



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS



# Análisis de impactos y adaptación al cambio climático en el sistema del río Júcar: Impacto del cambio climático en las sequías meteorológicas, edáficas e hidrológicas en la cuenca del Júcar

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

**Memoria**

*Titulación:* Grado en ingeniería de obras públicas  
*Curso:* 2014/15

*Autor:* Vargas Zamora, Francisco

*Tutor:* Pulido Velázquez, Manuel Augusto

*Cotutor:* García Prats, Alberto

*Tutor experimental:* López Nicolás, Antonio

*Valencia, Septiembre de 2015*



## Agradecimientos.

Quisiera agradecer a las personas que me han ayudado en la realización de mi trabajo final de grado, por la dedicación que me han prestado siempre que lo he necesitado, proporcionándome la información necesaria, así como por resolver las dudas que me han surgido.

Me gustaría hacer mención especial a mi tutor, Manuel Augusto Pulido Velázquez, por su entrega e interés que sobradamente ha quedado demostrado.

A mis padres y a mi hermano, ya que gracias a su apoyo incondicional he conseguido llegar hasta aquí.

Y finalmente, pero no por ello menos importante, a Marta Francés Martínez, por su paciencia y comprensión



# Índice

|   |    |
|---|----|
| <u>ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS</u> .....   | 7  |
| <br>  |    |
| CAPÍTULO 1 : <u>INTRODUCCIÓN.</u>   |    |
| 1.1 <u>Contexto y motivación.</u> .....   | 11 |
| 1.2 <u>Metodología y objetivos del estudio.</u> .....                                       | 12 |
| 1.3 <u>Estructura del documento.</u> .....  | 13 |
| <br>  |    |
| CAPÍTULO 2 : <u>CAMBIO CLIMÁTICO.</u>   |    |
| 2.1 <u>Introducción al cambio climático.</u> .....  | 15 |
| 2.2 <u>Modelos climáticos globales y regionales.</u> .....                                  | 16 |
| 2.3 <u>Escenarios y proyecciones.</u> .....   | 17 |
| 2.4 <u>Proyecto CORDEX.</u> .....   | 18 |
| <br>  |    |
| CAPÍTULO 3 : <u>CARACTERIZACIÓN DE SEQUÍAS.</u>   |    |
| 3.1 <u>Definición de sequías.</u> .....   | 21 |
| 3.2 <u>Tipos de sequías.</u> .....  | 22 |
| 3.3 <u>Indicadores de sequías.</u> .....  | 24 |
| <br>  |    |
| CAPÍTULO 4 : <u>CASO DE ESTUDIO. SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL RÍO JÚCAR.</u>                  |    |
| 4.1 <u>El sistema de explotación del río Júcar en C.H.J. Descripción de la cuenca</u> ..... | 27 |
| 4.2 <u>Caracterización de sequías en la cuenca.</u> .....                                   | 31 |
| 4.3 <u>Problemas E.T.I.</u> .....   | 35 |
| <br>  |    |
| CAPÍTULO 5 : <u>METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS.</u>   |    |
| 5.1 <u>Esquema general.</u> .....   | 37 |
| 5.2 <u>Caracterización hidrológica del sistema. Modelo lluvia-escorrentía.</u> .....        | 38 |
| 5.3 <u>Caracterización de sequías. Indicadores.</u> .....                                   | 42 |
| 5.4 <u>Generación de escenarios climáticos. Proyecto CORDEX.</u> .....                      | 44 |
| 5.5 <u>Evaluación del impacto del cambio climático en las sequías.</u> .....                | 45 |

|  |     |
|--|-----|
| CAPÍTULO 6 : <u>CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS.</u>  |     |
| 6.1 <u>Modelos lluvia escorrentía en las subcuencas del caso de estudio.</u>                                 | 47  |
| 6.2 <u>Caracterización de sequías. Escenario base (clima actual).</u>  | 49  |
| 6.2.1 <u>Análisis de las aportaciones.</u>   | 50  |
| 6.2.2 <u>Indicadores de sequías.</u>   | 53  |
| CAPÍTULO 7 : <u>ANÁLISIS DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS SEQUÍAS.</u>                                |     |
| 7.1 <u>Análisis de las aportaciones del sistema.</u>   | 59  |
| 7.2 <u>Impacto del cambio climático en el sistema Júcar. Comparativa de escenarios.</u>                      | 60  |
| CAPÍTULO 8 : <u>ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL RÍO JÚCAR.</u>               | 69  |
| CAPÍTULO 9 : <u>SÍNTESIS Y CONCLUSIONES.</u>   | 73  |
| REFERENCIAS  | 75  |
| ANEXO 1 : <u>MODELOS HIDROLÓGICOS CALIBRADOS PROPORCIONADOS POR EL D.I.H.M.A.</u>                            | 77  |
| ANEXO 2 : <u>MODELOS HIDROLÓGICOS CALIBRADOS</u>   | 87  |
| ANEXO 3 : <u>INDICADORES DE SEQUÍAS</u>  | 95  |
| ANEXO 4 : <u>MÉTODO ALTERNATIVO PARA EL CÁLCULO DE LAS SEQUÍAS EDÁFICAS CON EL CRITERIO ACTUAL DE SEQUÍA</u> | 109 |

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1: Cambios en la temperatura de la superficie terrestre y marina e incremento promedio del nivel del mar. (fuente: IPCC,2014).

Figura 2: Variación de emisiones de CO<sub>2</sub> de origen antrópico (fuente: Annex II: Climate System Scenario Tables 2013).

Figura 3: Gráfica con los efectos del forzamiento radiactivo efectivo debido a las emisiones (fuente: Grupo de trabajo I, IPCC, 2013).

Figura 4: Dominios del proyecto CORDEX (fuente: web del Grupo de Meteorología de Santander, disponible en: <http://www.meteo.unican.es/es/projects/CORDEX>, consulta Junio de 2015).

Figura 5: Desfase entre sequías (fuente: Stanley A. Changnon, Jr., 1987).

Figura 6 Diferentes sistemas de explotación de la Demarcación hidrográfica del Júcar.

Figura 7: Subcuencas en las que se ha dividido el sistema de explotación Júcar.

Figura 8: Aportaciones medias en régimen natural, estimadas con PATRICAL de los diferentes sistemas de explotación que componen la Demarcación. (fuente: web de C.H.J. disponible en: <http://www.chj.es/es-es/medioambiente/cuencahidrografica/Paginas/Hidrolog%C3%ADa.aspx>; consulta Julio 2015).

Figura 9: Magnitudes a identificar en teoría de rachas (fuente: Vujica Yevjevich, 1967).

Figura 10: Esquema de metodología propuesto.

Figura 11: Esquema conceptual de los procesos simulados por el modelo hidrológico escogido.

Figura 12: Gráfica mensual de calibración de la subcuenca de Contreras.

Figura 13: Gráfica anual de calibración de la subcuenca de Contreras.

Figura 14: Gráfica de calibración de la subcuenca de Contreras. Aportaciones medias mensuales.

Figura 15: Gráfica de validación de la subcuenca de Contreras. Aportaciones mensuales

Figura 16: Importancia relativa media de cada subcuenca frente a la aportación total del sistema.

Figura 17: Autocorrelograma de Contreras.

Figura 18: Autocorrelograma de Bellús

Figura 19: Autocorrelograma Forata.

Figura 20: Autocorrelograma de Alarcón.

Figura 21: Autocorrelograma de Molinar.

Figura 22: Autocorrelograma de Sueca.

Figura 23: Autocorrelograma de Tous.

Figura 24: Gráfica de S.P.I.-12 y S.P.E.I.-12. Subcuenca: Contreras.

Figura 25: Gráfica de S.P.I.-12 y S.P.E.I.-12. Subcuenca: Bellús.

Figura 26: Gráfica de S.H.I.-12. Subcuenca: Contreras.

Figura 27: Gráfica de S.H.I.-12. Subcuenca: Bellús.

Figura 28: Gráfica de S.Q.I.-12. Subcuenca: Contreras.

Figura 29: Gráfica de S.Q.I.-12. Subcuenca: Bellús.

Figura 30: Variación de las aportaciones medias anuales

Figura 31: Variación de las aportaciones medias anuales en el sistema de explotación del río Júcar.

Figura 32: Comparativa del parámetro intensidad de las sequías hidrológicas de los distintos escenarios estudiados.

Figura 33: Comparativa de la duración de las sequías hidrológicas en el caso de estudio.

Figura A.1.1: Calibración modelo subcuenca de Alarcón cabecera. Aportaciones mensuales.

Figura A.1.2: Calibración modelo subcuenca de Alarcón cabecera. Aportaciones anuales.

Figura A.1.3: Calibración modelo subcuenca de Alarcón cabecera. Aportaciones mensuales medias.

Figura A.1.4: Calibración modelo subcuenca de Alarcón intermedia. Aportaciones mensuales.

Figura A.1.5: Calibración modelo subcuenca de Alarcón intermedia. Aportaciones anuales.

Figura A.1.6: Calibración modelo subcuenca de Alarcón intermedia. Aportaciones mensuales medias.

Figura A.1.7: Calibración modelo subcuenca de Alarcón baja. Aportaciones mensuales.

Figura A.1.8: Calibración modelo subcuenca de Alarcón baja. Aportaciones anuales.

Figura A.1.9: Calibración modelo subcuenca de Alarcón baja. Aportaciones mensuales medias.

Figura A.1.10: Calibración modelo subcuenca de Molinar. Aportaciones mensuales.

Figura A.1.11: Calibración modelo subcuenca de Molinar. Aportaciones anuales.

Figura A.1.12: Calibración modelo subcuenca de Molinar. Aportaciones mensuales medias.

Figura A.1.13: Calibración modelo subcuenca de Sueca. Aportaciones mensuales.

