminuyera considerablemente.

Un aumento de la incertidumbre a la hora de generar predicciones meteorológicas podría causar efectos negativos, al no poder organizar con antelación la explotación del caudal disponible y causar inundaciones o sequías involuntarias. India es un país que ya está sufriendo las consecuencias del cambio climático en sus centrales hidroeléctricas. Por poner datos concretos, en el año 2006, India palió tal cantidad de lluvias en época de sequía que estuvieron obligados a abrir las compuertas de varias presas de urgencia, produciendo inundaciones en varias poblaciones cercanas con las consecuentes pérdidas humanas y materiales. En contraposición a esto, en el periodo de 2008-2009, la generación de energía hidroeléctrica en India se redujo en un 8.42% a causa de una falta de precipitaciones en la época de lluvias, originando muchos problemas a la hora de abastecer a toda la población con electricidad.

No hay que olvidar las centrales colocadas en ríos que se alimentan del agua de glaciares. Estas centrales, no hay ninguna duda al respecto, sufrirán grandes dificultades en unos años al derretirse casi por completo los glaciares de los que se nutren.

Pero los problemas no son solo provenientes del cambio climático.

En primer lugar, en caso de que se tomara la energía hidroeléctrica como una de las fuentes base de la generación de energía, teniendo en cuenta que la demanda de energía está en continuo aumento, habría que construir muchas infraestructuras, lo que derivaría a una gran emisión de contaminantes durante ese periodo, a parte de una gran inversión de capital del cual no todos los países disponen.

Hay que tener en cuenta también que las leyes de protección medioambiental actuales dificultan enormemente la construcción de nuevas grandes presas por los impactos que generan. Además, países como Alemania o España tienen instalada ya una potencia hidroeléctrica próxima a su potencial máximo, en base a su orografía y regímenes de caudal.

Con todo esto, varios estudios concluyen que, a causa de las variaciones inducidas por el futuro cambio climático, la producción global de las centrales hidroeléctricas se reducirá entorno al 20 % en los próximos años, dependiendo este porcentaje de la localización global de la central en cuestión.

Por todo esto, se ha decidido hacer un estudio de cómo y en qué medida afectará el cambio climático a las centrales hidroeléctricas españolas, más concretamente al sistema de los Saltos del Nansa ubicado, como su propio nombre indica, en la cuenca del Nansa, Cantabria.



2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación geográfica

Nuestro área de estudio se encuentra en la cuenca hidrográfica del Nansa, ubicada prácticamente en su totalidad en la zona occidental de la Comunidad Autónoma de Cantabria, a excepción de una pequeña porción al noroeste que forma parte del Principado de Asturias, como se puede ver en las figuras [] y [3]. A lo largo de su recorrido, el río Nansa y sus afluentes cruzan cinco municipios (Polaciones, Tudanca, Rionansa, Lamasón y Herrerías), desembocando en el Val de San Vicente, lugar donde se encuentra ubicada la ría de Tina Menor. En su camino al mar se encuentra con poblaciones como Tudanca, Cosío, Puentenansa y Pesués. Estos son pueblos pequeños, lo que contribuye a la conservación del paisaje que rodea al río.



Figura 1: Norte de España con la cuenca coloreada 7



Figura 2: Mapa de Cantabria con la cuenca delineada 7





Figura 3: Mapa de Cantabria con la cuenca delineada 19

2.2 Relieve

2.2.1 La cuenca

La cuenca está delimitada por las divisorias de las cuencas de los ríos Saja, Escudo, Deva y Gandarillas; además de por las Sierras de Peña Labra y de Isar, el Cueto de la Concilla por el sur; y el Cantábrico por el norte, cubriendo en total un área de 429.5 km^2 .

La altitud en la cuenca varía de 2170m en la zona del nacimiento del río Nansa hasta llegar prácticamente al nivel del mar. Estas variaciones dan lugar a la explotación hidroeléctrica en la zona. Los rangos de pendientes son elevadas, ya que el 85 % del territorio supera el 20 % de pendiente, y más de la mitad de esta inclinación es superior al 40 %, mientras que solo un 5 % tiene menos de un 10 % de desnivel.

A continuación en la figura 4 se puede ver un mapa con el relieve de la cuenca de estudio.

2.2.2 El río

El río Nansa, río principal de nuestro área de estudio, es un curso fluvial que desde su nacimiento, al unirse pequeños arroyos que surgen en las Sierras de Peña Labra y Peña Sagra, hasta su desembocadura, en el Mar Cantábrico, a través de la Ría de Tina Menor, en Pesués, recorre 53 Km. En tan corto recorrido ha de salvar un desnivel de algo más de 1.500 metros desde las cumbres de las montañas hasta su final en el mar. Sus principales afluentes son el Río Lamasón o Tanea, de 11,7 Km de longitud, y Vendul, de 8,2 Km.

El río discurre en su nacimiento por espesos bosques sobre altas pendientes sin generar vegas, hasta llegar al embalse de La Cohilla, a la altura de Puente Pumar, donde se desvía parte del agua para usar en la primera central del sistema hidroeléctrico. Este valle escarpado es el Valle de Tudanca, cuyas verticales paredes conducen el río para salir a una vega amplia, entre los pueblos de La Lastra y



Figura 5: Plano del río Nansa 19



2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



Figura 4: Relieve de la cuenca

Tudanca. Allí se vuelve a represar en el contraembalse de La Lastra, donde se encuentra la salida de la central de Peña de Bejo, central considerada a pie de presa de la Cohilla. Sigue el curso pasando por Cosío, Puentenansa y Celis, donde finalmente se encuentra con el embalse de Palombera. Aquí, parte del agua se vuelve a desviar para ser usada en la central de Palombera, punto final del estudio. El río continúa hasta la Ría de Tina Menor, donde desemboca en el mar Cantábrico.

Se han facilitado esquemas del río tanto en planta como en perfil mediante las figuras 5 y 6 para poder acerse una idea de la topografía del mismo.



Figura 6: Perfil del río Nansa 19

2.3 Usos de suelo y ocupación

A causa de la complicada orografía de la zona, la práctica de labranza y ganadería, así como la mayor parte del turismo y la hostelería, se ve reducida mayormente a la zona más baja de la cuenca, en Val de San Vicente. Es por ello que los núcleos poblacionales más grandes se encuentran en la costa y en los puntos de intersección de varias carreteras, siendo el núcleo más grande el de Pesués, con 350



habitantes.

Siguiendo por la misma línea, se puede concluir que los usos de suelo principales en la cuenca son forestal arbolado y desarbolado, predominando los matorrales con machas de bosques autóctonos. En la zona más baja se podrán encontrar las zonas de cultivo y pradera. Esto hace que el uso del agua del río Nansa se centre prácticamente en toda su totalidad a la producción de energía.

El mapa que se encuentra a continuación, figura 7 sigue la nomenclatura del Corine Land Cover a nivel 3. Siendo los números empezados en 2 referidos a zonas agrícolas, en 3 a zonas forestales, en 4 a zonas húmedas y en 5 a superficies de agua.



Figura 7: Mapa de los usos del suelo

2.4 Aprovechamiento

En 1941 la sociedad Saltos del Nansa S.A. fue fundada para abastecer de energía a la industria local mediante el sistema de aprovechamientos integral ubicado en el río que le da el nombre al sistema y a la sociedad, el río Nansa. Dicho sistema fue diseñado y construido por ACCIONA Energía, con el objetivo de hacer uso de todo el potencial hidroeléctrico de la cuenca. El aprovechamiento consta de cuatro centrales ubicadas en Peña de Bejo, aprovechando la presa del embalse de La Cohilla, Rozadío, que aprovecha las aguas del contraembalse de la Lastra, que recoge las aguas que libera la anterior central, Celis, que produce electricidad mediante el azud de Celis, y Herrerías, que aprovecha las aguas del embalse de Palombera. La generación se realiza por derivación, es decir, se lleva el agua mediante una tubería hasta las instalaciones, para ser devueltas al cauce mediante un desagüe. La más importante es la primera, Peña de Bejo, que, aun estando a 3km de la presa de la Cohilla, por sus características está considerada central a pie de la presa (presa de bóveda que fue la más alta de España y la tercera de Europa cuando se construyó). A causa de los embalses, esta es la cuenca de Cantabria con el régimen hidrológico más alterado que hay. La potencia total es de 48.7MW, siendo la central de Peña de Bejo la generadora de 28.8MW.







Figura 8: Perfil longitudinal de los Saltos del Nansa 7

2.5 Climatología

Para poder realizar el estudio de los efectos del cambio climático es imprescindible tener una visión a escala global del clima actual.

2.5.1 Clima en la Península

El clima en España es muy diverso. Y la geografía tiene aquí, sin lugar a dudas, su importancia. La tiene por la mera ubicación de España en el conjunto del planeta, ya que se encuentra en una zona templada dentro del mismo. Por ello, al mezclarse el aire cálido de zonas subtropicales con el aire frío polar, no cuenta con características climáticas homogéneas.

La mayor o menor influencia que ejerce el mar en el clima explica que se produzcan acusados contrastes. Estas diferencias son tanto pluviométricas como, sobre todo, térmicas, como bien se puede observar en la figura [9]. Así, por ejemplo, las zonas del interior peninsular tienen una mayor amplitud térmica. Cuentan con inviernos más fríos y veranos más calurosos.



Figura 9: Mapas de precipitaciones y temperaturas medias en España 5

Además, el relieve también modifica localmente las características climáticas. De este modo, en las zonas de montaña se produce un descenso de las temperaturas cuando se incrementa la altitud. Su



distribución, al igual que la precipitación, es muy irregular, y también está estrechamente ligada a la configuración del relieve. La isoterma de 10° C parece delimitar los sistemas montañosos de la mitad norte peninsular: Cordillera Cantábrica, Pirineos y Sistemas Ibérico y Central.

Si atendemos a las precipitaciones, se aprecia un descenso del volumen total de lluvias desde la costa atlántica hacia el interior y el Mediterráneo. La estacionalidad de las precipitaciones está determinada por la dinámica atmosférica. De este modo, en la cornisa cantábrica las lluvias tienen su máximo en invierno, aunque también pueden ser elevadas en primavera y otoño. En cambio, en las áreas próximas al Mediterráneo, los máximos se producen generalmente en otoño. Hacia el interior, en zonas alejadas de la influencia marina, los máximos se sitúan claramente en primavera e invierno.

Así, las precipitaciones más importantes tienen lugar en las laderas de los sistemas montañosos situadas a barlovento de los vientos húmedos. La humedad relativa media anual oscila entre el 75 % y el 80 % en las zonas costeras atlántica y cantábrica y en torno al 70 % en la mediterránea. La humedad media anual decrece hacia el interior, hasta tomar valores en torno al 60 % en la Submeseta Sur.

La evaporación depende de un conjunto de factores, de los cuales los más importantes son la disponibilidad de agua del terreno, la humedad, la insolación y la velocidad del viento. La velocidad de evaporación aumenta con valores grandes de insolación, aire seco, fuerte velocidad del viento y terreno descubierto. Por ello, los valores mínimos se registran en la zona norte peninsular (700 mm) y van aumentando hacia el sur y este, como se puede observar en la figura 10



Figura 10: Evapotranspiración potenciales medias en España 5

Así las cosas, los tipos de climas de España se han catalogado tradicionalmente en cuatro grandes grupos: oceánico, mediterráneo (con algunas variaciones), subtropical y de montaña. Esta clasificación climática es la de Köppen-Geiger, que es la más habitual. Está basada únicamente en datos de precipitación y temperatura. Cada uno de estos tipos de clima tiene su influencia concreta en un área geográfica claramente delimitada. En la figura II se puede ver la distribución de estos climas en la península.





Figura 11: Distribución de tipos de climas en España 5

Estos climas sufren fuertes variaciones en periodos de temporales. Los tipos de tiempo que afectan a la península son: anticiclón de invierno, temporal de frío y nieve, baja térmica estival, tiempo del noroeste, tiempo del nordeste y tiempo del sudoeste. Estos temporales se originan a causa de cambios de presión provenientes de anticiclones y la presencia de frentes cálidos o fríos, afectando en las características del tiempo, la temperatura y las precipitaciones en todo el país.

2.5.2 Clima en la cuenca del Nansa

En el caso de nuestro área de estudio, se encuentra en la zona occidental de Cantabria, lo que lo sitúa dentro de la fachada costera occidental europea, zona en la que predomina el clima oceánico atlántico. Por lo tanto, el régimen de temperaturas se caracteriza por ser predominantemente suave, templado y con escasa oscilación térmica estacional. Con una media anual de 11-16 °C, sin superar los 24°C ni bajar de los 6°C en las estaciones de verano e invierno, respectivamente.

Según los datos de AEMET, las precipitaciones son muy abundantes y uniformemente repartidas en la zona, destacando los meses de enero, abril, octubre y noviembre, superando la cantidad anual de 1.215 mm, con un mínimo estival en julio, aunque no existe ningún periodo de aridez. En las figuras [12] y [13] se muestra esta tendencia. Esto ocurre a causa del clima que pasa a ser un mediterráneo continentalizado, aunque suavizado en el verano por la cercanía de la Cordillera Cantábrica. En esta estación también se aprecia un descenso de las precipitaciones alcanzando un máximo de tan solo 556 mm. La distribución de las precipitaciones a lo largo del año en estas zonas es bastante regular. Son zonas que se encuentran bajo la acción continua de las borrascas del frente polar. Los días de lluvia en estas zonas superan los 150 al año.

Existe un incremento de la temperatura media anual desde las zonas montañosas, entre las que discurre el cauce principal, hasta las zonas más bajas del valle, así como desde las zonas de cabecera hacia el estuario de Tina Mayor. También hay una disminución de las precipitaciones medias anuales en dirección noreste. Estas son máximas en la zona más cercana a la sierra de Peña Sagra, cerca de la zona más alta de la cuenca, con precipitaciones medias anuales de 2.500 mm.



2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



Figura 12: Climograma en la estación meteorológica 1156



Figura 13: Climograma en la estación meteorológica 1159O



3 DATOS

3.1 Datos climáticos

3.1.1 Series históricas

Para la caracterización de la información meteorológica de la cuenca y la adecuada modelización de la misma se ha hecho uso de las series de datos de precipitaciones y temperaturas recogidas por las estaciones meteorológicas de la zona, propiedad de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología en España). Antes de poder aplicarlos al modelo se trataron los datos para elegir las estaciones más relevantes al caso y para rellenar series que no estuvieran totalmente completas. Teniendo en cuenta que las diferentes estaciones fueron puestas en marcha en momentos distintos, sus franjas de valores en el tiempo varían ligeramente. Esto y su localización en el mapa fueron variables que condicionaron la elección de las estaciones, proceso que se explicará más adelante. En la figura 14 se puede ver un mapa con las estaciones de la zona.



Figura 14: Estaciones meteorológicas en la zona



3.1.2 Predicción de cambio climático

Las previsiones de las precipitaciones y temperaturas futuras en la zona se hicieron modelizando una serie de escenarios futuros. Estos escenarios se obtienen del conjunto de varias comunidades alrededor del mundo generando modelos climáticos basados en variantes y herramientas distintas, dirigido por la plataforma denominada CORDEX.

El objetivo principal de esta asociación es el de crear un marco de evaluación de modelos climáticos, un marco de proyección climático y una interfaz dispuesta para el estudio de los impactos, adaptaciones y mitigaciones de los efectos del cambio climático a nivel mundial.

CORDEX está dividido en 14 regiones por todo el mundo. Euro-CORDEX es la rama de esta iniciativa ubicada en Europa, señalada en la figura 15. Este esfuerzo voluntario está guiado por el entusiasmo de muchos de poder proporcionar una base de datos de predicción climática fiable para poder adaptarse a los efectos de estas predicciones y poder diseñar estrategias para mitigarlos lo máximo posible. Cabe destacar que el Instituto de Física de la Universidad de Cantabria es uno de los muchos colaboradores de este proyecto.

La última versión de Euro-CORDEX está ahora trabajando en mejorar la resolución de las predicciones de 50 km (0.44 degree) a 12 km (0.11 degree). Para ello, se van mejorando los modelos a utilizar. El último paquete de modelos es el denominado CMIP5





(Coupled Model Intercomparison Project-Phase5). Este es el último marco de comparación diseñado para mejorar las predicciones del cambio climático. Es el equivalente del AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) para modelos acoplados océano-atmósféricos de circulación general.

El objetivo del Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP) es "comprender mejor los cambios climáticos pasados, presentes y futuros que surgen de la variabilidad natural, no forzada o en respuesta a los cambios en el forzamiento radiativo en un contexto de múltiples modelos. Esta comprensión incluye evaluaciones del desempeño del modelo durante el período histórico y cuantificaciones de las causas de la propagación en proyecciones futuras".

Fue organizado en 1995 por el Grupo de Trabajo en modelos acoplados (WGCM) del Programa mundial de investigación del Clima Mundial (WCRP). Está desarrollado en fases sucesivas adoptadas para la mejora de los modelos del clima y para informar a las agencias nacionales e internacionales acerca de posibles acciones para mitigar los efectos del cambio climático.

El primer conjunto de experimentos comunes involucró la comparación de la respuesta del modelo con unos modelos idealizados climáticos basados en un escenario pre-industrial (llamado "control run"), y en un escenario definido por un incremento del 1 % por año en la concentración de CO_2 . Hasta 30 modelos acoplados de clima proporcionaron resultados para dichas simulaciones.

Dentro de los proyectos principales del CMIP, se incorporaron una serie de esfuerzos de intercomparación de modelos más pequeños, denominados experimentos coordinados del CMIP, diseñados para comprender aspectos específicos de la respuesta del modelo. Un experimento investigó la respuesta de Circulación de Vuelta Meridional del Atlántico (AMOC) o circulación termohalina (THC) a los cambios en los flujos superficiales de calor y agua. Otro Experimento Coordinado documentó la respuesta del modelo al flujo de agua superficial externa en latitudes altas del Atlántico Norte, los llamados "experimentos de mangueras de agua". Se han escrito varios artículos utilizando estos conjuntos de datos. Todo este trabajo se recopila y difunde desde el CMIP Panel, comité dirigido por el WGCM.



En fases posteriores del proyecto se han incluido escenarios más realistas en las simulaciones históricas de clima, simulaciones paleo-climáticas y escenarios de clima futuro.

La fase CMIP5 es la fase más reciente del proyecto CMIP que ha sido completada entre 2010 y 2014. Esta fase emergió de la necesidad de mejorar ciertas carencias que se encontraron en la fase anterior. Desde el punto de vista técnico, CMIP5 incluyó más metadatos que describían las simulaciones de los diferentes modelos. El proyecto creó un esquema exhaustivo describiendo tanto las partes científica y técnica, como los aspectos numéricos de los resultados. Los objetivos principales eran dividir las simulaciones en dos periodos, a plazo medio y a largo plazo, y añadir varios tipos de experimentos para mejorar los resultados. La razón de dividir las simulaciones en dos rangos distintos es porque, si bien las de a largo plazo son íntegramente predicciones obtenidas por los modelos, las simulaciones a plazo medio comienzan con datos observados, y a partir de ellos predicen el resto del periodo, obteniendo así mejores resultados.

Los nuevos experimentos añadidos fueron de varios tipos. En algunos de los experimentos añadidos se usaron simuladores de satélites para calibrar la creación de nubes que predecían el modelo denominado CFMIP (Cloud Forcing Model Intercomparison PRoject). También se usaron nuevos modelos experimentales "más idealizadosçon objeto de entender mejor el modo en que los mecanismos físicos afectan al cambio climático. Otros experimentos añadidos mejoraron la sensibilidad de estudio de las emisiones de CO_2 a la atmósfera, y otros se centraron en crear simulaciones de pasado para poder dar mayor credibilidad a los resultados que se obtienen para futuro, denominado PMIP (Paleo-climate Modelling Intercomparison Project). Y finalmente experimentos que ampliaron el espectro vertical en el que se modelaba el tiempo, llegando a capas más altas de la estratosfera. A parte de todo esto, se creó un protocolo llamado Metafor para controlar la calidad de los modelos experimentales que se obtienen en esta fase.

Ahora mismo está en marcha la planificación de una sexta fase que empezó en 2013, poco antes de la finalización de la fase anterior. La visión general del diseño y la organización de CMIP6 fue publicada durante el 2016. En 2018 fueron aprobados 23 proyectos de intercomparación de modelos implicando 33 grupos de investigación de 16 países. También se ha definido un número básico de experimentos comunes para todos los modelos.

Estos últimos años se han estado creando diversas plataformas que muestran los resultados de los modelos climáticos que se van validando. En las figuras 16, 17, 18 y 19 se pueden observar las predicciones de 19 modelos climáticos, y la respectiva media calculada, para la Comunidad Autónoma de Cantabria. El significado de RCP8.5 se explicará en los siguientes párrafos.



Escenarios AdapteCCa - Precipitación - Datos en rejilla (media) - RCP 8.5 - Invierno - Cantabria

Figura 16: Predicción de la precipitación en invierno en Cantabria para el escenario RCP8.5 según diversos modelos climáticos [15]





Figura 17: Predicción de la precipitación en verano en Cantabria para el escenario RCP8.5 según diversos modelos climáticos 15



Figura 18: Predicción de la temperatura máxima en invierno en Cantabria para el escenario RCP8.5 según diversos modelos climáticos 15



Figura 19: Predicción de la temperatura máxima en verano en Cantabria para el escenario RCP8.5 según diversos modelos climáticos 15

A la hora de calcular las series de futuro para este estudio, se descargaron 19 predicciones climáticas basadas en distintos modelos climáticos de Euro-CORDEX, tanto de precipitaciones como de temperaturas de las estaciones meteorológicas en los alrededores de la cuenca. Se eligieron dos periodos temporales, 1985-2005 y 2045-2065. El periodo 2045-2065 se considera a medio plazo. Siendo el periodo de largo plazo el comprendido entre 2080-2100.

Es importante explicar que, cuando se puso en marcha este proyecto, se diseñaron varios posibles escenarios que podrían darse en el futuro dependiendo de como fuera evolucionando el planeta y las



3. DATOS

emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Se crearon cuatro posibilidades o Representative Concentration Pathways: RCP8.5, RCP6, RCP4.5 y RCP2.6; siendo RCP8.5 el más pesimista de los casos con la mayor cantidad de emisiones y RCP2.6 el más optimista. Estos escenarios se diseñaron hasta 2100 y se basan en suposiciones socioeconómicos. Así, son el resultado de una combinación de economía, tecnología, demografía, política e instituciones futuras.

El escenario RCP2.6 (o RCP3) representa los estudios de mitigación del cambio climático, los cuales tienen como objetivo reducir el aumento de la temperatura media terrestre a 2°C. En los principios del proyecto, este escenario era técnicamente posible, asumiendo la colaboración de todas las regiones en la lucha contra el cambio climático. La acumulación de emisiones de gases de efecto invernadero debería reducirse en un 70% gracias a un cambio en el uso de la energía y la emisión de gases a parte del CO_2 . Para ello serían cruciales el desarrollo de las bioenergías y la reforestación de bosques. Se asume que a partir de políticas de lucha contra el cambio climático se podría crear una inercia social que facilitaría a la sociedad mundial a cumplir las reducciones de emisiones pactadas. De todas formas, a día de hoy este escenario se da prácticamente por imposible, dada la situación global actual.



El escenario RCP4.5 predice que, como la atmósfera impedirá que más riadiación salga de la Tierra, la radiación incidente en la superficie de la Tierra será de 4.5 W/m^2 superior a la actual en 2100. Fue simulado con el GCAM (Global Change Assessment

Figura 20: Desarrollo de los cuatro RCPs hasta 2100 1

Model). Esta predicción incluye, a largo plazo, predicciones de emisiones de gases de efecto invernadero, vida de especies y uso de terrenos en un ambiente de economía global. Para que se dieran las condiciones necesarias para que se cumpliera este pronóstico sería necesario un cambio en el uso de energía, a nuevos tipos de tecnología de la energía que emita menos gases contaminantes y desarrollo de tecnología que capture y almacene geológicamente el carbono. A parte de esto, la extensión mundial de los bosques debería aumentar. A día de hoy este escenario también es bastante difícil que se cumpla.

En el escenario RCP6 la predicción del aumento de radiación es de 6 W/m^2 , alcanzando su pico en 2060 y reduciéndose hasta 2100. Este escenario se estima suponiendo un mercado global de permisos respecto a emisiones a la atmósfera.

Finalmente, respecto al escenario RCP8.5, asume una alta subida en la población mundial de lenta subida de la renta, combinada con una mejora en tecnología y sistemas energéticos bastante leve. Esto derivaría en unos años a una gran demanda de energía mundial con su consecuente aumento en la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera a causa de la falta de políticas de cambio climático. Este escenario se basa en proyecciones de aire contaminado y en el uso del terreno, siendo estos los más críticos condicionando los futuros años. Desgraciadamente, este escenario es el que más probabilidades tiene de darse actualmente.

En la figura 21 se puede ver una tabla con un resumen de lo explicado arriba.

	FR	Tendencia del FR	[CO ₂] en 2100
RCP2.6	2,6 W/m ²	decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4,5 W/m ²	estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6,0 W/m ²	creciente	670 ppm
RCP8.5	8,5 W/m ²	creciente	936 ppm

Figura 21: Resumen de los cuatro RCP's 1



En la figura 22 podemos ver un ejemplo de la predicción de emisión de CH_4 mundial producido por centrales eléctricas para 2060 en los escenarios de RCP2.6 a RCP8.5.



Figura 22: Emisiones de CH_4 en 2100 1

En el caso de nuestro estudio, y como es de uso general ya, se usaron las predicciones en el peor de los escenarios, es decir, el RCP8.5. Ya que los otros son considerados menos conservadores.

3.2 Datos de aforo

Las series de caudales que se obtuvieron para calibrar el modelo creado en Hec-HMS fueron proporcionados por la Red Oficial de Estaciones de Aforo del Estado. A continuación se nombran las principales características de las dos estaciones disponibles y de su localización.

Estación de aforo	Código ROEA	Código SAIH	UTM X	UTM Y	Huso	Datum	Propietario
La Cohilla	1253	E052	387.070	4.776.526	30	ETRS89	Particular
Palombera	1254	E053	381.852	4.794.664	30	ETRS89	Particular

Cuadro 1: Estaciones de aforo, características principales





Figura 23: Estaciones de aforo, siendo la situada en la parte superior de la figura la de Palombera y la inferior la de la Cohilla

3.3 Datos cartográficos

3.3.1 Topografía

Se descargaron las tres hojas de MDT25 que formaban el área de estudio proporcionadas por el CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica) dirigido por el Ministerio de Fomento Español. 25m de resolución fue la precisión seleccionada, ya que una mayor precisión fue considerada innecesaria en este caso.