Figura A.1.14: Calibración modelo subcuenca de Sueca. Aportaciones anuales.

Figura A.1.15: Calibración modelo subcuenca de Sueca. Aportaciones mensuales medias.

Figura A.2.1: Gráfica mensual de calibración de la subcuenca de Contreras.

Figura A.2.2: Gráfica anual de calibración de la subcuenca de Contreras.

Figura A.2.3: Gráfica de calibración de la subcuenca de Contreras. Aportaciones medias mensuales.

Figura A.2.4: Gráfica mensual de calibración de la subcuenca de Bellús.

Figura A.2.5: Gráfica anual de calibración de la subcuenca de Bellús.

Figura A.2.6: Gráfica de calibración de la subcuenca de Bellús. Aportaciones medias mensuales.

Figura A.2.7: Gráfica mensual de calibración de la subcuenca de Tous.

Figura A.2.8: Gráfica anual de calibración de la subcuenca de Tous.

Figura A.2.9: Gráfica de calibración de la subcuenca de Tous. Aportaciones medias mensuales.

Figura A.2.10: Gráfica mensual de calibración de la subcuenca de Forata.

Figura A.2.11: Gráfica anual de calibración de la subcuenca de Forata.

Figura A.2.13: Gráfica de calibración de la subcuenca de Forata. Aportaciones medias mensuales.

Figura A.2.14: Gráfica de validación de la subcuenca de Contreras. Aportaciones mensuales.

Figura A.2.15: Gráfica de validación de la subcuenca de Bellús. Aportaciones mensuales.

Figura A.2.16: Gráfica de validación de la subcuenca de Tous. Aportaciones mensuales.



Figura A.2.17: Gráfica de validación de la subcuenca de Forata. Aportaciones mensuales.

Figura A.3.1: Gráfica de S.P.I.-12 y S.P.E.I.-12. Subcuenca: Contreras.

Figura A.3.2: Gráfica de S.P.I.-12 y S.P.E.I.-12. Subcuenca: Bellús.

Figura A.3.3: Gráfica de S.P.I.-12 y S.P.E.I.-12. Subcuenca: Forata.

Figura A.3.4: Gráfica de S.P.I.-12 y S.P.E.I.-12. Subcuenca: Tous.

Figura A.3.5: Gráfica de S.P.I.-12 y S.P.E.I.-12. Subcuenca: Sueca.

Figura A.3.6: Gráfica de S.P.I.-12 y S.P.E.I.-12. Subcuenca: Molinar.

Figura A.3.7: Gráfica de S.P.I.-12 y S.P.E.I.-12. Subcuenca: Alarcón (cabecera).

Figura A.3.8: Gráfica de S.P.I.-12 y S.P.E.I.-12. Subcuenca: Alarcón (intermedia).

Figura A.3.9: Gráfica de S.P.I.-12 y S.P.E.I.-12. Subcuenca: Alarcón (final).

Figura A.3.10: Gráfica de S.H.I.-12. Subcuenca: Contreras.

Figura A.3.11: Gráfica de S.H.I.-12. Subcuenca: Bellús.

Figura A.3.12: Gráfica de S.H.I.-12. Subcuenca: Forata.

Figura A.3.13: Gráfica de S.H.I.-12. Subcuenca: Tous.

Figura A.3.14: Gráfica de S.H.I.-12. Subcuenca: Sueca.

Figura A.3.15: Gráfica de S.H.I.-12. Subcuenca: Molinar.

Figura A.3.16: Gráfica de S.H.I.-12. Subcuenca: Alarcón (cabecera).

Figura A.3.17: Gráfica de S.H.I.-12. Subcuenca: Alarcón (intermedia).

Figura A.3.18: Gráfica de S.H.I.-12. Subcuenca: Alarcón (final).

Figura A.3.19: Gráfica de S.Q.I.-12. Subcuenca: Contreras.

Figura A.3.20: Gráfica de S.Q.I.-12. Subcuenca: Bellús.

Figura A.3.21: Gráfica de S.Q.I.-12. Subcuenca: Forata.

Figura A.3.22: Gráfica de S.Q.I.-12. Subcuenca: Tous.

Figura A.3.23: Gráfica de S.Q.I.-12. Subcuenca: Sueca.

Figura A.3.24: Gráfica de S.Q.I.-12. Subcuenca: Molinar.

Figura A.3.25: Gráfica de S.Q.I.-12. Subcuenca: Alarcón (cabecera).

Figura A.3.26: Gráfica de S.Q.I.-12. Subcuenca: Alarcón (intermedia).

Figura A.3.27: Gráfica de S.Q.I.-12. Subcuenca: Alarcón (final).

Figura A.4.1: Comparación de los métodos de cálculo del indicador. Contreras RCP 4,5 corto plazo.

Figura A.4.2: Comparación de los métodos de cálculo del indicador. Contreras RCP 8,5 corto plazo.

Tabla 1: Bondad de ajuste de los modelos.

Tabla 2: Coeficientes de Hurst

Tabla 3: Resumen parámetros de sequías meteorológicas (histórico)

Tabla 4: Parámetros de sequías edáficas (histórico)

Tabla 5: Parámetros de sequías hidrológicas (histórico)

Tabla 6: Subcuenca de Contreras. Parámetros sequías meteorológicas (escenarios).

Tabla 7: Subcuenca de Bellús. Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

Tabla 8: Subcuenca de Forata. Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

Tabla 9: Subcuenca de Tous. Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

Tabla 10: Subcuenca de Alarcón (cabecera). Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

Tabla 11: Subcuenca de Alarcón (intermedia). Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

Tabla 12: Subcuenca de Alarcón (final). Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

Tabla 13: Subcuenca de Molinar. Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

Tabla 14: Subcuenca de Sueca. Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

Tabla 15: Subcuenca de Contreras. Parámetros sequías edáficas (escenarios)

Tabla 16: Subcuenca de Bellús. Parámetros sequías edáficas (escenarios)

Tabla 17: Subcuenca de Forata. Parámetros sequías edáficas (escenarios)

Tabla 18: Subcuenca de Tous. Parámetros sequías edáficas (escenarios)

Tabla 19: Subcuenca de Sueca. Parámetros sequías edáficas (escenarios)

Tabla 20: Subcuenca de Molinar. Parámetros sequías edáficas (escenarios)

Tabla 21: Subcuenca de Alarcón (cabecera). Parámetros sequías edáficas (escenarios)

Tabla 22: Subcuenca de Alarcón (intermedia). Parámetros sequías edáficas (escenarios)

Tabla 23: Subcuenca de Alarcón (final). Parámetros sequías edáficas (escenarios)

Tabla 24: Subcuenca de Contreras. Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

Tabla 25: Subcuenca de Bellús. Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

Tabla 26: Subcuenca de Forata. Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

Tabla 27: Subcuenca de Tous. Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

Tabla 28: Subcuenca de Sueca. Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

Tabla 29: Subcuenca de Molinar. Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

Tabla 30: Subcuenca de Alarcón (cabecera). Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

Tabla 31: Subcuenca de Alarcón (intermedia). Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

Tabla 32: Subcuenca de Alarcón (final). Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

Tabla 33: Caudal seguro de Contreras.

Tabla A.1.1: Bondad de ajuste de modelos D.I.H.M.A..

## Capítulo 1 : Introducción.

Este capítulo sirve para justificar el presente trabajo final del grado (T.F.G.). Se expresa por tanto la motivación para su desarrollo, los objetivos a cumplir así como la metodología de trabajo utilizada.

Por todos es sabido que en las últimas décadas, las acciones antrópicas consecuencia del desarrollo industrial, han originado la producción de gases de efecto invernadero. Muy probablemente como consecuencia de ello, se ha comenzado a observar un cambio en el clima, lo que supone unos impactos en los ecosistemas que existen en nuestro planeta.

El principal problema de este cambio climático, es sin duda, el aumento de temperaturas. Este aumento lleva asociado un cambio en el régimen de precipitaciones de las diferentes regiones de nuestro entorno.

Sin embargo, el cambio climático no afecta a todo el globo terrestre por igual. Según las previsiones, probablemente, la temperatura global en la atmósfera y en los océanos aumentará. Como consecuencia de ello, vendría asociado el incremento del nivel medio de los océanos. Sin embargo, no hay uniformidad en las regiones en cuanto a las precipitaciones se refiere. De acuerdo con las previsiones del escenario más gravoso contemplado en los estudios del IPCC, mientras que en las latitudes cercanas a los casquetes polares y en el pacífico ecuatorial parece indicar que habrá un aumento de las precipitaciones; en el resto de latitudes, así como en las zonas áridas y semiáridas subtropicales, parece ser que las precipitaciones decrecerán.

Una primera consecuencia de la alteración del régimen de precipitaciones es un cambio en los perfiles de humedad del suelo, de forma que las plantas que en él residen se verán afectadas, ya que puede ser más complicado obtener los nutrientes necesarios para ellas. De este modo puede agravarse el proceso de desertificación de diferentes zonas. Cabe incidir que los impactos que influyen en la flora, también inciden en la fauna, debido a la denominada cadena trófica, ya que los herbívoros se alimentan de ellas y una escasez vegetal puede traer asociada un descenso drástico de su población.

No tenemos que olvidar que según los datos del programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente (P.N.U.M.A.), se puede considerar que las áreas desérticas del planeta son ya el 35% de su superficie.

### 1.1. Contexto y motivación.

El agua es un recurso fundamental para el ser humano, tanto para la vida como para su desarrollo. Además es un bien escaso, que hay que preservar en óptimas condiciones para no comprometer a las generaciones futuras, esto es tener un desarrollo sostenible.

Hay que tener en cuenta también el carácter aleatorio de las precipitaciones, lo que provoca periodos de abundancia, pero también periodos de escasez conocidos como sequías.