3.3.2 Propiedades del suelo

Las características de la superficie de la cuenca y sus capas inferiores fueron obtenidos de la base de datos EU-SoilHydroGrids (base europea de características de suelo). Esta base de datos fue creada en 2017 y consiste en una serie de mapas de 6 características básicas del tipo de suelo: humedad de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez, conductividad hidráulica saturada, y los parámetros de la ecuación de Mualem-van Genuchten para la humedad de suelo y la conductividad no saturada. Estos mapas se repiten en 7 profundidades de suelo, distribuidos a lo largo de 2m de profundidad por debajo de la superficie terrestre, con una resolución superficial de 250m.

3.3.3 Usos del suelo

Para obtener los datos sobre los usos del suelo, se usó la base de datos CLC (CORINE Land Cover). El objetivo principal de este proyecto, realizado conforme a la metodología establecida por AEMA (Agencia Eruopea de Medio Ambiente), es la captura de datos de tipo numérico y geográfico para la creación de una base de datos a escala 1:100000 sobre la cobertura/uso del territorio de todo Europa, y la permanente actualización de dicha base. Esta base de datos se creó a partir de la fotointerpretación



de imágenes satélite pancromáticas y multiespectrales SPOT5 con 2.5m de resolución. En el caso de nuestra cuenca, se podía ver en la figura $7 \over 2$



4 METODOLOGÍA

En este apartado se explica la metodología seguida para analizar la variación de caudales a causa del cambio climático y sus consecuencias. El estudio comienza modelando la topografía de la cuenca en ArcGIS, para luego generar el modelo hidrológico en HecHMS. Este modelo se calibra con los datos recopilados de las estaciones de aforo de avenidas pasadas. Una vez comprobado la validez del modelo, se usa para predecir las avenidas futuras en los diferentes escenarios. Finalmente, se comparan los caudales predichos con el modelo Hec-HMS con los caudales actuales de las estaciones de aforo, y se cuantifican estadísticamente las variaciones entre ambos periodos.

En el figura 24, se han dibujado en verde los recuadros que representan las entradas de datos en el estudio.



Figura 24: Esquema del procedimiento seguido





4.1 Clima

4.1.1 Elección de estaciones meteorológicas

El primer paso a realizar fue elegir las estaciones meteorológicas a utilizar de todo el listado de estaciones de la zona. Para ello, se aplicó el método de los polígonos de Thiessen. Este método se basa en trazar mediatrices en planta entre los puntos de las distintas estaciones, creando una malla de polígonos con las intersecciones entre ellas. Combinándolo con las áreas de las subcuencas, se puede obtener el porcentaje de esos polígonos que se encuentran dentro de cada subcuenca, y por tanto el porcentaje en que los datos de la estación correspondiente a ese polígono afectan a cada subcuenca.

Siguiendo este funcionamiento, primeramente se creó la malla Thiessen como se puede ver en la figura 25. De esta malla se obtuvo la lista de estaciones meteorológicas a considerar, cuyas características se exponen en el cuadro 2.



Figura 25: Malla de polígonos Thiessen

ID	Indicativo	Nombre	Altitud	Coordenada X	Coordenada Y	Datum
1	1136A	Valle de Cabuérniga(G.C.)	260	394496	4786931	ETRS89
2	1159O	Uznayo	905	385670	4771645	ETRS89
3	1160E	Polaciones (La Laguna)	790	385732	4775343	ETRS89
4	1160I	Embalse de la Cohilla	785	386650	4776260	ETRS89
5	1161I	Rozadio	210	387494	4786422	ETRS89
6	1165E	Camijanes	210	387494	4786422	ETRS89
7	1172U	Valdeprado (Pesaguero)	115	379353	4798293	ETRS89
8	1174I	Tama	833	376599	4770258	ETRS89

Cuadro 2: Estaciones AEMET

Una vez sabidas las estaciones relevantes, se procede a completar las series de datos observados proporcionadas por AEMET, ya que muchas de ellas tenían periodos en los que no se habían recopilado datos. Es normal encontrarse periodos de este tipo en las estaciones meteorológicas, normalmente por





razones de mantenimiento. Por ello, es necesario completar las series de datos. En este caso se aplicó el método de interpolación IDW (inverso de la distancia al cuadrado). Para ello, se tuvo en cuenta en cada caso los datos de las cuatro estaciones más cercanas de las que se disponía de datos en el día a interpolar. Se eligió una franja temporal en la cual la mayoría de estaciones aportasen información. Este periodo fue 1985-2005.

El método IDW funciona asignando pesos a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa, y sumando posteriormente los valores con sus pesos correspondientes, usando las fórmulas:

$$P_{int} = \sum (z_j P_j) \tag{1}$$

Siendo P_j el valor de la estación, en este caso de precipitación o temperatura, y z_j el peso de cada estación.

$$z_{j} = \frac{\sum_{i} \frac{z_{i}}{d_{ij}^{2}}}{\sum_{i} \frac{1}{d_{ij}^{2}}}$$
(2)

Aplicando este método a las 8 estaciones elegidas, se generaron las series de precipitaciones y temperaturas en el periodo 1985-2005. Posteriormente, se aplicaron los porcentajes obtenidos de la malla Thiessen para calcular las series de precipitaciones, P_{areal} y temperaturas, T_{areal} , para cada subcuenca de la cuenca. Las fórmulas aplicadas son las siguientes:

$$P_{areal} = \sum \frac{A_i}{A_{total} P_i} \tag{3}$$

$$T_{areal} = \sum \frac{A_i}{A_{total}T_i} \tag{4}$$

Siendo P_{areal} , T_{areal} la precipitación o temperatura areal en cada subcuenca, A_{total} el área de cada subcuenca, A_i la parte del área de cada subcuenca asignada a la estación i a través de los polígonos Thiessen y P_i , T_i la precipitación o temperatura en dicha estación i.

4.1.2 Elección de los escenarios de futuro

Como ya se ha explicado anteriormente, se descargaron 19 series de futuro, cada una generada a través de un método de predicción de cambio climático distinto.

A la hora de elegir cuales eran los métodos con las predicciones más críticas, se decidió hacer una comparación entre sus deltas (concepto que se explicará en la siguiente sección). Para ello, se calcularon los deltas anuales medios de los 19 métodos entre el periodos futuro 2045-2065 y el periodo de referencia 1985-2005. Este procedimiento se aplicó tanto para precipitaciones como para temperaturas. En la figura **??** se pueden ver los deltas calculados.

Una vez obtenidos dichos valores, se buscó el método que predijera mayor aumento de precipitación y menor temperatura (lo más cercano a la esquina superior izquierda en el gráfico), y el método que predijera mayor disminución de precipitación y mayor aumento de temperatura (esquina inferior derecha en el gráfico). Estos dos serían los métodos con predicciones más críticas con vista al futuro. Se optó por elegir un tercer método, que tendría valores medios en cuanto a variación de precipitaciones



y temperaturas. Finalmente, se calculó el "ensemble" de los 19 métodos, obteniendo así una cuarta serie.

Resumiendo, se eligieron cuatro predicciones de cambio climático para abarcar el mayor rango de posibilidades de variaciones de caudal en el futuro. Siendo estas:

- Método más extremo (menores precipitaciones y mayores temperaturas): GDL-CM3.ncml
- Método menos extremo (mayores precipitaciones y menores temperaturas): MRI-CGCM3.ncml
- Método de valores medios: MPI-ESM-MR.ncml
- Ensemble

En los resultados se muestra en la figura 43 la distribución de los deltas de los distintos modelos meteorológicos.

4.1.3 Cálculo de las series de futuro

A la hora de calcular las series de futuro se usaron las series descargadas de CORDEX. Primero, se calcularon los deltas de cambio entre los dos periodos seleccionados, 1985-2005 y 2045-2065. Estos deltas no son más que el incremento de la variable climática entre un horizonte temporal y otro. Puesto que la variación esperada del clima no es igual en todas las estaciones del año, se calcula el valor del delta para cada mes. El significado del delta varía entre precipitación y temperatura; para la precipitación representa el tanto por uno de variación de la precipitación futura respecto a la actual; y para la temperatura representa los grados centígrados de variación de la temperatura.

Aplicando posteriormente los deltas calculados a las series de los datos observados de precipitaciones y temperaturas en las diferentes estaciones, se obtienen las predicciones en el periodo futuro. Finalmente, se vuelven a aplicar los porcentajes de los polígonos Thiessen y se consiguen las series de precipitaciones y temperaturas en el periodo 2045-2065 para las diferentes subucencas.

A modo de ejemplo, tenemos la estación X con su serie observada de precipitación (P_{act}) y temperatura media $(T_{med,act})$. Del CMIP5 obtenemos la serie mensual de deltas de precipitación $(\Delta_{P,mes})$ y deltas de temperatura $(\Delta_{T,mes})$. Siendo

$$P_{fut} = P_{act} * \Delta_{P,mes} \tag{5}$$

$$T_{med,fut} = T_{med,act} + \Delta_{T,mes} \tag{6}$$

Como ejemplo, en las figuras 26 y 27 se muestran las series actual y futura (según el ensemble) de una de las estaciones, tanto para precipitaciones como para temperaturas.





Figura 26: Precipitaciones



Figura 27: Temperaturas

4.2 Hidrografía

Después de caracterizar los datos meteorológicos, se continuó modelando el terreno de la cuenca en el programa ArcGIS para poder así estudiar su comportamiento hidrológico.

Inicialmente se conectaron las hojas de MDT para crear una única superficie de estudio, y se fue modificando con diferentes herramientas de HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modelling Extension). Esta extensión de ArcGIS se utiliza para generar y exportar los datos hidrográficos necesarios para el modelo hidrológico que se empleará en Hec-HMS.

En primer lugar, se delineó la cuenca del río Nansa, modelando sus afluentes más importantes, y se eligió el punto más bajo del modelo. En este caso es el embalse de Palombera, del cual disponemos datos de caudal para poder calibrar el modelo más adelante gracias a la estación de aforo colocada en su presa.

Una vez modelado el terreno de la cuenca, se procede a dividir la cuenca en varias subcuencas, teniendo en cuenta la localización de los afluentes más importantes y el trazado del río. Finalmente se hizo una división de 8 subcuencas de similar tamaño y una última de menor tamaño en la zona más baja de la misma. Estas subcuencas se enumeraron de la parte más alta de la cuenca hasta la más



baja.

ID	Longitud (km)	Área (km^2)	Pendiente
1	38000	32,15	38,32
2	37550	47,28	$41,\!31$
3	34300	27,79	$45,\!13$
4	44450	48,22	45,78
5	42900	58,08	41,08
6	39500	36,02	39,16
7	28050	26,91	41,24
8	58600	81,16	40,93

Cuadro 3: Propiedades de las subcuencas

Finalmente, se aplicaron las herramientas necesarias para calcular los datos que requiere Hec-HMS para poder exportar el modelo hidrológico. Las principales serían el cálculo de la longitud y pendiente de los afluentes modelados, las pendientes y los centroides de las subcuencas con sus coordenadas, y el camino más largo de la escorrentía superficial en cada una de ellas.

En la figura 28 se puede observar el resultado final del modelado en ArcGIS.



Figura 28: Cuenca modelada en ArcGIS

4.3 Modelado hidrológico

Los procesos de calibración y simulación de los distintos escenarios de futuro en la cuenca hidrológica se hicieron a través del programa Hec-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System), desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers.

Este programa facilita el estudio del ciclo del agua en su transcurso por la cuenca. Calcula el hidrograma generado a partir de los datos hidrográficos (creados en ArcGIS), propiedades físicas de



la cuenca y series climáticas (precipitación y temperatura media diaria). Para ello, el programa sigue el funcionamiento explicado en la figura 29



Figura 29: Esquema del funcionamiento del programa Hec-HMS 6

A la hora de pasar por cada una de las fases, el programa emplea una serie de métodos hidrológicos y series de datos, divididos en varias secciones. Estas secciones se explican en los siguientes subapartados.

4.3.1 Modelo de la cuenca

El modelo de la cuenca está compuesto por las subcuencas ya descritas previamente, las cuales se unen a tramos del río principal a través de una serie de nudos. El modelo termina en el embalse final, que en este caso sería el embalse de Palombera.

Cada subcuenca y tramo del río principal se ha completado con datos en relación a la vegetación del lugar, la composición de la superficie, y la composición del subsuelo. El programa trata estos datos con las herramientas seleccionadas. Para el cálculo de los procesos definidos en la Figura 29 se seleccionaron los siguientes métodos.



Canopy	Simple Canopy
Surface	Simple Surface
Transform	SCS Unit Hydrograph
Baseflow	Linear Reservoir
Loss	Soil Moisture Accounting
River	Muskingum

Cuadro 4: Métodos aplicados al modelo de la cuenca en Hec-HMS

4.3.1.1 Canopy and Surface: Simple Canopy and Surface

Los valores para los métodos de vegetación y superficie fueron obtenidos directamente de las fuentes mencionadas en la sección de Datos, ya que solo hacían falta la cantidad de agua retenida inicialmente en la vegetación y en la superficie terrestre, y la cantidad máxima de agua que se podía retener en ambas capas.