Las sequías tienen un carácter lento y su avance es progresivo. De hecho, hasta que no se está

inmerso en ellas no se manifiestan. Además, históricamente en la península ibérica se han tenido graves problemas debido a las sequías. Se han producido problemas no sólo en el suministro del recurso en la agricultura, sino que también han supuesto un problema medioambiental grave ya que, debido a la escasez hídrica, se han tenido problemas por el deterioro de calidad de las aguas, así como desecado de ríos, y lo que más nos afecta, problemas en el abastecimiento a poblaciones, sobre todo en las cuencas del Sur de la península.

Según el R.D.L. 1/2001, de 20 de Julio, por el que se aprueba el texto refundido de la ley de aguas, en su artículo 60: *Orden de preferencia de usos*, se establece como uso prioritario el abastecimiento a poblaciones. Además, en el artículo 59 del mismo real decreto legislativo, se establece que *“los caudales ecológicos o demandas ambientales no tendrán carácter de uso a efectos de lo previsto en este artículo y siguientes, debiendo considerarse como una restricción que se impone con carácter general a los sistemas de explotación.”*

Se pone así de manifiesto la importancia de mantener el caudal ecológico frente a otros usos menos importantes, diferentes al abastecimiento a poblaciones. La mejor forma pues de evitar estos conflictos es atajar el problema de raíz, o lo que es lo mismo, actuar con la mayor celeridad posible y para esto se debe de establecer un plan de actuación en caso de necesidad, que esté bien detallado y que nos permita un suficiente tiempo de reacción ante este problema. Para ello, los organismos de cuenca, ya están desarrollando planes para mitigar estos efectos, como son, entre otros, el Plan especial de alerta y eventual sequía en la Confederación Hidrográfica del Júcar, (C.H.J, 2007).

Si a esto le añadimos el carácter imprevisible de las sequías, hace pensar que un estudio de la problemática futura es muy aconsejable, ya que puede ayudar al diseño de un portfolio de medidas, como construcción o modernización de infraestructuras, que tenga en cuenta los efectos del cambio climático para poder gestionar de una forma más eficiente el valioso recurso que es el agua y sin el cual no podemos vivir.

Se pretende así, mediante este trabajo final de grado tener acotados los impactos posibles en el sistema de explotación del Júcar, debidos al cambio climático, de forma que se puedan tomar las decisiones oportunas a su debido tiempo, minimizando así las consecuencias sociales, medioambientales y económicas, que de no ser así podrían ser desastrosas.

Para lograr este objetivo, se caracterizan diversos tipos de sequías tal como son las meteorológicas, las edáficas y las hidrológicas que más adelante se explicarán. Todas éstas se obtendrán para las diferentes subcuencas en las que se ha dividido el sistema de explotación del Júcar y para un periodo de tiempo lo suficientemente importante para notar los efectos que se pueden producir en las sequías debido al cambio climático, diferenciando entre corto plazo (hasta el año 2040) y medio plazo (hasta el año 2070) ambos incluidos.

## **1.2. Metodología y objetivos del estudio.**

El objetivo del presente trabajo final de grado es tener una metodología con la que poder tomar las decisiones oportunas en la futura planificación y gestión de los recursos hídricos en función de los impactos que pudiera generar el cambio climático en el sistema de explotación del Júcar

en cuanto a sequías se refiere. De esta forma se podrá tener tanto una estimación de la reducción de caudales del sistema así como la caracterización de las posibles sequías meteorológicas, edáficas e hidrológicas en un futuro a corto y medio plazo.

Primeramente se debe caracterizar hidrológicamente el sistema para lo que se ha empleado un modelo conceptual de lluvia-escorrentía tal como es el de Témez (Témez, 1977), utilizando para la simulación de la relación río-acuífero una doble rama de descarga. Este modelo se calibra para el periodo histórico introduciendo las precipitaciones y la evapotranspiración potencial del mencionado periodo histórico y se utiliza para obtener las variables hidrológicas a estudiar en los escenarios futuros contemplados, tras introducir en ellos las variables previstas para los posibles escenarios futuros.

El siguiente paso consiste en la obtención de los escenarios futuros climáticos, tanto de precipitación como de temperatura, para lo que se ha empleado el proyecto CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment), trabajando con los nuevos escenarios de cambio climático RCP's (IPCC, 2014).

Una vez obtenidas las variables hidrológicas de los modelos, tanto para el escenario histórico como para los futuros, se procede a calcular los índices estandarizados de sequías y a su comparación. Se realiza para la discretización territorial propuesta, esto es para las diferentes subcuencas estudiadas.

Estos índices estandarizados dan una idea en relación a la magnitud, intensidad, duración y número de ocurrencia de los diversos periodos temporales de escasez.

Por otro lado, para valorar los efectos de los cambios en los parámetros de las sequías, se obtiene el caudal seguro que puede proporcionar el embalse de Contreras comparando el escenario histórico con el de los posibles escenarios futuros para establecer unas propuestas de medidas de actuación.

### **1.3. Estructura del documento.**

Este trabajo se estructura en nueve capítulos que describen tanto la metodología empleada como los resultados obtenidos para el caso de estudio, finalizando con una síntesis y una serie de conclusiones del mismo.

En este capítulo 1 se ha puesto de manifiesto el contexto y la motivación para la realización del trabajo, así como unas pinceladas de la metodología empleada y de los objetivos que se persiguen con este estudio.

En el capítulo 2 se describe el cambio climático y sus efectos probables sobre el clima a escala global. Se da a conocer los modelos climáticos a escala global y regional, los escenarios de emisiones y forzamiento de radiación efectivo así como las proyecciones climáticas que se contemplan. Para finalizar se comenta el proyecto CORDEX

El capítulo 3 sirve para definir las sequías e identificar los diversos tipos que se pueden presentar analizadas en este trabajo, diferenciando entre las que se producen en un régimen natural y las que se originan en un régimen alterado por la acción humana. También se hace una

descripción del desfase temporal entre cada tipo de sequías. Para acabar, se presentan algunos de los indicadores más empleados para la caracterización de las sequías.

Se describe y caracteriza en el cuarto capítulo de este documento el caso de estudio, que se enmarca dentro de la Confederación Hidrográfica del Júcar (C.H.J.). Se procede a hacer una descripción general de la cuenca y a la forma de caracterizar las sequías en las subcuencas analizadas, mediante la aplicación de la teoría de rachas. Además, se tiene un apartado para los problemas E.T.I. de la cuenca caso de estudio.

El quinto capítulo es el que describe la metodología y herramientas utilizadas en este trabajo. Se procede a hacer un esquema general, así como la forma de caracterizar hidrológicamente la cuenca del caso de estudio.

En el capítulo 6 se analizan las sequías meteorológicas, edáficas e hidrológicas en el caso de estudio, para el periodo histórico, empleando los indicadores previamente presentados.

El séptimo capítulo es el que analiza y compara los diversos escenarios futuros contemplados con el histórico. Así se tiene una perspectiva global del problema en la cuenca de estudio.

La adaptación que se propone, se hace en el capítulo ocho, que intenta indicar una batería de medidas a utilizar en el caso de producirse las previsiones de este trabajo.

Para finalizar, el último capítulo, el noveno, es una síntesis y unas conclusiones generales del documento presentado.

## Capítulo 2 : Cambio climático.

### 2.1. Introducción al cambio climático.

Se define el cambio climático, según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1992), como *“cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”*.

Por otro lado, según el informe de síntesis “Cambio climático 2014” basado en los informes del IPCC, (IPCC, 2014) , el calentamiento climático es inequívoco y desde la década de los 50 muchos de los cambios observados no tienen precedentes en este milenio. Se ha producido un calentamiento global tanto en la atmósfera como en los océanos, la capa de nieve y hielo ha disminuido y el nivel del mar ha aumentado. Además, el mencionado informe indica que la influencia del ser humano en el cambio climático es clara, siendo las emisiones provocadas de forma antrópica de gases de efecto invernadero, tales como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), las más altas de la historia. Este aumento de las emisiones, junto con otros factores de efecto antrópico, es probablemente, la causa del calentamiento global en la segunda mitad del siglo XX.

A continuación se muestran unas gráficas, del informe anteriormente mencionado, que muestra la variación de la temperatura media tanto en la superficie terrestre como en los océanos, así como la variación promedio del nivel del mar.

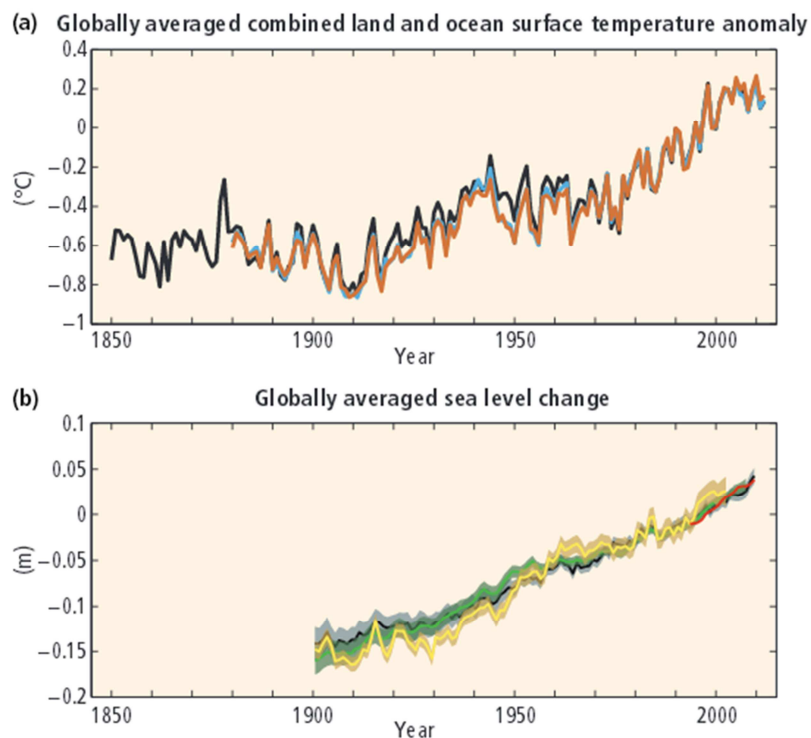


Figura 1: Cambios en la temperatura de la superficie terrestre y marina e incremento promedio del nivel del mar. (fuente: IPCC,2014)

## 2.2. Modelos climáticos globales y regionales.

Los modelos climáticos globales (M.C.G.) son una representación de los fenómenos que se producen a escala global mediante expresiones matemáticas que reproducen las variables del clima. Están basados en las leyes de la mecánica de fluidos y de la termodinámica. Son la base necesaria para analizar los posibles climas futuros. Estos se basan en unas estimaciones y proyecciones de emisiones para generar unos posibles escenarios futuros. Por tanto, estos modelos serán representativos en función de la fidelidad que sus cálculos sean capaces de proporcionar en las variables climáticas.