4.3.1.2 Transform: SCS Unit Hydrograph

En cuanto al hidrograma unitario, solo fue necesario calcular el tiempo de concentración de las subcuencas, y con ello calcular el lag time (tiempo de retardo). Este tiempo es el transcurrido entre el centro de gravedad del hietograma de precipitación neta y el momento en el que ocurre el máximo del hidrograma de avenida. Existen varias ecuaciones para calcular el tiempo de concentración en una cuenca. En este caso se eligió la ecuación de Kirpich:

$$t = G * k * \left(\frac{L}{S^{0,5}}\right)^{0,77} \tag{7}$$

t es el tiempo de concentración (min), G es la constante de Kirpich = 0.0078, k es el coeficiente de ajuste, L es la ruta más larga del agua (ft) y S es la pendiente media del cauce del río.

4.3.1.3 Baseflow: Linear Reservoir

Como nuestra simulación abarca un periodo muy amplio, 20 años, fue importante considerar el caudal base. Por eso se eligió el método lineal. Para los valores de caudal base, se optó por poner valores arbitrarios con cierto criterio de caudales en los acuiferos del subsuelo, con vistas a calibrarlos posteriormente.

4.3.1.4 Loss: Soil Moisture Accounting

Este método calcula la infiltración, retención y generación de caudal a través de la columna de suelo. Para este cálculo, se decidió aplicar el método continuo para que el programa calculara qué parte de la precipitación caída producía escorrentía directa y qué parte se añadía al caudal base, en caso de haber, para calcular la evolución de la escorrentía total a lo largo del tiempo; de una forma continua por estar estudiando un periodo como ya he dicho anteriormente largo de 20 años.

Una vez el caudal generado en la subcuenca sale de esta, se incluye en un tramo de cauce. Hec-HMS calcula cómo evoluciona el hidrograma a medida que el agua discurre a través de los tramos del cauce o a través de un depósito o embalse. Los flujos entrantes en las conexiones entre tramos se suman en esos puntos de unión, antes de realizar el cálculo del flujo saliente. Finalmente Hec-HMS proporciona los hidrogramas generados para la totalidad de la cuenca y para cada una de las subcuencas.



Para calcular dicha escorrentía, el método Soil Moisture Accounting tiene en cuenta cinco niveles distintos en los que la precipitación puede ser retenida o almacenada: vegetación, retenciones superficiales, suelo, acuífero 1 (superficial) y acuífero 2 (más profundo). En la figura 30 se puede ver un esquema de este mecanismo.



Figura 30: Esquema del mecanismo seguido por el método Soil Moisture Accounting 6

Canopy interception (vegetación) y Surface depression (retención superficial) representan la porción del agua de precipitación que queda almacenada en la vegetación y en la superficie del suelo, respectivamente. Otra porción de agua se perderá por la evaporación. Del agua restante, parte se infiltrará al suelo y parte creará escorrentía superficial, en caso de saturar el suelo. La primera capa



del subsuelo a la que llega el agua infiltrada es la Upper Zone - Tension Zone Storage (suelo). En esta capa, parte del agua se perderá por evaporación, parte se almacenará, y una vez saturado parte creará escorrentía y parte se percolará a capas inferiores. Las dos últimas capas son Groundwater layer 1 y 2 (acuíferos 1 y 2). En estas capas parte del agua se almacenará y, una vez saturadas, parte volverá a crear caudal subterráneo y parte se percelará por percolación.

Estas siete capas dependen de un total de 18 parámetros, los cuales se han adquirido como se ha explicado previamente. En la figura 31 se muestra un esquema de dichos parámetros.



Figura 31: Esquema de los parámetros utilizados en el método Soil Moisture Accounting 6

Los parámetros en milímetros se refieren a las capacidades máximas de almacenamiento de cada capa. Los que están expresados en porcentaje indican el porcentaje de llenado inicial de cada uno de los niveles, indican por tanto la parte ocupada del nivel. Por último, los parámetros en mm/h se refieren a los caudales del agua cambiando de capa.

4.3.1.5 River: Muskingum

En cuanto a los datos relacionados con el río, se eligió el método Muskingum para obtener la evolución del caudal a lo largo del río, aplicando la siguiente conservación de masas:

$$S = K[XI + I(1 - X)Q]$$
(8)

S es la capacidad del canal, K es el coeficiente de proporcionalidad, X es el factor de peso (0.0 \prec X \prec 0.5), I es el caudal entrante, y Q es el caudal saliente.

Los parámetros necesarios para aplicar este método eran la K y la X. Como son parámetros relacionados con las propiedades de los caudales, de las áreas transversales del cauce y de la relación entre caudal de entrada y salida dentro del cauce, se estimaron valores aproximados y se calibraron posteriormente.


4.3.2 Modelo meteorológico

Para modelar la meteorología de la zona, se disponía de los datos de precipitación diaria y temperatura media diaria ya mencionados anteriormente. Los métodos elegidos para aplicar estos datos al modelo fueron los siguientes:

Precipitation	Specified Hyetograph
Evapotranspiration	Hamon

Cuadro 5: Hec-HMS Meteorological Methods

Por un lado, el método de precipitación usa los datos diarios de precipitación aplicados a las áreas de las subcuencas para modelar la cantidad de agua que captura la cuenca. Por otro lado, a partir de los datos de temperaturas diarias y se calculó la evapotranspiración por el método de Hamon.

El método de Hamon calcula la evapotranspiración potencial mediante una ecuación empírica que utiliza la presión de vapor de saturación a la temperatura media del día y ajustada con un coeficiente relativo a la duración del día. El coeficiente de duración de día engloba el tiempo de respuesta de la planta, duración de turbulencia y la radiación neta. Dicha fórmula es:

$$PET = k * 0.165 * 216.7N \frac{e_s}{T + 273.3}$$
(9)

PET es la evapotranspiración (mm $dia^{(-1)}$), k es el coeficiente de proporcionalidad, N es la duración diaria de sol, T es la tempeatura media mensual (mb), y e_s es la presión de vapor de saturación (°C).

$$e_s = 6,108e^{\left(\frac{17,27T}{T+273,3}\right)} \tag{10}$$

4.3.3 Control

En esta sección se especifican las características de las simulaciones que se van a realizar. En este caso, el periodo inicial a modelar fue del 1 de enero de 1985 al 31 de diciembre de 2005, periodo del que se disponían datos meteorológicos y de caudales. La simulación se realizó con un intervalo diario.

En la figura <u>32</u> se puede ver la imagen del modelo en Hec-HMS una vez listo para empezar a hacer simulaciones.





Figura 32: Modelo HEC-HMS

4.3.4 Calibración y validación

La calibración del modelo se hizo modificando secuencialmente los parámetros. Para ello se disponía de los datos de los caudales observados tanto a la altura del embalse de la Cohilla como en el de Palombera. Así que estos fueron los puntos de calibración de la cuenca. El periodo elegido para la calibración fue 1998-2004.

Dado que había que probar variaciones del conjunto de los valores de los parámetros obtenidos previamente para calibrar el modelo, se construyó un modelo simplificado con dos subcuencas y un único tramo de río, calculando los nuevos valores de la misma forma que para el modelo principal. Este modelo simplificado fue el que se usó para calibrar y, una vez obtenidos los resultados buscados, se aplicaron las mismas variaciones de valores al modelo real, calibrándolo directamente.

A través de un tedioso proceso, se han ido ajustando los parámetros de las dos subcuencas y del tramo de río que afectaban a la producción final de los hidrogramas, hasta conseguir un resultado lo más similar posible a la realidad.

En una primera fase, se utilizó la calibración automática que ofrece el programa. Mediante la señalización de las variables que se podían cambiar, el programa calculaba una aproximación a los valores óptimos para que los caudales obtenidos del modelo se parecieran lo más posible a los caudales observados en los embalses.

La calibración automática no es capaz de hallar el modelo óptimo, por lo que después de la calibración automática fue necesario realizar una calibración manual para ajustar los caudales de salida del modelo a unos valores aceptables.

La estación de la Cohilla está afectada por las primeras dos subcuencas superiores, mientras que



la Palombera se encuentra en la parte más baja, afectándole la totalidad de la cuenca. Es por esto que primero se calibraron las dos subcuencas superiores usando la estación de la Cohilla y, una vez obtenidos esos parámetros, se calibró el resto del modelo.

Una vez calibrado el modelo, es importante elegir un periodo distinto al usado para calibrar y del que se tengan caudales observados, para validar la efectividad del modelo. En este caso, como los datos en Palombera eran reducidos, se optó por hacer la validación en la estación de la Cohilla en el periodo 1989-1995.



5 RESULTADOS

5.1 Calibración del modelo hidrológico

5.1.1 Valores de las subcuencas

Estos fueron los valores finales conseguidos a través de ${\rm ArcGIS}$ y diversas fuentes para generar el modelo en HecHMS.

	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8
Área (km^2)	46.0	63.0	28.8	52.2	59.1	37.0	27.9	81.1
Latitud (°)	43.11	43.10	43.12	43.18	43.18	43.25	43.28	43.24
Longitud $(^{o})$	-4.45	-4.40	-4.38	-4.37	-4.43	-4.38	-4.43	-4.50

Cuadro 6: Datos topográficos de los centroides de las subcuencas obtenidas con ArcGIS

	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8
Vegetacón - Depósito inicial (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
Vegetación - Máx. depósito (mm)	1	1.5	1	1	1.5	1	1	1.5
Superficie - Depósito inicial (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
Superficie - Máx. depósito (mm)	0.5	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Transformación - tiempo de retraso (min)	1250	1150	100	250	200	100	200	200
Flujo base - GW1 inicial (m^3/s)	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo base - GW1 Coef. (hr)	10	10	5	10	10	5	5	10
Flujo base - GW2 inicial (m^3/s)	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo base - GW2 Coef. (hr)	400	400	200	400	400	200	200	400

Cuadro 7: Datos físicos de las subcuencas

	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8
Suelo (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
GW1 (%)	20	20	20	20	20	20	20	20
GW2 (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
Infiltración máx. (mm/hr)	2.1	3.1	4.77	2.38	3.97	2.38	1.59	2.38
Impermeabilidad (%)	0	0	2	0	0	0	0	0
Depósito en el suelo (mm)	40	50	83.5	83.5	83.5	83.5	83.5	83.5
Tensión del depósito (mm)	3.2	4	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
Percolación del suelo (mm/hr)	19	29	27.8	5.52	6.9	5.52	4.14	5.52
Depósito de GW1 (mm)	500	700	90	90	90	90	90	90
Percolación de GW1 (mm/hr)	0	0	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
Coeficiente de GW1 (hr)	600	900	60	100	100	60	60	80
Depósito de GW2 (mm)	1	1	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
Percolación de GW2 (mm/hr)	10	10	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
Coeficiente de GW2 (hr)	1	1	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Cuadro 8: Datos de las pérdidas de agua en las subcuencas



5.1.2 Calibración con la estación de aforo de la Cohilla

Empezando por la estación de la Cohilla, se ha calibrado en el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1998 y el 31 de marzo de 2004, a nivel diario. La calibración se dio por buena siguiendo dos parámetros proporcionados por el programa: sesgo y coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

El sesgo hace referencia al porcentaje de volumen total simulado respecto al volumen total observado, siendo un valor aceptable lo comprendido entre ± 10 %. El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe indica mediante un valor entre $-\infty$ y 1 la mejora que proporciona el modelo respecto a utilizar el caudal medio anual. Un valor de 0 supone que nuestro modelo es tan bueno como usar la media del caudal, y un valor aceptable es a partir de 0.5. En las figuras 33 y 34 se pueden observar el caudal simulado y observado para esta estación de aforo durante el periodo de calibración. Después en la figura 35 se muestra una dispersión de las medias mensuales de las dos series de caudales para poder apreciar la calibración realizada.



Figura 33: Estación de la Cohilla sin calibrar





Figura 34: Estación de la Cohilla calibrada

 ${\rm Sesgo} = -3.24\,\%$ y coeficiente de Nash-Sutcliffe = 0.538



Figura 35: Dispersión de los valores de calibración de la Cohilla

5.1.3 Calibración con el aforo de Palombera

La calibración de la estación en Palombera siguió la misma metodología que en la Cohilla, calibrando en el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1998 y el 31 de marzo de 2004, a nivel diario. Los resultados fueron los mostrados en las figuras 36 y 37. Después en la figura 38 se muestra una dispersión de las medias mensuales de las dos series de caudales para poder apreciar la calibración realizada.





Figura 36: Estación de Palombera sin calibrar



Figura 37: Estación de Palombera calibrada

 $\mathrm{Sesgo} = -9.63\,\%$ y coeficiente de Nash-Sutcliffe = 0.503





Figura 38: Dispersión de los valores de calibración de Palombera

5.1.4 Análisis de sensibilidad

Durante el proceso de calibración se pudo apreciar que las variaciones de ciertas propiedades de la cuenca afectaban mucho más al resultado del modelo que otras.

En cuanto al manejo del volumen de agua que se perdía en diferentes puntos del sistema y el volumen de agua que generaban caudal en los hidrogramas (es decir, los parámetros que afectan al sesgo del modelo), los parámetros más influyentes fueron los relacionados con la velocidad de infiltración entre las diferentes capas. Estos parámetros eran decisivos en cuanto al tiempo que transcurría hasta que se empezaba a producir la escorrentía, la cantidad de agua que se perdía por percolación profunda, y la cantidad de caudal continuo.

Una vez modelado el volumen de caudal total que había que conseguir, dos de los parámetros más importantes a la hora de calibrar la forma de los hidrogramas (optimizar el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe) fueron la K y X del método Muskingum. Por un lado, el valor del parámetro K controla el momento de ocurrencia del pico de caudal en los hidrogramas. Por otro lado, el valor del parámetro X controla el valor del caudal pico. Por lo que estos dos parámetros servían para distribuir el agua en los hidrogramas de la mejor forma posible.

5.1.5 Validación de la Cohilla

En las figuras 39 y 40 se puede ver que el modelo funciona bastante bien en distintos periodos del pasado. En este caso, se eligió el periodo 1989-1995 y se vio que el modelo funcionaba lo suficientemente bien como para poder ser usado para calcular predicciones.







Figura 39: Validación del modelo de Hec-HMS





Validación de la Cohilla

Figura 40: Dispersión de los datos en la validación de la Cohilla

Parámetro	Calibración de la Cohilla	Calibración de Palombera	Validación de la Cohilla
Sesgo (%)	-3.24	-9.63	-14.28
Coeficiente Nash-Sutcliffe	0.538	0.503	0.400

Cuadro 9: Pérdidas de rendimiento de la calibración a la validación

Como se puede observar en el cuadro 9 para el periodo de validación el rendimiento es ligeramente inferior, con un sesgo mayor y un NSE inferior. Aun así, esto se considera normal y se da por bueno el modelo para realizar las predicciones pertinentes.



5.2 Selección de series de futuro

Para poder elegir y calcular las predicciones de clima futuro a partir de los modelos meteorológicos, se calcularon los deltas de cambio anuales en los 20 años de periodo.

Para ello, se usaron los datos proporcionados por CORDEX como ya se ha explicado anteriormente. Esta base de datos divide la superficie terrestre en celdas, y la cuenca del Nansa se compone de tres de estas celdas. Por lo que se calcularon los deltas de las tres celdas y se calculó la media, para poder así compararlos y elegir las predicciones.

	celda1	celda2	celda3	mean
inmcm4.ncml	1.062250	1.052684	0.899777	1.004904
MRI-CGCM3.ncml	1.309948	1.314472	1.218861	1.281093
GFDL-ESM2M.ncml	1.338711	1.330372	1.225657	1.298247
CSIRO-Mk3-6-0.ncml	1.656106	1.621345	1.446391	1.574614
CNRM-CM5.ncml	1.632409	1.641573	1.544726	1.606236
MPI-ESM-LR.ncml	1.767603	1.745024	1.590168	1.700932
bcc-csm1-1.ncml	1.821663	1.838133	1.765309	1.808368
CCSM4.ncml	1.888154	1.883568	1.709356	1.827026
MPI-ESM-MR.ncml	1.977222	1.951620	1.788768	1.905870
NorESM1-M.ncml	2.074364	2.071962	1.974748	2.040358
CESM1-BGC.ncml	2.130294	2.131856	1.906604	2.056251
ACCESS1-0.ncml	2.299980	2.296257	1.969566	2.188601
BNU-ESM.ncml	2.263656	2.251188	2.215428	2.243424
MIROC5.ncml	2.311226	2.298263	2.136267	2.248585
IPSL-CM5A-LR.ncml	2.367986	2.342064	2.258610	2.322886
IPSL-CM5A-MR.ncml	2.932179	2.914478	2.667333	2.837997
CanESM2.ncml	3.118305	3.094954	3.000948	3.071402
GFDL-CM3.ncml	3.534564	3.513836	3.342455	3.463618

Figura 41: Deltas de temperatura



	celda1	celda2	celda3	mean
GFDL-CM3.ncml	-0.844979	-0.860770	-0.851472	-0.852407
GFDL-ESM2M.ncml	-0.401848	-0.404538	-0.424795	-0.410394
bcc-csm1-1.ncml	-0.363746	-0.381881	-0.382141	-0.375923
CCSM4.ncml	-0.330385	-0.362059	-0.390129	-0.360857
inmcm4.ncml	-0.355072	-0.369678	-0.324877	-0.349876
CSIRO-Mk3-6-0.ncml	-0.221521	-0.246340	-0.279609	-0.249157
CESM1-BGC.ncml	-0.252884	-0.247819	-0.193085	-0.231263
IPSL-CM5A-MR.ncml	-0.202027	-0.203012	-0.200426	-0.201822
MPI-ESM-MR.ncml	-0.183768	-0.197430	-0.218576	-0.199924
CanESM2.ncml	-0.152240	-0.169949	-0.163166	-0.161785
GFDL-ESM2G.ncml	-0.140769	-0.149646	-0.138719	-0.143045
MPI-ESM-LR.ncml	-0.133006	-0.145169	-0.144128	-0.140768
MIROC5.ncml	-0.098826	-0.110108	-0.114872	-0.107935
NorESM1-M.ncml	-0.058610	-0.071902	-0.104024	-0.078178
CNRM-CM5.ncml	-0.062793	-0.051394	-0.029508	-0.047898
ACCESS1-0.ncml	-0.028231	0.008684	0.051525	0.010659
IPSL-CM5A-LR.ncml	0.150410	0.162311	0.149604	0.154108
MRI-CGCM3.ncml	0.235374	0.205583	0.175128	0.205362
BNU-ESM.ncml	0.296950	0.309434	0.333828	0.313404

Figura 42: Deltas de precipitación

Siendo la distribución que se obtiene:



Figura 43: Distribución de los deltas de los modelos meteorológicos

Como se dijo anteriormente, los modelos elegidos fueron:



- Método más extremo (menores precipitaciones y mayores temperaturas): GDL-CM3.ncml
- Método menos extremo (mayores precipitaciones y menores temperaturas): MRI-CGCM3.ncml
- Método de valores medios: MPI-ESM-MR.ncml
- Ensemble

El método GDL-CM3 es el que se encuentra en la esquina inferior derecha de la gráfica, lo que significa que es el modelo que predice el clima más seco (con una disminución de la precipitación de 0.85 puntos) y con mayor aumento de tempraturas (casi 3.5°C). El modelo MRI-CGCM3, al contrario, se encuentra en la esquina opuesta del modelo, siendo el que predice el clima con mayores precipitaciones (0.2 puntos de subida media) y menor subida de temperatura (1.4°C). En este caso, hay un par de modelos que tienen predicciones respecto a la temperatura que son peores a MRI-CGCM3. Aún así, la combinación de precipitaciones y temperaturas es mucho peor en el caso elegido. Finalmente, el modelo MPI-ESM-MR tiene unos valores medios (bajada de precipitaciones de 0.2 puntos y aumento de temperaturas de 1.8°C).

Una vez elegidas las cuatro series de valores, se procedió a calcular los deltas mensuales entre los periodos 1985-2005 y 2045-2065 para las distintas estaciones meteorológicas, y poder aplicarlos posteriormente a los caudales observados. Posteriormente se calcularon las series de precipitaciones y temperaturas para cada subcuenca, y se metieron en el modelo de Hec-HMS.

5.3 Visualización de caudales

De las simulaciones llevadas a cabo con el modelo de Hec-HMS se obtuvieron valores de caudales en el periodo establecido de 2045-2065 en los distintos escenarios calculados.

En vista de que el objetivo principal de este estudio era saber si el cambio climático afectaría o no a los caudales que nutren las centrales hidroeléctricas de los Saltos del Nansa, se han estudiado los caudales obtenidos en la entrada al embalse de la Cohilla y al embalse de Palombera.

Primero, se ha verificado la fiabilidad de utilizar el conjunto de modelos ensemble como serie de datos de futuro para comparar con los datos actuales de caudales. Para ello, se han dibujado en varias gráficas los resultados obtenidos tanto con el ensemble como con los modelos extremos elegidos.

Una vez hecho esto, se procedió a estudiar la variación de caudal que sufrirá la cuenca del Nansa en los próximos 50 años.

5.3.1 Resultados en la Cohilla

En las figuras 44 y 45 se encuentra un despliegue de los caudales calculados con los tres modelos meteorológicos elegidos más el ensemble. Para poder compararlos de una forma más clara, se han mostrado las dispersiones de las predicciones en las figuras 46 47 y 48 comparándolas con los resultados del ensemble. Así se puede apreciar la diferencia entre cada modelo meteorológico y el ensemble.







Figura 44: Caudales futuros en la Cohilla de los distintos modelos meteorológicos, $\mathbf{Q}(m^3/s)$









Figura 45: Variación de los caudales en la Cohilla entre los periodos de 1985-2005 y 2045-2065, $Q(m^3/s)$





Figura 46: Dispersión de los caudales predichos por el ensemble y el modelo meteorológico GDL-CM3 para el periodo 2045-2065



Figura 47: Dispersión de los caudales predichos por el ensemble y el modelo meteorológico MPI-ESM-MR para el periodo 2045-2065





Predicción de caudales en la Cohilla

Figura 48: Dispersión de los caudales predichos por el ensemble y el modelo meteorológico MRI-CGCM3 para el periodo 2045-2065

En estas gráficas se puede ver cómo el funcionamiento de los cuatro modelos es bastante similar, teniendo una variación media de $1m^3/s$ y sin superar en ningún momento variaciones de $\pm 10m^3/s$.

Para apreciar mejor el comportamiento de cada modelo, se ha calculado la media mensual de las predicciones de cada modelo, con los siguientes resultados:



Figura 49: Medias mensuales de los caudales futuros predichos por los cuatro modelos meteorológicos, ${\bf Q}(m^3/s)$





Figura 50: Variaciones mensuales medias de los caudales futuros predichos por los cuatro modelos meteorológicos, entre los periodos 1985-2005 y 2045-2065, $Q(m^3/s)$

En ambas gráficas se puede observar la variación de predicciones que existen dependiendo del modelo que se use. Se puede observar también cómo la predicción del ensemble se encuentra siempre en un punto medio respecto del resto de modelos, y que el resto de series, dependiendo de la época del año, se encuentran más pesimistas o más optimistas en cuanto al cambio climático.

A la vista está que el modelo MRI-CGCM3 es el que predice los caudales más extremos en este caso, con las mayores caídas en los caudales en los periodos de verano y otoño (con aumentos de caudal respecto al actual de 2 m^3/s), y las mayores avenidas al final del invierno y primavera (variaciones medias de 1.5 m^3/s con respecto a los caudales actuales). A parte, los modelos MPI-ESM-MR y GDL-CM3 tienen tendencias similares, variando en 0.5 m^3/s la predicción dependiendo de la época del año. Finalmente la predicción del ensemble se mantiene en medio de las tres anteriores, como era de esperar, al ser una media de los deltas del resto de modelos.

Una vez comprobada la validez de la predicción ensemble, se prodeció a hacer la comparación de caudales tomando esta predicción como referencia. Se calcularon tanto los caudales en el periodo de presente, 1985-2005, como los de futuro, 2045-2065, usando el modelo de Hec-HMS. Aún siendo estos valores muy similares a los valores observados reales gracias a la calibración, se decidió hacer la comparación con los valores modelados. El rendimiento de la calibración tenía un sesgo del -14 %, es decir, que se predice un 14 % menos de caudal del que realmente se midió. Para que este sesgo no afecte a la comparación con el escenario futuro, se deben comparar las simulaciones en ambos escenarios.

En las figuras 51 y 52 se muestran los valores calculados por el modelo en Hec-HMS.



Figura 51: Caudales de los periodos 1985-2005 y 2045-2065, $Q(m^3/s)$







Figura 52: Comparación de caudales actuales con los futuros, $Q(m^3/s)$

Actualmente los meses con un mayor caudal son en invierno, con unos picos de hasta 15 m^3/s , sin tener en cuenta escenarios puntuales que se salen de la tendencia normal. Por otro lado, los menores caudales aparecen en verano con valores que llegan a rozar el 0 en los años más secos.

Si echamos un vistazo a los nuevos valores, se puede observar que los valores son ligeramente mayores en las avenidas más grandes, del orden de 2 m^3/s de aumento medio, y que se vuelve más inusual que el caudal de entrada llegue a valor nulo. Por lo demás, el resto de valores diarios se presentan bastante similares a simple vista.

Para poder hacernos mejor a la idea del cambio diario de los caudales, se han calculado la variación mensual media de los caudales. Los resultados son los mostrados en la figura 53



Figura 53: Variaciones mensuales medias de los caudales, $Q(m^3/s)$

En esta gráfica se puede ver con claridad que la tendencia de los caudales es de disminuir ligeramente con el tiempo, menos en grandes avenidas puntuales, como ya se ha subrayado anteriormente. Aunque las variaciones no parezcan muy grandes, hay que tener en cuenta varias cuestiones.



Por un lado, que esto es una variación que se produciría en 60 años de diferencia, y en el marco del inicio del cambio climático. Por lo que con el paso de las décadas, la variación iría aumentando exponencialmente, agravando la situación.