Estos modelos climáticos, parten de una serie de variables en condiciones naturales, como pueden ser la radiación solar o la cobertura vegetal entre otras, a las que añadiéndole las proyecciones de las variables debidas a la acción antrópica se generan los posibles escenarios futuros.

Para el 5º Informe de Evaluación del IPCC, (IPCC, 2014), se han definido diversos escenarios nuevos, conocidos como R.C.P. (por sus siglas en inglés) de “trayectorias de concentración representativas”. Consisten en el forzamiento de la radiación total en el año horizonte (2100) en relación con el año 1750, suponiendo diversos escenarios de incrementos como son  $2,6 \text{ W/m}^2$ ;  $4,5 \text{ W/m}^2$ ;  $6,0 \text{ W/m}^2$  y  $8,5 \text{ W/m}^2$ , siempre tomándose a título indicativo ya que puede variar entre los distintos modelos

Cabe mencionar que estos modelos sólo pueden reproducir el clima medio de las regiones de igual comportamiento climático para un periodo prefijado, pero no pueden reflejar los comportamientos a microescala. Esto es por su baja resolución, debido principalmente a problemas de cálculo causados por las limitaciones computacionales. Actualmente, los modelos globales tienen una discretización tanto en vertical como en horizontal, lo que quiere decir que se reproducen diversos modelos para la atmósfera, litosfera, etc. pudiendo llegar a unas 40 capas verticales de resolución que se acoplan en la generación de los modelos. En cuanto a la discretización espacial, las casillas pueden llegar a un centenar de kilómetros cuadrados.

Estas limitaciones en el tema de la resolución de la malla de los modelos globales obligan a la utilización de modelos regionales (M.C.R.). Para la generación de los modelos regionales, es necesario tener los modelos globales, ya que se apoyan en sus resultados, anidándolos a estos últimos, de modo que introduciendo las características climáticas propias de cada zona en particular tales como la orografía o los efectos de los climas extremos, se aplican a una zona más reducida del globo.

Mediante una bajada de escala, también conocida como downscaling, se pasa de una resolución grosera de los M.C.G. (de alrededor de  $100 \text{ km}^2$ ) a una escala mayor con la que se puede trabajar, dividiendo la zona en casillas de  $0,44^\circ$  o incluso  $0,11^\circ$ . Esto equivale aproximadamente a una discretización de  $40 \times 40 \text{ km}$  y  $11 \times 11 \text{ km}$  respectivamente.

Si bien es verdad que los modelos climáticos regionales tienen la ventaja de una mayor descripción de los procesos físicos en el área de estudio, también presentan las desventajas de necesitar un gran volumen de cálculo así como que las condiciones de contorno no están del todo definidas, debiéndose de interpolar para implementarlas en el modelo regional. Este hecho, podría plantear dudas en relación a los resultados obtenidos por este método de cálculo.



### 2.3. Escenarios y proyecciones.

Los escenarios y proyecciones utilizadas en el documento, son los que emplea el proyecto CORDEX. Estos están basados en los nuevos escenarios trayectorias de concentración representativas, R.C.P., del 5º informe de evaluación, IPCC AR5, (IPCC, 2014).

Este trabajo ha sido realizado, utilizando dos de los escenarios contemplados en el proyecto CORDEX. Se trata del RCP 4,5 y del RCP 8,5.

En el Anexo II del informe del grupo I para el IPCC AR5, “*Annex II: Climate System Scenario Tables*” (2013) se puede encontrar las emisiones antrópicas con las que se trabaja.

Se muestra a continuación la tabla All.2.1.C extraída del informe mencionado en las que se muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> debido a los combustibles fósiles y otras fuentes como la agricultura y los diversos usos del suelo.

Table All.2.1c | Anthropogenic total CO<sub>2</sub> emissions (PgC yr<sup>-1</sup>)

| Year              | RCP2.6 | RCP4.5 | RCP6.0 | RCP8.5 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| 2000 <sup>d</sup> | 8.03   | 8.03   | 8.03   | 8.03   |
| 2010 <sup>d</sup> | 9.70   | 9.48   | 9.32   | 9.98   |
| 2020 <sup>d</sup> | 9.97   | 10.20  | 9.37   | 12.28  |
| 2030 <sup>d</sup> | 8.00   | 11.06  | 9.57   | 14.53  |
| 2040 <sup>d</sup> | 5.30   | 11.46  | 10.80  | 17.33  |
| 2050 <sup>d</sup> | 3.50   | 11.15  | 12.52  | 20.61  |
| 2060 <sup>d</sup> | 2.10   | 9.60   | 14.46  | 23.83  |
| 2070 <sup>d</sup> | 0.81   | 7.27   | 16.29  | 26.17  |
| 2080 <sup>d</sup> | 0.16   | 4.65   | 17.07  | 27.60  |
| 2090 <sup>d</sup> | -0.23  | 4.22   | 14.94  | 28.44  |
| 2100 <sup>d</sup> | -0.42  | 4.13   | 13.82  | 28.77  |

Figura 2: Variación de emisiones de CO<sub>2</sub> de origen antrópico (fuente: Annex II: Climate System Scenario Tables, 2013)

Se pueden encontrar tablas análogas a la anterior en el informe del IPCC AR5, mencionado anteriormente, para otros gases de efecto invernadero tales como el metano, óxido nitroso y más. A estos valores de emisiones antrópicas se les añade los valores de emisiones naturales del sistema. Sin embargo, lo que caracteriza a estos escenarios es el forzamiento radiactivo efectivo (E.R.F.) originado por las emisiones analizadas.

A continuación se muestra una gráfica con los efectos del forzamiento radiactivo efectivo por causa los diferentes compuestos contemplados en las emisiones, también del informe del grupo I para el IPCC AR5.

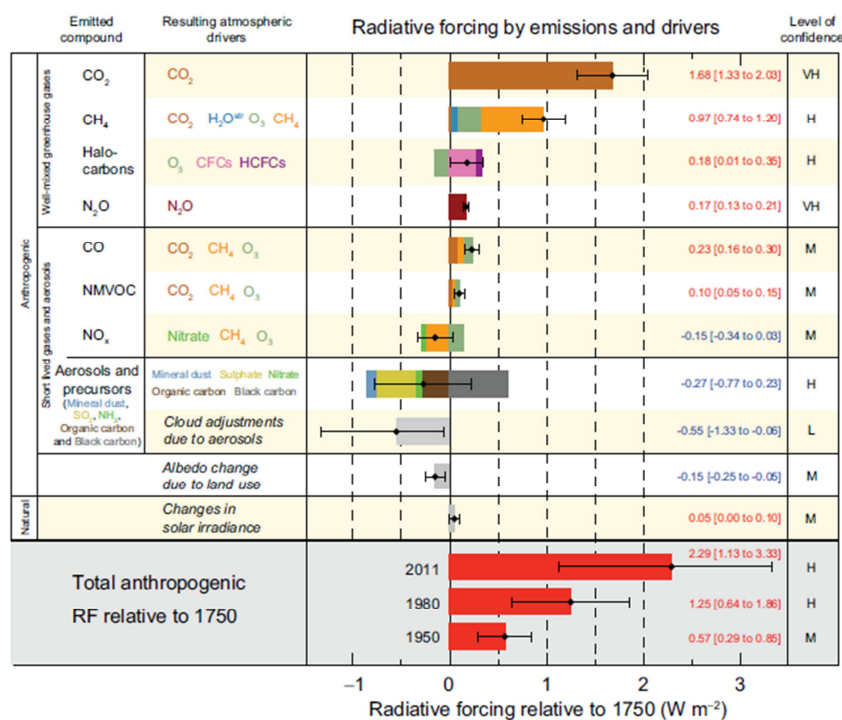


Figura 3: Gráfica con los efectos del forzamiento radiactivo efectivo debido a las emisiones (fuente: Grupo de trabajo I, IPCC, 2013)

La tabla anterior, debe de interpretarse como un incremento en la radiación solar que absorbe la tierra. Para ello se considera la variación para el año horizonte, que es el 2100, en relación con un año base, que es el 1750. Por otro lado, cabe señalar que estos valores son a título indicativo.

Las proyecciones previstas según el informe de grupo de trabajo I contribución para el 5º informe del IPCC, Climate change 2013, the Physical Science Basis indican, que parece ser que:

- La temperatura de la superficie terrestre aumentará en todos los escenarios contemplados para finales del siglo XXI.
- El contraste entre las precipitaciones en las regiones secas y las regiones húmedas del planeta serán aún más pronunciado.
- El aumento del nivel del mar es generalizado, afectando también a las corrientes marinas.
- Debido al aumento de las temperaturas de forma global, los glaciares del planeta sufrirán un retroceso.

## 2.4. Proyecto CORDEX.

El proyecto CORDEX nace con la intención de avanzar en la bajada de escala de los modelos climáticos regionales con la colaboración de personas de todo el mundo. Existen varios portales en diferentes países como Suecia, Dinamarca, Reino Unido, Francia, Alemania, España o India

desde donde descargarse los datos necesarios para los estudios. Su meta es la de proporcionar un marco de trabajo accesible a una amplia comunidad científica (Christensen et al., 2014).

Tal y como se ha comentado con anterioridad, se emplean los escenarios basados en los RCPs descritos en el apartado anterior. Se trabaja con un periodo de tiempo desde 1951 hasta 2100. Se suele dividir este amplio periodo en periodos de 30 años, de forma que se considera futuro a corto plazo el periodo 2011-2040, medio plazo el periodo 2041-2070 y largo plazo 2071-2100.

En este proyecto, se diferencian diversos dominios. Un dominio es cada una de las regiones del planeta en las que se divide el estudio de los modelos climáticos en este proyecto. Se distinguen catorce regiones de todo el planeta, que son las siguientes:

- América del Sur
- América central
- América del Norte
- Europa
- África
- Zona Sur de Asia
- Zona Este de Asia
- Asia central
- Oceanía
- Antártida
- Zona ártica
- Zona mediterránea
- Zona de Oriente Medio y Norte de África
- Sur-Este asiático

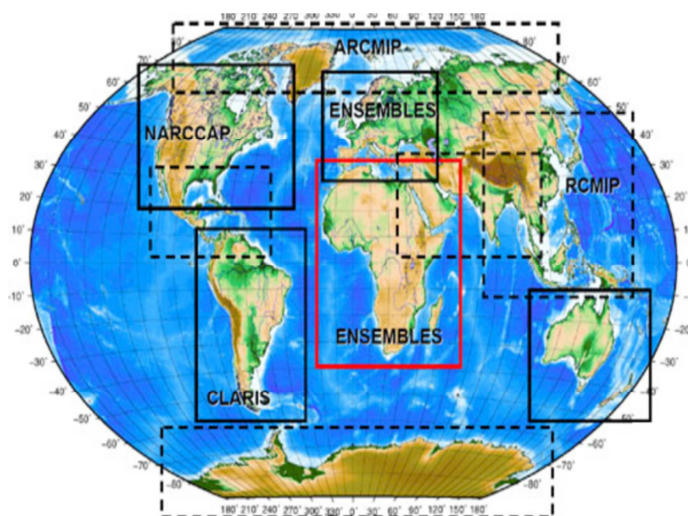


Figura 4: Dominios del proyecto CORDEX

(fuente: web del Grupo de Meteorología de Santander, disponible en: <http://www.meteo.unican.es/es/projects/CORDEX>, consulta Junio de 2015)



## Capítulo 3 : Caracterización de sequías.

### 3.1. Definición de sequía.

Hay que diferenciar la sequía de la aridez, ya que no son conceptos sinónimos, sino que existen diferencias entre ellos.

La definición de sequía, es algo complejo de abordar ya que las consecuencias de la escasez del recurso no afecta a todas las personas del territorio afectado por igual, y por lo tanto, no se pueden establecer unos criterios uniformes en la definición de su concepto.

Numerosos autores han intentado definir el concepto de sequía mas a pesar de ello, no existe una definición universal precisa. Entre otras definiciones, para ilustrar el comentario anterior, se han extraído algunas de las incluidas en el libro: Sequías. Teoría y prácticas. (García-Prats, 2010)

*“Palmer, 1966: Periodo de tiempo, generalmente de orden de meses o años de duración, durante los cuales la disponibilidad de humedad en un lugar dado consistentemente está por debajo de lo esperado climáticamente o de la disponibilidad de humedad apropiada para ese clima.”*

*“Gibbs, 1975: Falta de agua suficiente para satisfacer las necesidades, o los requerimientos dependientes de la distribución de plantas o población de animales o humana, su estilo de vida y el uso que hacen de la tierra.”*

*“Beran y Rodier, 1985: Sequía es un concepto relativo, pero su principal característica es una disminución de la disponibilidad de agua en un periodo en particular y en un área determinada en vez de un descenso general de las disponibilidades de agua.”*

*“USCE, 1994: Las sequías son periodos de tiempo durante los cuales los sistemas hídricos naturales intervenidos no proveen de suficiente agua para satisfacer los usos humanos y ambientales establecidos debido a la escasez natural de precipitaciones o escurrimientos.”*

Si por otro lado acudimos al diccionario de la R.A.E. en su 22ª edición con las enmiendas incorporadas hasta 2012 se definen los términos:

- Aridez: Cualidad de árido.
- Árido: Seco, estéril, de poco jugo y humedad.
- Sequía: Tiempo seco de larga duración.
- Seco: Dicho de un manantial, de un arroyo, de un río, de una laguna, etc.: Faltos de agua.

Estas definiciones no dicen mucho. Sin embargo, se puede entender que la aridez es una falta normal y continuada de precipitaciones en el clima y/o de la humedad del suelo permanente mientras que la sequía se puede entender como un periodo de tiempo con una anormal escasez hídrica comparado con los rasgos característicos del clima de la región objeto de estudio.

Además, lo realmente importante de las sequías son sus consecuencias. Su carácter lento y

progresivo hace que hasta que no estás inmerso en la sequía, no se tiene la evidencia de que ha comenzado. Por lo tanto, para paliar sus consecuencias es necesario un buen estudio del comportamiento del sistema y un estudio que trate de evaluar posibles escenarios futuros de ocurrencia de sequías, para así poder diseñar un programa de medidas adaptativas correspondiente.

### 3.2. Tipos de sequías.

Las sequías se pueden agrupar en diversos tipos en función de la parte del ciclo hidrológico donde aparezca la escasez del recurso. Teniendo en cuenta esto, se distinguen:

- Sequía meteorológica.
- Sequía agrícola.
- Sequía hidrológica.
- Sequía operativa.
- Sequía socioeconómica

Se puede categorizar las sequías nombradas anteriormente en originadas en el régimen natural y las que se dan en un régimen influenciado por acciones antrópicas.

Las sequías originadas en régimen natural son las siguientes:

- La sequía meteorológica, consiste en una escasez de precipitaciones. Una vez entendido esto, se tiene que observar que es la escasez de precipitaciones, ya que dependiendo de lo que entendamos por escasez de precipitaciones, se puede estar inmerso en sequía meteorológica o no. Obviamente, las precipitaciones en los diversos climas del planeta son diferentes. En algunas zonas, las precipitaciones son una constante con el paso del tiempo mientras que en otros las precipitaciones son un fenómeno estacional. A modo de ejemplo, no es lo mismo el clima mediterráneo de la cuenca del Júcar, que el clima de la cuenca del Amazonas. Por tanto la sequía meteorológica es un concepto relativo de la zona que en función de la normal situación de lluvias, podemos entender.  
En el caso de estudio del sistema de explotación del Júcar, puesto que se trata de un clima mediterráneo de marcado carácter estacional respecto a las precipitaciones, se entiende en este trabajo que la sequía meteorológica se producirá en función de una cierta desviación típica de la precipitación respecto a su media.
- La sequía agrícola, también denominada edáfica o hidroedáfica, es una deficiencia en la humedad del suelo respecto a las necesidades de la vegetación de la región. Es evidente que el tipo de vegetación así como el estado vegetativo de las plantas influyen en la sequía edáfica, ya que estas variables hacen que el consumo de agua de la planta varíe. De forma ilustrativa, señalo las diferencias en las necesidades entre el cultivo de arroz, común en el sistema de explotación del Júcar, que necesita una gran cantidad de agua para su crecimiento con respecto a las plantaciones de almendros o algarrobos, que es un cultivo de secano, así como también plantaciones cítricas como la naranja, que también se da

en diferentes áreas del caso de estudio. Este aspecto es el que hace que el sector primario sea el más afectado por este tipo de sequías.

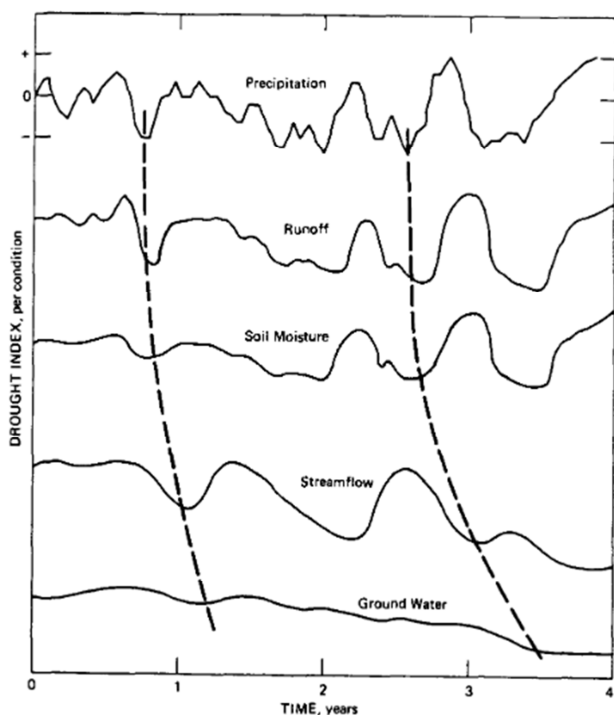
- La sequía hidrológica, está relacionada con la disponibilidad del recurso en el sistema hidrológico. Se está hablando así de la escasez del agua superficial (la que discurre por los ríos) y el agua subterránea (la disponible en los acuíferos).