Por otro lado, este valor puede suponer más de lo que parece en un principio. Pongamos que el caudal medio en la actualidad, que pasa por la Cohilla, ronda los 8 m^3/s . La disminución de 1 m^3/s diario de caudal supondría una variación de un 12.5%. No es difícil suponer que para una central hidroeléctrica, tener disminuciones en los caudales de entrada en los embalses de más de un 10% acarrearía pérdidas substanciales.

Estos resultados coinciden con las predicciones en España ya que, según estudios recientes, la tendencia que marcan las predicciones estatales es que, a medida que el cambio climático es más evidente, las precipitaciones anuales irán disminuyéndose, secando muchas zonas de España, principalmente en la zona sur de la península.

5.3.2 Resultados en Palombera

Comparando los caudales obtenidos con los cuatro modelos distintos, nos encontramos con unas variaciones entre ellos prácticamente idénticos a los que podemos ver en la Cohilla. Al ser los caudales en Palombera más variables que en la Cohilla, se ha optado por mostrar los resultados directamente a través de las dispersiones en las figuras 55, 56 y 57.



Figura 54: Comparación de caudales futuros en Palombera dependiendo de los distintos modelos meteorológicos, $\mathbf{Q}(m^3/s)$





Figura 55: Dispersión de los caudales predichos por el ensemble y el modelo meteorológico GDL-CM3 para el periodo 2045-2065



Predicción de caudales en Palombera

Figura 56: Dispersión de los caudales predichos por el ensemble y el modelo meteorológico MPI-ESM-MR para el periodo 2045-2065





Predicción de caudales en Palombera

Figura 57: Dispersión de los caudales predichos por el ensemble y el modelo meteorológico MRI-CGCM3 para el periodo 2045-2065

En estas gráficas se observa que el funcionamiento de los cuatro modelos sigue la misma línea que en la Cohilla, con variaciones medias un poco superiores a las anteriores, entorno a los 2 m^3/s , y con máximas de 20 m^3/s . Estos valores son proporcionales al aumento de caudal que pasa por Palombera en contraposición al observado en la Cohilla.

Calculando las medias mensuales de caudales y sus variaciones, se obtuvieron los siguientes gráficos.



Figura 58: Caudales medios en Palombera en el periodo 2045-2065, $Q(m^3/s)$





Figura 59: Variaciones medias de caudales en Palombera entre los periodos de 1985-2005 y 2045-2065

Al igual que en la Cohilla, la serie del ensemble está en todo momento en un punto medio de todas las predicciones, y las otras tres series se van entrelazando entre sí dependiendo de la época del año.

A diferencia de los resultados anteriores, estas predicciones no siguen un orden fácilmente apreciable. Lo que sí se puede ver es que el modelo del ensemble, el que más nos interesa, no muestra variaciones muy notorias, siendo sus valores máximos de $\pm 5m^3/s$, y 10 m^3/s en los casos más excepcionales.

Vista la validez del ensemble, se procedió a hacer la comparación con respecto a los caudales actuales usando el modelo de Hec-HMS entre los periodos de referencia. A continuación se muestran los valores calculados.



Figura 60: Caudales de los periodos 1985-2005 y 2045-2065, $Q(m^3/s)$



5. RESULTADOS



Figura 61: Comparación de caudales actuales con los futuros, $Q(m^3/s)$

Aquí podemos ver que actualmente las mayores avenidas rondan los 75 m^3/s en invierno, y que ha habido una disminución desde el principio de los años 90, donde tuvieron varias avenidas mayores de lo normal. Los valores mínimos, aún pareciendo que rozan el mínimo, no se reducen más de 1 m^3/s .

Los nuevos valores muestran que durante la mayor parte del año, los caudales disminuyen unos 5 m^3/s , aunque en las mayores avenidas durante el invierno no se aprecie tal cambio.

En la figura 62 se muestra el cambio diario mensual en el periodo futuro.



Palombera

Figura 62: Variaciones medias mensuales de caudales en el periodo de 2045-2065

Claramente los resultados siguen mostrando una bajada en los valores de los caudales. Esto acarrea las consecuencias ya explicadas por el empeoramiento de las condiciones climáticas con las consecuentes pérdidas económicas de las centrales hidroeléctricas de la zona.

Vistas las últimas gráficas de Palombera parece importante hacer una pequeña reflexión sobre el método usado para calcular las nuevas series de caudales. En el periodo de 1985-2005, se puede observar que a principio de dicho periodo hubo varias avenidas muy grandes, que al ser bastante



excepcionales no salían plasmadas en las series de predicción provenientes de CORDEX. Esto implica que, al calcular los deltas, esta gran variación de caudales dentro del mismo periodo no se tiene en cuenta. Por consiguiente, en los resultados, el inicio del periodo de 2045-2065 predice valores seguramente mayores de los que se predirían usando un método más fino.

Es por esto que parece que este método ha funcionado bastante mejor en la Cohilla que en Palombera, por la "constancia" de la variación de caudales en el primer embalse y en contra de lo que ocurre en el segundo.

5.4 Análisis estadístico

Una vez descritos los resultados de una forma general, se procedió a un análisis estadístico de los mismos. A continuación se pueden observar los histogramas de las series de caudales en el periodo de referencia y el ensemble generado tanto en la Cohilla como en Palombera.

Vistos los resultados de los hidrogramas, se pensó que era posible mostrar los datos aplicando algún tipo de distribución. Se probaron varios tipos de distribuciones (Gaussiana, lognormal, etc.) y finalmente se llegó a la conclusión que las series seguían una distribución Gamma.

La distribución Gamma es un tipo de distribución que usa dos parámetros para su cálculo, Alfa y Beta. Alfa ajusta la distribución en el eje x, moviendo la parte descendiente de la función de izquierda a derecha. Beta ajusta el pico de la función en el eje y, aumentando o disminuyendo el valor máximo de la misma.

Esta distribución es muy usada en el ámbito hidrológico, ya que se ha visto experimentalmente que muchas series de caudales en distintas condiciones de contorno la siguen con mayor o menor exactitud.

En las siguientes figuras se muestran los resultados de los histogramas y sus distribuciones de las series de caudal actual y futuro en la Cohilla y en Palombera.



Alfa	2.53
Beta	1.27
Media	3.27
Moda	1.97
Desviación típica	2.06
Varianza	4.23
Q máximo (m^3/s)	42.6
Q mínimo (m^3/s)	0

Cuadro 10: La Cohilla 1985-2005

Figura 63: Gráfico Cohilla 1985-2005







Figura 64: Palombera 1985-2005



Figura 65: Gráfico Cohilla 2045-2065



Figura 66: Gráfico Palombera 2045-2065

Alfa 1.01 Beta 7.86 Media 8.64Moda 0.77Desviación típica 8.24 Varianza 67.89 Q máximo (m^3/s) 134.8Q mínimo (m^3/s) 0

Cuadro 11: Palombera 1985-2005

Alfa	2.16
Beta	1.40
Media	3.02
Moda	1.63
Desviación típica	2.06
Varianza	4.23
Q máximo (m^3/s)	44
Q mínimo (m^3/s)	0

Cuadro 12: La Cohilla 2045-2065, ensemble

Alfa	1.08
Beta	7.58
Media	8.18
Moda	0.60
Desviación típica	7.88
Varianza	62.08
Q máximo (m^3/s)	140.1
Q mínimo (m^3/s)	0

Cuadro 13: Palombera 2045-2065, ensemble

Viendo los resultados de las distribuciones, se puede confirmar lo que se lleva diciendo a lo largo de todo el estudio.

Empezando por la Cohilla, tanto los valores de la media como de la moda disminuyen de un periodo a otro, de 3.27 a 3.02 y de 1.97 a 1.63, respectivamente. En la segunda gráfica de la Cohilla se



puede ver cómo la densidad de datos a la izquierda de la misma aumenta considerablemente, bajando así ambos valores. Sin embargo, si comparamos los caudales máximos, observamos que aumentan del periodo de referencia al futuro. Esto también confirma lo que se ha subrayado anteriormente, que aunque la tendencia anual sea la disminución de caudal, los eventos puntuales serán de mayor calibre. En este caso el aumento es de 42.6 m^3/s a 44 m^3/s . De todas formas, los valores de caudal máximo no se pueden tener en cuenta con mucha precisión, ya que el modelo está diseñado con objeto de calcular una tendencia de variación en un periodo temporal bastante amplio (20 años). Por ello, los valores de días puntuales no son exactos, solamente representativos del valor por donde rondará en realidad.

Palombera sigue la misma tendencia, disminuyendo la media y la moda de 8.64 a 8.18 y de 0.77 a 0.60 respectivamente. Aquí se puede ver también cómo la densidad de datos a la izquierda de la gráfica aumenta bastante, e igualmente, el caudal máximo varía de 134.8 m^3/s a 140.1 m^3/s . Estando ambos embalses concatenados entre sí, habría sido extraño que los resultados no hubieran sido iguales.

En el anexo se pueden ver los histogramas y distribuciones de las tres predicciones de futuro en ambos embalses. Como es de esperar, siguen las mismas pautas que estas series.



6 CONCLUSIONES

La conclusión principal obtenida de los resultados expuestos es que el caudal en el río Nansa tiene una tendencia decreciente a causa del inicio del cambio climático que a día de hoy ya afecta a todo España. Este hecho es de gran importancia tanto desde el punto de vista ambiental como desde el punto de vista económico.

Ya se ha hablado en este estudio sobre cómo el cambio climático está afectando y afectará cada vez en mayor medida al medio ambiente, a través del empobrecimiento hídrico de muchas cuencas a lo largo del país, perjudicando la existencia de la fauna y flora actuales.

Pero, siendo nuestro objetivo principal las consecuencias del cambio climático en las centrales hidroeléctricas, nos centraremos en las consecuencias económicas.

El análisis estadístico ha mostrado unas disminuciones en los caudales de cara a futuro de aproximadamente un 12.5% con vistas al periodo 2045-2065. Esto acarrearía consecuencias importantes en la producción de energía eléctrica, con sus consecuentes pérdidas monetarias. Además, estas pérdidas se harían notar sobre todo en las horas del día de mayor demanda, que es cuando el aprovechamiento necesita disponer de la mayor cantidad de agua posible. Según el método de casación de la electrcidad en España, estas horas punta son también las más caras del día, por lo que esta disminución de caudal afectaría sobre todo a la producción de energía eléctrica más cara, aumentando así las ya imaginadas pérdidas.

No estaría del todo desencaminado suponer que una gran cantidad de cuencas en España sufrirán las mismas o peores disminuciones de caudales que en este caso. De hecho, varios estudios aseguran que esta situación va a ir a peor de la mano del empeoramiento del cambio climático mundial, siendo España uno de los primeros sufridores. Aunque la energía hidroeléctrica no sea una de las principales fuentes de electricidad del país, según datos de Red Eléctrica de España el uso de la energía hidroeléctrica diaria es de entorno al 20%. En caso de tener las disminuciones de producción mencionadas, cabría la posibilidad de tener que cambiar de fuente de energía, sobre todo para los momentos de punta de demanda.

Esto tendría que contrarrestarse, o bien aumentando el consumo de energías no renovables, o modificando (o construyendo en caso de no poder optimizar) más centrales de energías renovables. España ha apostado en estos últimos años por la energía eólica y fotovoltaica, invirtiendo grandes cantidades de dinero a la causa. Por desgracia, estas fuentes de energía no son a día de hoy lo suficientemente potentes como para poder suplir las necesidades que suple la energía hidroeléctrica. A parte de no poder usarse para demandas de punta por su dependencia total de la meteorología y de las horas de sol en todo momento.

La última solución posible sería el aumento de la importación de energía eléctrica desde Francia. Esta solución no estaría muy bien vista por la subida del coste de la electricidad que acarrearía.

Por ello, las soluciones más viables ahora mismo para no dar un paso atrás en el desarrollo de las energías renovables en España serían, por un lado, empezar a invertir en otras fuentes de energía renovable antes de que la energía hidroeléctrica pudiera empezar a mostrar carencias, o por otro lado, modificar las centrales hidroeléctricas para optimizar sus recursos.

Una opción para llevar esta última idea a cabo podría ser a través de las centrales hidroeléctricas reversibles. España es precursora en este tipo de centrales, con 3600 MW de potencia instalada repartidas en 12 centrales. Además, hay varios proyectos en construcción, de entre los que cabe mencionar el proyecto de Chira-Soria en las islas Canarias. La ventaja principal de estas centrales se encuentra en que almacenan el agua que utilizan, pudiendo decir que "almacenan.^{en}ergía cuando esta está más barata para generarla cuando el precio aumenta. De esta forma se disminuye la necesidad de tener un caudal entrante continuo de agua en el embalse superior, independizándose parcialmente de la



hidrología de la cuenca. Por desgracia, este tipo de centrales no ha tenido un desarrollo tan grande como han podido tener los aprovechamientos fotovoltaicos o eólicos debido a su gran coste de entrada, al igual que las centrales hidroeléctricas convencionales, y al limitado margen de beneficios a consecuencia del aplanamiento de la demanda diaria de energía eléctrica en los últimos años.

Una solución relacionada con estos tipos de fuentes de energías renovables sería una fusión de instalaciones que ha empezado a implementarse en estos últimos años. Esta instalación dispondría de centrales hidroeléctricas reversibles e instalaciones de generación de energía eólica, en la mayoría de los casos. A través de este método, se aprovecharía la energía producida por el parque eólico, y, en los periodos de baja demanda, la energía sobrante podría ser "almacenadaïndirectamente a través del bombeo de agua en la central reversible, convirtiendo así la energía generada de forma eólica en energía potencial del agua. Posteriormente, en las horas punta de demanda, ese agua se turbinaría generando una mayor cantidad de energía que si solo estuviera las instalaciones eólicas.

De esta forma lo que se pretende es abaratar el coste de producción de energía eléctrica mediante las centrales reversibles, bombeando agua con energía sobrante por lo que los gastos de bombeo desaparecerían. Estos gastos son una de las principales razones de la poca viabilidad de este tipo de proyectos, por lo que este tipo de soluciones pueden dar muy buen resultado.

Finalmente, concluir con una frase de Thomas Fuller, que dice lo siguiente: "Nunca sabremos el valor del agua hasta que el pozo esté seco". En nuestro caso, el pozo se está secando y nos podemos hacer una idea del valor del agua que estamos perdiendo. Así que hagamos algo para solucionarlo.



Referencias

- ANNA PIRANI ET AL, CLIVAR PROJECT OFFICE, WCRP Coupled Model Intercomparison Project-Phase 5-CMIP5, Southampton, UK, May 2011
- [2] CLEO PASKAL-CHATHAM HOUSE AND GLOBAL EESE, The Vulnerability of Energy Infrastructure to Environmental Change, April 2009
- [3] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, MINISTERIO DE FOMENTO DEL GOBIERNO DE ESPAÑA, Metodología de Producción de la Base de Datos CLC-Change 2000-2006, Enero 2010
- [4] G.P. HARRISON, H.W. WHITTINGTON AND S.W. GUNDRY, *Climate Change Impacts on Hy*droelectric Power, University of Edinburgh, Scotland, UK
- [5] J. SANCHO COMÍNS (DIR.), INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL, España en mapas. Una síntesis geográfica. Serie Compendios del Atlas Nacional de España (ANE)., Centro Nacional de Información Geográfica, Madrid, 2019. Disponible en: http://www.ign.es/web/ign/portal/espana-enmapas
- [6] JESSICA HOLBERG, Tutorial on using HEC-GeoHMS to develop Soil Moisture Accounting Method Inputs for HEC-HMS, June 2014
- [7] JULIO MANUEL DE LUIS RUIZ, Tesis doctoral: Contraste en la ejecución de auscultaciones geodésicas por métodos clásicos y con láser escáner, Universidad de Cantabria, Santander, Diciembre de 2009.
- [8] THOMSON, A.M., CALVIN, K.V., SMITH, S.J. ET AL., Climatic Change, July 2011
- [9] TÓTH B, WEYNANTS M, PÁSZTOR L, HENGL T., 3D soil hydraulic database of Europe at 250 m resolution. Hydrological Processes, 2017, https://doi.org/10.1002/hyp.11203
- [10] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, Part 630 National Engineering Handbook, Chapter 15: Time of Concentration, May 2010
- [11] US ARMY CORPS OF ENGINEERS, Hec-GeoHMS User's Manual, Version 10.1, February 2013
- [12] US ARMY CORPS OF ENGINEERS, Hec-HMS User's Manual, Version 4.3, September 2018
- [13] WAIKHOM RAHUL SINGH, MANOJ K. JAIN, Continuous Hydrological Modeling using Soil Moisture Accounting Algorithm in Vamsadhara River Basin, India, October 2015
- [14] WHITTINGTON, H.W. AND GUNDRY, S.W., Global Climate Change and Hydroelectric Resources-IEE Engineering Science and Technology Journal, March 1998
- [15] escenarios.adaptecca.es
- [16] www.cordex.org
- [17] www.acciona-energia.com
- [18] www.aemet.es
- [19] www.chcantabrico.es/las-cuencas-cantabricas/marco-fisico/hidrologia/rios/nansa
- [20] www.greenpeace.org



A Tablas de valores de las subcuencas de calibración

	SB1	SB2
Área (km^2)	105	348
Latitud (°)	43.09	43.21
Longitud $(^{\rm o})$	-4.42	-4.41

Cuadro 14: Datos topográficos de los centroides de las subcuencas en el modelo de calibración

Valores finales:

	SB1	SB2
Vegetacón - Depósito inicial (%)	0	0
Vegetación - Máx. depósito (mm)	3.7	2.8
Superficie - Depósito inicial ($\%$)	0.33	0
Superficie - Máx. depósito (mm)	1.2	2
Transformación - tiempo de retraso (min)	1200	1800
Flujo base - GW1 inicial (m^3/s)	0	0
Flujo base - GW1 Coef. (hr)	150	940
Flujo base - GW2 inicial (m^3/s)	0	0
Flujo base - GW2 Coef. (hr)	1800	2000

Cuadro 15: Datos físicos de las subcuencas de calibracio	Cuadre	15: Dato	s físicos	de.	las	subcuencas	de	calibració
--	--------	----------	-----------	-----	-----	------------	----	------------

	SB1	SB2
Suelo (%)	5	0
GW1 (%)	20	50
GW2 (%)	100	100
Infiltración máx. (mm/hr)	2.6	1.62
Impermeabilidad (%)	0	0
Depósito en el suelo (mm)	113	110.7
Tensión del depósito (mm)	3.7	3.72
Percolación del suelo (mm/hr)	20	11.4
Depósito de GW1 (mm)	980	971
Percolación de GW1 (mm/hr)	0	0
Coeficiente de GW1 (hr)	740	680
Depósito de GW2 (mm)	0	0
Percolación de GW2 (mm/hr)	0	0
Coeficiente de GW2 (hr)	0	0

Cuadro 16: Datos de las pérdidas de agua en las subcuencas de calibración



A. TABLAS DE VALORES DE LAS SUBCUENCAS DE CALIBRACIÓN



Figura 67: Calibración del modelo de calibración en la Cohilla



Figura 68: Calibración del modelo de calibración en Palombera



B Tablas de deltas de las estaciones meteorológicas

(mencionada justo antes del punto 5.3)



Figura 69: Precipitaciones en la estación 1136A



Figura 70: Precipitaciones en la estación 1165E



B. TABLAS DE DELTAS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS



Figura 71: Temperaturas en la estación 1136A





Figura 72: Temperaturas en la estación 1159O



B. TABLAS DE DELTAS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS



Figura 73: Temperaturas en la estación 1174I



C. SERIES DE CAUDALES

C Series de caudales

PROMEDIO (cms)	La Cohilla	Palombera
1985	3.25	8.77
Jan	5.57	15.19
Feb	4.96	8.32
Mar	3.90	13.94
Apr	4.48	10.69
May	6.50	23.65
Jun	4.55	7.97
Jul	2.35	3.05
Aug	1.00	1.22
Sep	0.41	0.46
Oct	0.34	2.26
Nov	2.72	13.33
Dec	2.36	5.06
1986	3.16	8.15
Jan	4.40	15.91
Feb	6.55	20.12
Mar	4.13	8.01
Apr	5.95	11.76
May	3.15	4.00
Jun	2.09	3.44
lut	0.97	1.79
Aug	0.61	2.71
Sep	1.56	5.52
Oct	2.82	10.53
Nov	2.85	4.12
Dec	3.18	10.76
1987	3.98	9.00
Jan	5.71	14.95
Feb	6.59	16.70
Mar	5.29	8.73
Apr	4.06	6.52
May	2.56	3.81
Jun	1.82	5.29
Jul	1.88	4.84
Aug	1.48	2.28
Sep	1.13	4.32
Oct	3.42	7.29
Nov	4.46	21.74
Dec	9,46	12.33
1988	4,48	10.09
Jan	4.83	9.79
Feb	5.03	13.40
Mar	5.19	13.28
Apr	9.57	27.62
May	6.07	10.31
Jun	5.18	9,43
Jul	4.44	9.32
Δ11σ	2.02	5.15
Sep	2.32	5.13
Oct	3.54	6.11
Nev	2.34	2.05
Dec	2.24	2.55
1020	2.30	6.41
1303	2.85	6.40
Lab	2.98	2.43
Mar	1.38	3.12
iviai	2.35	7.32

Apr	4.66	19.56	San	2.63	7.46
May	4.78	10.40	Sep	2.03	12.06
Jun	3.83	7.51	UCE	4.40	13.00
Jul	2.43	3.19	NOV	3.68	0.52
Διισ	1.53	2.13	Dec	4.38	16.84
Sen	1.55	1.88	1994	2.63	6.64
Oct	0.79	1.00	Jan	5.34	15.08
New	3.75	6.10	Feb	3.22	3.78
Dee	2.70	7.79	Mar	2.16	3.96
1000	3.32	0.76	Apr	3.16	12.18
1990	4.03	9.20	May	3.38	5.32
Jan	3.04	6.08	Jun	2.79	4.23
Feb	4.50	5.10	Jul	1.29	1.48
Mar	2.6/	5.4b	Aug	1.45	2.57
Apr	5.28	22.10	Sep	1.02	9.57
Мау	5.42	8.16	Oct	2.75	9.51
Jun	4.57	9.00	Nov	3.10	6.32
Jul	2.46	2.95	Dec	1.99	5.61
Aug	1.35	2.14	1995	2.95	8.29
Sep	1.91	4.31	Jan	7.09	25.87
Oct	3.94	10.60	Feb	4.38	9.96
Nov	4.23	10.83	Mar	4.42	11.48
Dec	6.99	21.82	Apr	2.09	5.57
1991	4.51	11.06	May	2.90	7.67
Jan	4.23	7.69	Jun	1.62	2.76
Feb	3.14	6.10	Jul	2.44	6.41
Mar	7.49	25.10	Aug	1.19	1.75
Apr	7.33	15.54	Sep	1.12	6.06
May	9.13	22.15	Oct	1.04	1.66
Jun	5.30	6.99	Nov	2.72	10.06
Jul	2.22	2.29	Dec	4.35	10.11
Aug	1.08	1.32	1996	3.18	10.11
Sep	0.96	4.03	Jan	4.97	8.60
Oct	3.01	12.87	Feb	5.83	20.24
Nov	5.48	23.67	Mar	4.64	7.87
Dec	4.63	4.73	Anr	3.10	7.31
1992	4.07	11.13	May	2.55	7.40
Jan	2.51	5.07	lun	1.68	3.24
Feb	1.69	2.01	Jul	1.00	5.16
Mar	1.63	12.40	Δυσ	1.04	5.92
Apr	6.11	18.80	San	1.45	5.22
May	3.79	8.07	Oct	1.33	9.61
Jun	5.12	16.88	New	2.23	17.43
Jul	5,34	8,10	Dec	6.24	23.75
Δυσ	2.59	3.59	1007	3.24	23.73
Sen	2.05	6.75	1337	2.00	1.32
0.00	6.76	27.86	Jan	5.51	15.55
New	5.98	10.90	Feb	3.21	3.54
Dec	5.00	12.00	iviar	1.31	2.10
1002	3.15	22.50	Apr	0.62	0.93
lan	3.20	3.58	iviay	1.79	7.06
Lah	2.70	2.6D	Jun	3.28	7.54
Mar	1.39	3.48	Jul	2.66	9.03
iviar Ann	4.20	15.2/	Aug	2.88	7.92
Apr	2.74	8.54	Sep	2.67	5.58
Iviay	3.56	9.31	Oct	2.16	5.32
Jun	3.46	8.99	Nov	3.70	10.92
IUL	2.94	5.00	Dec	4.52	14.45
Aug	1.97	9.98	1998	2.53	8.23


C. SERIES DE CAUDALES

Jan	2.89	6.83			
Feb	2.76	6.54			
Mar	2.17	7.75			
Apr	3.48	13.24			
May	4.37	13.93			
Jun	3.39	5.52			
lut	1.55	1.84			
Aug	0.76	2.50			
Sep	0.93	4.94			
Oct	3.07	14.42			
Nov	1.67	6.72			
Dec	3.28	14.31			
1999	3.19	9.59			
Jan	4.18	14.36			
Feb	3.33	11.73			
Mar	3.05	9.75			
Apr	2.26	7.02			
May	2.93	8.10			
Jun	2.16	3.73			
lut	1.07	2.14			
Aug	2.05	4.52			
Sep	2.01	6.82			
Oct	3.14	6.34			
Nov	5.93	25.59	Jun	2.41	7.04
Dec	6.16	15.35	Jul	1.37	1.85
2000	2.53	6.38	Aug	0.85	5.56
Jan	4.12	8.22	Sep	1.39	4.73
Feb	2.01	4.22	Oct	2.79	6.15
Mar	1.25	4.17	Nov	3.15	8.60
Apr	4.67	15.21	Dec	5.46	18.19
May	3.83	5.90	2003	3.14	8.06
Jun	2.04	3.25	Jan	5.93	16.11
Jul	1.03	3.36	Feb	5.90	16.56
Aug	0.67	1.61	Mar	4.19	5.76
Sep	0.37	1.37	Apr	2.99	5.69
Oct	1.62	9.07	May	2.97	8.28
Nov	3.20	9.68	Jun	1.67	2.57
Dec	5.54	10.45	Jul	0.92	2.65
2001	3.28	8.48	Aug	0.82	2.29
Jan	6.62	17.02	Sep	0.92	2.56
Feb	7.31	15.92	Oct	3.04	10.87
Mar	6.09	11.84	Nov	4.47	14.50
Apr	3.64	7.10	Dec	4.07	9.45
May	2.69	7.57	2004	2.86	8.72
Jun	1.73	4.78	Jan	3.69	13.80
lut	1.57	4.25	Feb	3.05	7.22
Aug	0.94	2.02	Mar	4.30	15.92
Sep	0.92	4.27	Apr	3.43	8.49
Oct	1.23	2.08	May	2.42	7.64
Nov	3.93	21.03	Jun	2.34	3.28
Dec	2.95	4.72	Jul	1.70	4.41
2002	2.69	7.88	Aug	1.56	2.77
Jan	2.24	5.01	Sep	1.82	4.32
Feb	2.21	7.48	Oct	1.59	3.90
Mar	3.22	6.94	Nov	4.74	20.02
Apr	3.69	11.17	Dec	3.79	12.92
May	3.47	11.81	Total general	3.27	8.64