Por último quedan las sequías que se dan en régimen influenciado por acciones antrópicas como son las que se citan a continuación:

- La sequía operativa, están definidas sobre periodos de tiempo en el que no existe una satisfacción en el suministro de agua para uno o diversos usos del agua, considerados fallos de suministro. Pueden ser consecuencia de 4 factores principales como la escasez de recurso, esto es sequía hidrológica, de la mala gestión del sistema de explotación, del mal diseño de las estructuras del sistema para su regulación y por causas de accidentes.
- La sequía socioeconómica, hace énfasis en el impacto socio-económico de la sequía. Se produce cuando la sequía daña a un sector económico de la región, mas no es necesaria la restricción del recurso.

Se debe de señalar también que entre estos diferentes tipos de sequías existe un desfase temporal.

En la figura 5, mostrada en la imagen inferior, se puede observar el desfase temporal de las diferentes sequías que se pueden producir en el sistema.



*Figura 5: Desfase entre sequías (fuente: Stanley A. Changnon, Jr., 1987).*

En primer lugar ocurre la sequía meteorológica, como consecuencia de la falta de precipitación.

A continuación la sequía edáfica, debida a la falta de humedad del suelo por la falta de escorrentía superficial / infiltración que le precede.

La siguiente es la sequía hidrológica, ya que al reducirse la aportación superficial, el caudal de los ríos se alimenta principalmente de las aportaciones subterráneas.

Para finalizar, se agrava la sequía hidrológica, ya que debido a la falta de precipitaciones, y por tanto de infiltración en el suelo, al descender el nivel de los acuíferos, se va reduciendo así la aportación subterránea a la red superficial

Por último señalar que, a medida que se va pasando de un tipo de sequía a otro, el desfase se va pronunciando más, particularmente en la sequía hidrológica, ya que está influyendo también la permeabilidad de los estratos de los acuíferos para su desagüe. En la imagen anterior, este efecto queda reflejado mediante las líneas discontinuas, que representan los desfases con los periodos de escasez originados por la sequía meteorológica.

### 3.3. Indicadores de sequías.

Para poder caracterizar las sequías en diferentes áreas, se necesita un parámetro indicativo de la misma, que sea representativo de la zona y comparable entre las diferentes regiones. Diversos autores han propuesto diferentes tipos de indicadores en función también del tipo de sequía analizada. Cabe mencionar que los parámetros adimensionales, en principio, son mejores que los que dependen de las unidades de la variable.

A continuación se pasa a describir una serie de índices comúnmente empleados para describir los diferentes tipos de sequías:

- **Porcentaje de lo normal,**

Se trata de los percentiles de la variable. Simplemente se trata de decidir un valor umbral, percentil, por debajo del cual se considera que estamos en sequía. Depende del país donde se utiliza, se establecen unos criterios u otros para la consideración de sequía.

- **Índice de las precipitaciones estandarizadas (S.P.I.),**

Se le denomina S.P.I. por sus siglas en inglés, Standardized Precipitation Index. Se trata de un índice ampliamente utilizado. Fue desarrollado por Mc Kee et al.(1993)La forma de trabajo de este índice consiste en ajustar los valores de la precipitación a una distribución gamma,, asociándose cada valor de precipitación a una cierta probabilidad acumulada, que tras un proceso de normalización de la serie, se asocia el valor de la precipitación a una cierta probabilidad de ocurrencia.

Normalmente, el S.P.I., en su cálculo se puede discretizar en diferentes periodos de tiempo, agregando la variable en diferentes agrupaciones temporales, generalmente, 1, 3, 4, 6 y 12 meses. El valor del S.P.I. indica la variación de la variable con respecto a la media referida al número de veces la desviación típica estándar.

- **Índice de severidad de Palmer (P.D.S.I.),**

Con este índice se pueden medir los aportes de humedad al suelo. Se basa en la idea del balance hídrico de forma que toma diferentes variables como la evapotranspiración potencial (ETP), la recarga, la escorrentía, etc.

Se calcula a partir de la precipitación y temperatura mensuales medias así como de una estimación de la capacidad de humedad en el suelo.



Durante muchos años, ha sido el único índice para analizar el fenómeno de las sequías por lo que llegó a ser muy conocido.

Sin embargo, también presenta una serie de limitaciones como son entre otras que la capacidad de humedad del suelo se obtiene por aproximación, o que existe un desfase entre la precipitación y el resto de procesos del ciclo hidrológico como la escorrentía o la recarga.

- **Índice de suministro de aguas superficiales (S.W.S.I.),**

Este índice fue desarrollado a principios de los años 80 por Shafer, B.A. y L.E.Dezman en el estado de Colorado, U.S.A.

Se suele utilizar donde el índice de Palmer no reproduce bien las características climáticas de la región, como son las zonas con frecuente ocurrencia de nevadas. También donde el abastecimiento de aguas procede de masas superficiales.

- **Índice de humedad de los cultivos (C.M.I.),**

Al igual que el P.D.S.I, este índice fue desarrollado por Palmer. Sus siglas son el acrónimo de Crop Moisture Index. Su enfoque es meteorológico para obtener la humedad disponible para los cultivos de forma semanal.

El C.M.I. para su aplicación, va corrigiendo los valores de la semana anterior en función de los valores actuales de las variables hidrológicas.

Cabe destacar que no es un buen índice para estudiar las sequías a largo plazo, ya que al terminar la temporada de cultivos, el índice se hace nulo y comienza de nuevo para la campaña siguiente, siendo totalmente indiferente en relación a si arrastra una sequía o no de la temporada pasada. Este detalle es el que hace que no sea un buen indicador a largo plazo, ya que se pierde la información de una campaña de cultivo a otra.

- **Índice de Vegetación de las Diferencias Normalizadas (N.D.V.I.),**

Se obtiene de la información obtenida por los radiómetros instalados en el satélite N.O.A.A. de los Estados Unidos. Estos radiómetros trabajan con la reflectancia lumínica que provoca la vegetación, midiendo en una banda el rango visible y en otro el rango de infrarrojos. En función de la reluctancia en uno y otro rango, se puede deducir la humedad de la vegetación.

- **Índice de Sequía Oferta-Demanda (S.D.D.I.),**

De sus siglas en inglés, Supply-Demand Drought Index, creado por Rind et al (1990). Es similar al P.D.S.I. sin embargo es un índice más sencillo de obtener. Sin embargo, es un índice que no se puede comparar entre las diferentes regiones del planeta, ya que se calcula región a región, pudiéndose obtener valores más marcados en zonas húmedas que en zonas áridas.

- **Índice de precipitaciones-evapotranspiración estandarizadas (S.P.E.I.),**

El SPEI o Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (Vicente-Serrano et al., 2010), al igual que con el S.P.I. se pueden obtener las principales características de las sequías, como son la magnitud, intensidad, duración y el número de ocurrencia de las mismas apoyándose en la teoría de rachas. Es sencillo de calcular y admite discretizaciones tanto mensuales como semanales. Su valor también indica la variación de la variable con respecto a la media referida al número de veces la desviación típica estándar.

Las principales diferencias con el S.P.I. son las siguientes:

- La diferencia principal con el S.P.I es que se tiene en cuenta el efecto de la evapotranspiración, de hecho, la variable que se analiza es una composición de precipitación y evapotranspiración (P-ETP).
- La función de probabilidades empleada para ajustar los datos de las variables es una log-logística de tres parámetros en vez de usar la gamma como hace el S.P.I.

## Capítulo 4 : Caso de estudio. Sistema de explotación del río Júcar.

### 4.1. El sistema de explotación del río Júcar en C.H.J. Descripción de la cuenca.

El ámbito territorial Demarcación Hidrográfica del Júcar quedó definido en el R.D. 125/2007, de 2 de febrero en su artículo 2, apartado 3, de la siguiente forma:

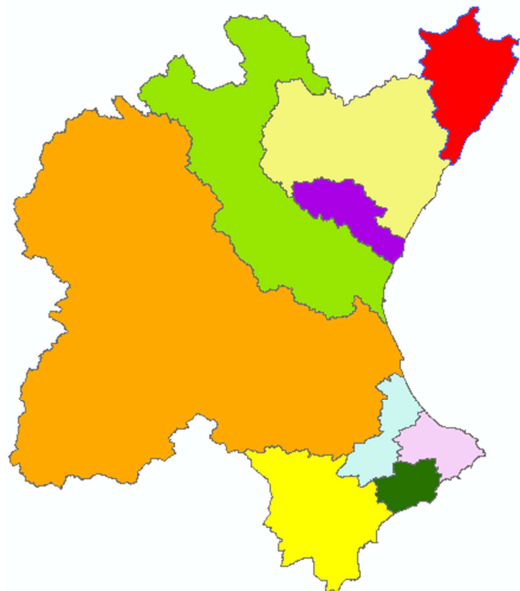
*“Comprende el territorio de las cuencas hidrográficas que vierten al mar Mediterráneo entre la margen izquierda de la Gola del Segura en su desembocadura y la desembocadura del río Cenia, incluida su cuenca; junto con sus aguas de transición. Quedan excluidas las cuencas intracomunitarias de la Comunidad Valenciana, así como las aguas de transición a ellas asociadas. Las aguas costeras tienen como límite sur la línea de orientación 100º que pasa por el límite costero entre los términos de Elche y Guardamar del Segura y como límite norte la línea con orientación 122,5º que pasa por el extremo meridional de la playa de Alcanar. Quedan excluidas las aguas costeras asociadas a la fachada litoral de las cuencas intracomunitarias de la Comunidad Valenciana”.*

El sistema de explotación del río Júcar forma parte de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, tal y como señala el plan hidrológico de cuenca de Julio de 2014, en el que divide Demarcación Hidrográfica del Júcar en los siguientes sistemas de explotación:

- Sistema de explotación Cenia – Maestrazgo
- Sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón
- Sistema de explotación Palancia – Los Valles
- Sistema de explotación Turia
- Sistema de explotación Júcar
- Sistema de explotación Serpis
- Sistema de explotación Marina Alta
- Sistema de explotación Marina Baixa
- Sistema de explotación Vinalopó – Alicante

Cabe destacar que de los anteriores sistemas de explotación que conforman la Demarcación Hidrográfica del Júcar, el sistema de explotación Júcar es el más importante de todos ellos. Comprende diferentes ámbitos administrativos, en mayor o menor medida, como son las provincias de Cuenca y Albacete en Castilla la Mancha así como Valencia en la Comunidad Valenciana.