Figura 74: Series de caudales actuales



Promedio (cms)	La Cobilla	Palombera	Apr	4.29	17.81	Sep	2.12	6.22
2045	3.01	8.23	May	4.10	8.89	Oct	3.86	11.83
lan	5.63	15 11	Jun	3.13	5.38	Nov	3.46	6.67
Eeb	4.95	8.48	Jul	1.91	2.53	Dec	4.41	17.45
Mar	3.96	14.19	Aug	1.12	1.78	2054	2.38	6.18
Apr	4.23	9.62	Sep	0.83	1.57	Jan	5.29	14.71
May	5.44	19.55	Oct	0.63	1.26	Feb	3.13	3.99
lun	3.74	6.21	Nov	2.75	6.48	Mar	2.14	4.06
Jul	1.85	2.50	Dec	5.69	8.03	Apr	2.89	10.77
Aug	0.75	1.02	2050	3.67	8.69	May	2.85	4.53
Sen	0.30	0.45	Jan	5.09	9.16	Jun	2.23	3.54
Oct	0.29	2.38	Feb	4.40	5.01	Jul	1.04	1.38
Nov	2.72	13.44	Mar	2.67	5.77	Aug	1.05	1.92
Dec	2.39	5.77	Apr	4.90	19.46	Sep	0.85	9.25
2046	3.00	7.85	May	4.60	6.83	Oct	2.31	7.45
lan	4.50	16.95	Jun	3.75	7.53	Nov	2.92	6.33
Feb	6.64	19.18	Jul	1.92	2.38	Dec	1.94	6.24
Mar	4 34	8 33	Aug	1.03	2.26	2055	2.81	8.05
Anr	5.50	10.67	Sep	1.46	3.27	Jan	7.23	25.89
Mau	2.78	3.49	Oct	3.41	9.85	Feb	4.39	11.58
lun	1.77	2.99	Nov	3.91	11.02	Mar	4.38	10.62
hul	0.78	1.47	Dec	6.96	21.59	Apr	2.04	5.11
Διισ	0.49	2.38	2051	4.19	10.44	May	2.51	6.48
San	1.29	4.77	Jan	4.09	7.56	Jun	1.36	2.55
Oct	2.29	9.57	Feb	3.10	6.37	Jul	1.95	5.04
New	2.35	4.06	Mar	7.70	25.85	Aug	0.93	1.51
Dec	3.21	11 17	Apr	6.99	14.20	Sep	0.92	5.21
2047	3.21	8.80	May	7.91	18.57	Oct	0.85	1.52
lan	5.80	15.00	Jun	4.42	5.69	Nov	2.80	10.59
Eab	6.69	17.45	Jul	1.82	1.99	Dec	4.41	10.55
Mar	5.26	9.15	Aug	0.87	1.17	2056	3.04	9.77
Anr	3.20	5.78	Sep	0.82	4.24	Jan	5.05	8.75
Mav	2.25	3 35	Oct	2.61	10.74	Feb	5.93	20.73
lun	1.56	4.56	Nov	5.43	24.07	Mar	4.61	8.24
Jul	1.30	3.70	Dec	4.43	4.62	Apr	2.94	6.83
Aug	1.45	1.00	2052	3.65	10.22	May	2.23	6.11
San	0.87	3.73	Jan	2.47	5.18	Jun	1.37	2.78
Oct	2.99	6.60	Feb	1.65	2.09	Jul	1.05	4.74
New	5.52	24.46	Mar	1.74	13.48	Aug	1.15	5.19
Dec	8.24	10.61	Anr	5.70	16.18	Sen	1.04	4.35
2048	4.04	9.26	May	3.31	7.09	Oct	1.91	7.75
lan	4.04	10.38	Jun	4.43	14.69	Nov	2.83	18.57
Fak	4.03 E.04	14.00	Jul	4.27	6.44	Dec	6.36	23.64
Mar	5.04	14.09	Aug	2.04	3.56	2057	2.56	6.98
Apr	9.52	12.99 23.5P	Sep	1.76	5 32	Jan	5.45	15.43
Mau	5.35	23.30	Oct	6.15	25.94	Eeb	3.09	3.49
lun	4.37	9.34	New	5.20	9.29	Mar	1.25	2.16
Jul .	4.37	0.34	Dec	5.00	13.01	Anr	0.59	0.93
Aug	3.55	7.21	2053	2.60	9.30	May	1.50	6.11
San	2.30	9.29	lan	2.69	2.35	hun	1.32	6.53
Oct	1.98	3.32	Eeb	1.47	5.14	hul	2.00	6.70
New	2.95	4.94	Mar	4.47	14.28	Δυσ	2.05	6.67
Dec	2.01	2.91	Anr	9.22	7.00	San	2.24	3.07 A 64
2040	2.46	6.05	Mau	2.02	7.30	Oct	4.70	4.00
2049	2.61	6.01	iviay	3.05	7.37	New	1./8	5.03
Jan	2.95	7.07	nut.	2.86	7.79	Dec	3.50	11.50
reb	1.40	4.03	Jul	2.32	3.98	Dec	4.44	14.01
D/Dar	2 38	7 30	Aug	1.55	8.49	2058	Z.28	1.72



C. SERIES DE CAUDALES

Jan	2.86	6.90			
Feb	2.70	6.70			
Mar	2.17	7.89			
Apr	3.24	12.25			
May	3.72	11.61			
Jun	2.75	4.29			
Jul	1.22	1.56			
Aug	0.57	2.10			
Sep	0.78	4.46			
Oct	2.65	12.96			
Nov	1.51	8.98			
Dec	3.25	12.75			
2059	2.97	9.26			
Jan	4.19	14.26			
Feb	3.38	12.52			
Mar	3.08	9.59			
Apr	2.17	6.55			
May	2.52	6.60			
Jun	1.77	3.28			
Jul	0.86	1.86			
Aug	1.57	3.60			
Sep	1.66	5.92			
Oct	2.69	5.65	Jun	1.96	5.95
Nov	5.77	26.02	Jul	1.06	1.47
Dec	6.06	15.69	Aug	0.66	4.91
2060	2.35	6.10	San	1.12	3.03
Jan	4.05	8.16	3cp Oct	2.45	5.55
Feb	1.94	4.39	New	2.43	9.70
Mar	1.29	4.74	Dec	2.92	19.22
Apr	4.31	13.07	Dec	5.52	18.32
May	3.27	5.06	2063	2.95	7.74
Jun	1.68	2.76	Jan	6.0Z	1/.4/
Jul	0.79	2.65	Feb	5.89	15.24
Aug	0.48	1.37	Mar	4.11	5.78
Sep	0.26	1.50	Apr	2.81	5.19
Oct	1.45	8.38	May	2.55	6.93
Nov	3.05	9.65	Jun	1.35	2.25
Dec	5.65	11.48	Jul	0.68	2.04
2061	3.15	8.21	Aug	0.60	2.00
Jan	6.71	17.54	Sep	0.69	2.14
Feb	7.34	15.58	Oct	2.74	10.33
Mar	6.12	11.74	Nov	4.16	14.18
Apr	3.53	6.64	Dec	3.94	9.83
May	2.40	6.37	2064	2.68	8.44
Jun	1.48	4.21	Jan	3.67	13.55
lut	1.23	3.33	Feb	3.12	8.64
Aug	0.71	1.86	Mar	4.32	15.23
Sep	0.73	3.60	Apr	3.27	7.90
Oct	1.01	1.89	May	2.15	6.25
Nov	3.97	21.70	lun	1 93	2.70
Dec	2.37	4.87	hil	1.33	3.43
2062	2.49	7.38	Δυσ	1.33	2.94
Jan	2.22	4.89	Sen	1.23	2.50
Eeb	2.22	7.80	Jep Oct	1.30	3.73
Mar	3.27	6.80	New	1.39	3.88
Anr	3.27	0.05	Nov	4.55	19.81
May	3.42	10.04	Dec	3.80	13.97
iviay	2.96	10.04	Total general	3.02	8.19

Figura 75: Series de caudales futuros según el ensemble



	Qmáx La	Qmáx	Qmín La	Qmín
PROMEDIO (cms)	Cohilla	Palombera	Cohilla	Palombera
1985	13.90	127.20	0	0
1986	9.70	55.40	0.4	0.4
1987	42.60	111.50	0.7	0.6
1988	31.30	98.00	1.3	1.3
1989	9.70	68.80	0.6	0.6
1990	17.60	123.80	1	1.1
1991	14.20	134.80	0.7	0.6
1992	8.80	75.30	0.8	0.8
1993	15.00	80.80	0.9	1
1994	6.20	46.70	0.6	0.7
1995	9.40	62.60	0.6	0.6
1996	7.90	74.80	1	0.9
1997	6.20	47.50	0.5	0.4
1998	5.30	68.90	0.5	0.5
1999	9.30	75.30	0.8	0.8
2000	6.70	67.80	0.3	0.3
2001	9.00	68.80	0.5	0.5
2002	6.20	44.70	0.6	0.6
2003	7.10	49.00	0.5	0.5
2004	6.40	69.80	1.1	1
Total general	42.60	134.80	0	0

Figura 76: Valores de caudal máximo y mínimo anual en el periodo 1985-2005 en la Cohilla y en Palombera

	Qmáx La	Qmáx	Qmín La	Qmín
Promedio (cms)	Cohilla	Palombera	Cohilla	Palombera
2045	8.60	86.60	0.00	0.00
2046	9.90	48.80	0.40	0.40
2047	44.00	116.60	0.50	0.50
2048	22.90	70.00	1.00	1.10
2049	10.20	47.40	0.50	0.50
2050	18.60	130.00	0.80	0.90
2051	14.30	140.10	0.60	0.50
2052	7.80	72.20	0.80	0.70
2053	16.10	85.70	0.90	0.90
2054	6.20	39.20	0.40	0.60
2055	9.40	63.60	0.50	0.50
2056	8.10	78.10	0.80	0.80
2057	6.20	47.80	0.40	0.40
2058	4.60	71.30	0.40	0.40
2059	9.20	78.50	0.70	0.70
2060	6.70	49.20	0.20	0.30
2061	9.10	71.40	0.40	0.50
2062	6.30	45.50	0.50	0.50
2063	7.10	49.80	0.30	0.40
2064	6.20	72.10	0.80	0.90
Total general	44.00	140.10	0.00	0.00

Figura 77: Valores de caudal máximo y mínimo anual en el periodo 2045-2065 en la Cohilla y en Palombera





D Hidrogramas y distribuciones gamma





Figura 79: La Cohilla 2045-2065, MPI-ESM-MR



Figura 80: La Cohilla 2045-2065, MRI-CGCM3

Alfa	2.31
Beta	1.36
Media	3.14
Moda	1.78
Desviación típica	2.06
Varianza	4.25
Q máximo (m^3/s)	60.3
Q mínimo (m^3/s)	0

Cuadro 17: La Cohilla 2045-2065, GDL-CM3

Alfa	2.15
Beta	1.39
Media	2.97
Moda	1.59
Desviación típica	2.03
Varianza	4.12
Q máximo (m^3/s)	57.6
Q mínimo (m^3/s)	0

Cuadro 18: La Cohilla 2045-2065, MPI-ESM-MR

Alfa	1.69
Beta	1.57
Media	2.65
Moda	1.08
Desviación típica	2.04
Varianza	4.15
Q máximo (m^3/s)	32.8
Q mínimo (m^3/s)	0

Cuadro 19: La Cohilla 2045-2065, MRI-CGCM3



D. HIDROGRAMAS Y DISTRIBUCIONES GAMMA



Figura 81: Palombera 2045-2065, GDL-CM3



Figura 82: Palombera 2045-2065, MPI-ESM-MR



Figura 83: Palombera 2045-2065, MRI-CGCM3

Alfa	1.07
Beta	7.66
Media	8.17
Moda	0.51
Desviación típica	7.91
Varianza	62.54
Q máximo (m^3/s)	179.3
Q mínimo (m^3/s)	0

Cuadro 20: Palombera 2045-2065, GDL-CM3

Alfa	1.02
Beta	7.59
Media	7.73
Moda	0.14
Desviación típica	7.66
Varianza	58.69
Q máximo (m^3/s)	171.5
Q mínimo (m^3/s)	0

Cuadro 21: Palombera 2045-2065, MPI-ESM-MR

Alfa	0.88
Beta	7.74
Media	6.83
Moda	0
Desviación típica	7.27
Varianza	52.83
Q máximo (m^3/s)	164.6
Q mínimo (m^3/s)	0

Cuadro 22: Palombera 2045-2065, MRI-CGCM3