Este sistema de explotación, tal y como señala el plan hidrológico de cuenca, alberga el 23% de la población total de la Demarcación.



**Figura 6: Diferentes sistemas de explotación de la Demarcación hidrográfica del Júcar**

## Descripción general de la cuenca.

Se tiene que tener en cuenta que el sistema de explotación del Júcar comprende las cuencas del río Júcar y de sus afluentes principales, como son Cabriel, Magro, Sellent y Albaida. La superficie de este sistema de explotación, tal y como establece el actual plan de cuenca, es de 22.261 km<sup>2</sup>. Presenta más de 140 masas de agua superficial, de longitud total de 2.900 km, así como más de 40 masas de agua subterránea, aunque no todas están integradas totalmente en la demarcación.

En la realización de este trabajo final de grado, se ha dividido el sistema en las siguientes subcuencas:



*Figura 7: Subcuencas en las que se ha dividido el sistema de explotación Júcar.*

Así queda, por tanto, el sistema dividido en 9 subcuencas a analizar.

Se pasa ahora a describir, de forma general, el sistema en cuanto a su climatología, a la red fluvial y a la cobertura vegetal.

- Climatología:

Los veranos cálidos, donde se registran las temperaturas máximas entre los meses de Julio y de Agosto, así como los inviernos suaves típicos de la cuenca del Júcar, son rasgos característicos del clima mediterráneo de la región. Siendo la temperatura media de la cuenca de unos 15 °C. Por otro lado, la orografía de la cuenca, específicamente la cordillera ibérica, crea sutiles diferencias en los rasgos climáticos en diversas subregiones de la cuenca ya que constituye un efecto barrera a la acción del viento, y de esta forma en parte de la precipitación.

La precipitación media es de unos 500 mm, sin embargo, tal y como se ha mencionado anteriormente, no se reparte homogéneamente. Existen regiones, al Sur de la capital de la Comunidad Valenciana, en la que las precipitaciones pueden alcanzar valores de hasta 650 mm. En contraste con esto, podemos encontrar zonas como la de Albacete, en la que lo normal es disponer de una precipitación media de unos 300 mm.

Es destacable mencionar que se pueden generar celdas convectivas que hacen que las precipitaciones de la cuenca sean de gran intensidad y de corta duración en algunas épocas del año, conocidas como gota fría, que puede provocar inundaciones, así como problemas de erosión en los suelos.

Para acabar, recordar también los efectos que estos aguaceros históricamente han supuesto graves daños. Como ejemplos tenemos la “*riuà*” del año 1957 y “*la pantanà*” de 1982, esta última supuso la rotura de la presa de Tous. Ambos sucesos se tradujeron en una gran catástrofe para la población que vivía en la zona.

- Red fluvial:

El sistema de explotación del Júcar dispone de prácticamente la mitad de las masas superficiales categorizadas como río de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. En concreto, dispone de 141 masas de agua superficiales categorizadas como río de las 304 de las que existen en la demarcación.

Su principal río es el Júcar, que tiene una longitud de 512 km, que tras nacer en la cordillera ibérica, concretamente en los montes Universales en la provincia de Cuenca, desemboca en el mar Mediterráneo. Debido al clima mediterráneo de la región, este río presenta periodos secos en la estación estival, mientras que experimenta un aumento en su caudal en los meses de otoño. Sus principales afluentes son los ríos Cabriel, donde se encuentra una de las presas más importantes del sistema, la presa de Contreras, el río Magro, el Sellent y el Albaida. Además de ser el sistema de explotación de mayor superficie, este sistema también es el que tiene unas aportaciones mayores en toda la Cuenca Hidrográfica del Júcar, que representa casi la mitad de las mismas, tal y como se

muestra en la siguiente tabla:

| Sistemas de explotación           | Aportaciones medias Régimen Natural (hm <sup>3</sup> /año)<br>1980/81-2005/06 |
|-----------------------------------|---|
| <b>Cenia-Maestrazgo</b>           | 174   |
| <b>Mijares-Plana de Castellón</b> | 365   |
| <b>Palancia-Los Valles</b>        | 83  |
| <b>Turia</b>                      | 416   |
| <b>Júcar</b>                      | 1.489   |
| <b>Serpis</b>                     | 165   |
| <b>Marina Alta</b>                | 120   |
| <b>Marina Baja</b>                | 58  |
| <b>Vinalopó-Alacantí</b>          | 64  |
| <b>TOTAL CHJ</b>                  | 2.934   |

Estimación de aportaciones medias en régimen natural de la red fluvial

*Figura 8: Aportaciones medias en régimen natural, estimadas con PATRICAL de los diferentes sistemas de explotación que componen la Demarcación. (fuente: web de C.H.J. disponible en: <http://www.chj.es/es-es/medioambiente/cuencahidrografica/Paginas/Hidrolog%C3%ADa.aspx>; consulta Julio 2015)*

- Cobertura vegetal:

Si a las características del clima en la cuenca, se le añade el efecto de la deforestación producida para ampliar los campos de cultivo en los últimos tiempos, la actividad ganadera, así como los incendios ocurridos recientemente, como por ejemplo el de Cortes de Pallás en el año 2012 que arrasó cerca de 30.000 hectáreas de arbolado y matorrales, se tiene un grave problema de erosión en la cuenca. Debido a la pérdida de vegetación, las precipitaciones de tipo convectivo, frecuentes en este tipo de región, provocan una degradación mayor en el suelo ya que arrastran la capa orgánica del mismo que sirve de alimento a las plantas que en él radican.

Las consecuencias de todo esto es que, se tenga un terreno con características semiáridas, donde abundan especies vegetales adaptadas a estas condiciones tales como el pino y la carrasca como especies arbóreas. Por otro lado, otras especies vegetales como el romero y el tomillo entre otras y por último, la única especie de palmera autóctona de la península, el palmito.

## 4.2. Caracterización de sequías en la cuenca.

Para caracterizar las sequías en el sistema de explotación del Júcar, se ha decidido emplear el S.P.I. como índice para la obtención de las mismas. Aunque originalmente desarrollado para sequías meteorológicas, es empleado para obtener tanto las sequías meteorológicas, edáficas así como las hidrológicas. Para ello, lo único que hay que hacer es obtener la probabilidad de ocurrencia de cada una de las variables a considerar, que en el caso de este trabajo final de grado serán la precipitación (P), la humedad del suelo (H) y por último, la aportación (Q) de cada una de las subcuencas analizadas. De esta manera, los índices se nombran S.P.I., S.H.I. y S.Q.I. por ese orden.

Una vez obtenidos estos índices, se les aplicará la teoría de rachas para la consideración de si estamos en un periodo húmedo o bien si se trata de sequía.

Se pasa a continuación a describir la forma de calcular el indicador estandarizado así como a describir la teoría de rachas.

### 4.3.1 Cálculo del indicador de referencia.

El procedimiento para la obtención de los 3 indicadores es análogo. Únicamente cambia la variable a considerar.

El primer paso se trata de obtener la probabilidad asociada a la ocurrencia de cierta precipitación. Este indicador supone que las variables se distribuyen conforme a una distribución tipo Gamma cuya función de densidad es:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Se puede obtener el valor de los parámetros anteriores con las siguientes expresiones:

$$\alpha = \frac{1}{4 \cdot A} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot A}{3}} \right)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(x_i)}{n}$$

Se obtiene así que la probabilidad acumulada de que la variable analizada sea un valor concreto sigue la siguiente función:

$$G(x) = \int g(x) \cdot dx = \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \int x^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}} \cdot dx$$

Sin embargo, hay que hacer notar que las variables que se pretenden estudiar sí pueden llegar a ser nulas en algún momento, generando así un evidente problema matemático. Este problema se solventa creando una función mixta, sumando la probabilidad de obtener un valor nulo y la probabilidad de obtener un valor no nulo. Así se tiene que:

$$H(x) = q + (1 - q) \cdot G(x)$$

Donde el valor “q” representa la probabilidad de obtener un valor nulo.

En el segundo paso, lo que hay que hacer es transformar esta distribución Gamma a una distribución normal estandarizada mediante el proceso de cálculo que propusieron Abramowitz y Stegun (1965), en el que para obtener el valor del índice estandarizado se aplica una formulación diferente en función del valor de H(x).

Para obtener el valor del SPI, se define el parámetro “t” como sigue:

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{[H(x)]^2}\right)} \rightarrow H(x) \in [0.0; 0.5]$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1 - H(x))^2}\right)} \rightarrow H(x) \in ]0.5; 1.0]$$

Para finalizar, se tiene que:

$$\text{Si } 0.0 < H(x) \leq 0.5 \quad Z = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t}{1 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2 + d_3 \cdot t^3}\right)$$

$$\text{Si } 0.5 < H(x) < 1.0 \quad Z = +\left(t - \frac{c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t}{1 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2 + d_3 \cdot t^3}\right)$$

Siendo los siguientes valores:

$$c_0 = 2.515517$$

$$c_1 = 0.802853$$

$$c_2 = 0.010328$$

$$d_1 = 1.432788$$

$$d_2 = 0.189269$$

$$d_3 = 0.001308$$



Hay que recordar el concepto de lo que significa el indicador, tal como se comenta en la página 24 de este mismo trabajo:

*“El valor del S.P.I. indica la variación de la variable con respecto a la media referida al número de veces la desviación típica estándar”.*

#### 4.3.2 Teoría de rachas.

Con la teoría de rachas o “runs theory” en inglés, se realiza un análisis cuantitativo de las sequías. Vujica Yevjevich (1967) fue quien propuso una de las primeras aplicaciones de esta teoría al fenómeno de las sequías. Este procedimiento es interesante ya que analiza la serie en conjunto así como también cada uno de los valores individuales de la misma.

Para entender bien la teoría de rachas, se presentan una serie de definiciones:

- **Racha:** Una racha es una secuencia de valores en la serie con la misma categorización, que son precedidas por otra secuencia de diferente clase.
- **Sequía:** Es una racha en la que el valor observado de la serie es menor que un cierto umbral prefijado.

Se plantea en esta teoría analizar las sequías basándose en la variación espacio-tiempo de la variable a estudiar. Se establece un umbral a partir del cual se va a considerar que se está en un periodo de sequía. Sin embargo, en este trabajo, no se analizará el valor bruto de la variable, sino que se realizará a partir del índice estandarizado propuesto en el apartado anterior, según se trate de P, H, o Q la variable a estudiar.

Las características de las sequías analizadas con esta teoría son:

- **Inicio:** es el momento en el cual el déficit de la variable comienza a ser importante.
- **Fin:** es el instante en el cual, debido a un suceso de precipitaciones, la escasez del recurso ya no es de importancia.
- **Duración:** se define como duración de la sequía el periodo en el cual, se está ininterrumpidamente en una situación de déficit de la variable estudiada.
- **Intensidad:** mide la intensidad de la sequía. Para este trabajo final de grado resulta ser el máximo de los déficits dentro de una sequía, aunque existen otros autores que consideran la intensidad como el cociente entre la magnitud y la duración del evento.
- **Magnitud:** es la cantidad faltante de recurso para considerar que no se está en un periodo de sequía. Dicho de otra forma, la suma de los déficits ocurridos durante el inicio y el fin de cada sequía.

Además de todo esto, puesto que se hace un análisis espacio-temporal de toda la serie, se puede obtener el número de sequías para un periodo determinado (por ejemplo 30 años), de esta forma nos podemos hacer una idea de la dependencia temporal de la sequía.

Se muestra a continuación un gráfico contenido en la publicación: "Hydrology papers, Colorado State University, Fort Collins Colorado." Titulado "An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic drought" del creador de la teoría propuesta Vujica Yevjevich publicado en Agosto de 1967.

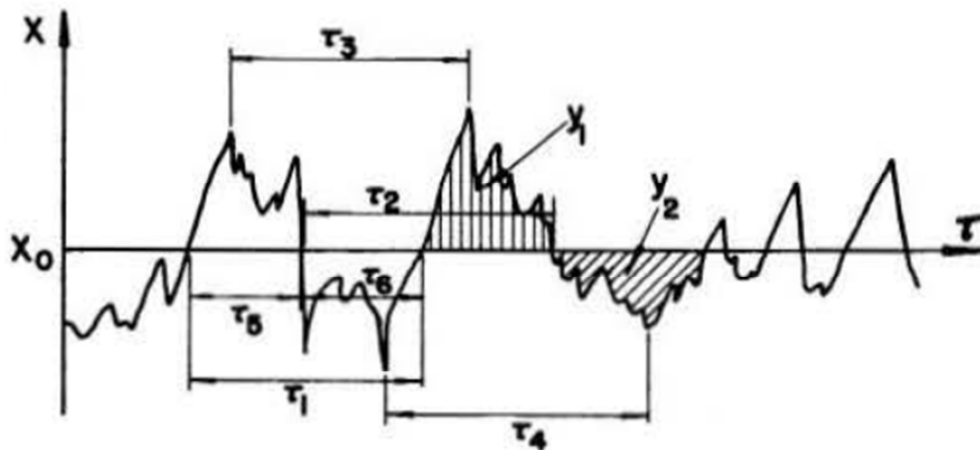


Figura 9: Magnitudes a identificar en teoría de rachas (fuente: Vujica Yevjevich, 1967)

Como se aprecia en el diagrama anterior, se puede obtener una muy valiosa información para la gestión de los recursos hídricos en una cuenca hidrográfica.

Por otro lado, la comparación de las características de las sequías entre las diferentes regiones del entorno es inmediata.

En la aplicación de la teoría de rachas, se aplica el truncamiento de la serie. Esto se consigue obteniendo los percentiles de la curva de la variable con una discretización mensual.

Los percentiles son una medida de posición de tipo no central que divide la serie en un conjunto de valores. Los percentiles dividen la serie en 100 partes iguales.

Cuando los datos no están agrupados en una tabla de frecuencias, primero se debe de localizar el percentil dentro de la muestra.

Para ello, se ordenan los datos de mayor a menor y a continuación, en función de si la serie tiene un número par o impar de datos, se aplica las siguientes fórmulas:

$$y = \frac{A \cdot n}{100} \rightarrow \text{Si } n \text{ es par} \qquad y = \frac{A \cdot (n+1)}{100} \rightarrow \text{Si } n \text{ es impar}$$

Donde la "y" representa la posición del percentil referida a los datos ordenados. Siendo A el percentil a obtener.

En el caso de disponer los valores agrupados en una tabla de frecuencias, lo que se debe de hacer es aplicar la siguiente fórmula:

$$P_x = l_i + \frac{P - f_{a-1}}{f_1} \cdot l_c$$

### 4.3. Problemas E.T.I. (Esquema de temas Importantes, CHJ)

Se considera un problema importante en materia de gestión hídrica cuando este problema pone en riesgo la consecución de los objetivos marcados en la planificación. Estos puntos se evalúan con la ayuda de la participación pública. Tal y como señala el Esquema de Temas importantes para la planificación hidrológica en la demarcación hidrográfica del Júcar (C.H.J., 2013), los puntos más importantes son los que se muestran a continuación:

- 1) Usos del agua y demandas.
- 2) Objetivos ambientales en las masas de agua.
- 3) Seguridad ante situaciones meteorológicas extremas, sequías e inundaciones.
- 4) Gobernanza de la cuenca.

#### Usos del agua y demandas:

Uno de los problemas más polémicos que se tiene en el sistema de explotación del Júcar es precisamente la satisfacción de usos del agua y de sus demandas.

Como todo el mundo sabe, gran parte del acuífero de la Mancha Oriental está situado en sistema de explotación del Júcar. Se trata de un acuífero de gran extensión y volumen de almacenamiento, razones por las que ha sido, especialmente a partir de los años 80, intensamente explotado. Esto ha provocado en las últimas décadas, que el río Júcar, a su paso por esa región, dejase de ser un río ganador y se convirtiera en perdedor. De hecho, un tramo de varios kilómetros de río pasa a estar seco.

Además, por otro lado, también se ha producido una gran reducción en los recursos hídricos referentes a uno de sus principales afluentes, como es el río Cabriel.

Según el esquema de temas importantes, memoria y anejos del ciclo 2009-2015 elaborado por la Confederación Hidrográfica del Júcar, se está tratando de mejorar la garantía y la eficiencia de los regadíos dependientes del Júcar, así como de la sostenibilidad de los aprovechamientos hídricos y del estado cuantitativo en el acuífero de la Mancha Oriental y sus aprovechamientos.

#### Objetivos ambientales en las masas de agua:

La directiva marco del agua estableció como objetivo que en el año 2015 se consiguiera el buen estado de las masas de agua. Esto obliga a considerar aspectos tales como las restricciones ambientales (caudales ecológicos), la evaluación de la calidad de las masas de agua, tanto en sus propiedades físicas como químicas y por último el estado cuantitativo de las masas de agua subterráneas.

Por esto, el esquema de temas importantes de la Confederación recoge como aspectos a destacar la adecuación del régimen de caudales del río Júcar en relación con las garantías de los usos del sistema y del caudal ecológico en el estuario del río.

Otros de los esfuerzos importantes en el tema ambiental es luchar contra los macrófitos invasores dentro del cauce del río Júcar en su tramo bajo.

#### Seguridad frente a situaciones meteorológicas extremas, sequías e inundaciones.

La confederación Hidrográfica del Júcar considera importante la reducción del riesgo de inundación del tramo bajo del río Júcar, concretamente las comarcas de la Ribera Alta y la Ribera Baixa. Se está considerando que el aumento del nivel del mar, así como la mayor aparición de intensos aguaceros en la zona litoral, producidos por el cambio climático, aumentan el riesgo de daños tanto humanos como materiales en esa zona.

Por otro lado, se señala que en las cuencas Mediterráneas, tales como la del Júcar, el fenómeno de las sequías es recurrente y que, por consecuencias del cambio climático, irán siendo cada vez más frecuentes en cuanto a su aparición.

#### Gobernanza de la cuenca.

Se refiere este punto a los aspectos en los que la Confederación no dispone de datos suficientes para saber la situación en la cuenca hidrográfica o en cuanto a la gestión de los recursos de la misma.

Se incluyen en este apartado temas como son el seguimiento ambiental y mitigación de las sequías en las zonas vulnerables de la cuenca del Júcar o la caracterización de la demanda agrícola.

## Capítulo 5 : Metodología y herramientas.

### 5.1. Esquema general.

El proceso metodológico seguido para el análisis del impacto del cambio climático en las sequías es claro conceptualmente mas requiere el procesamiento de una gran cantidad de datos. A continuación, se presenta un esquema conceptual del proceso seguido en este trabajo final de grado.

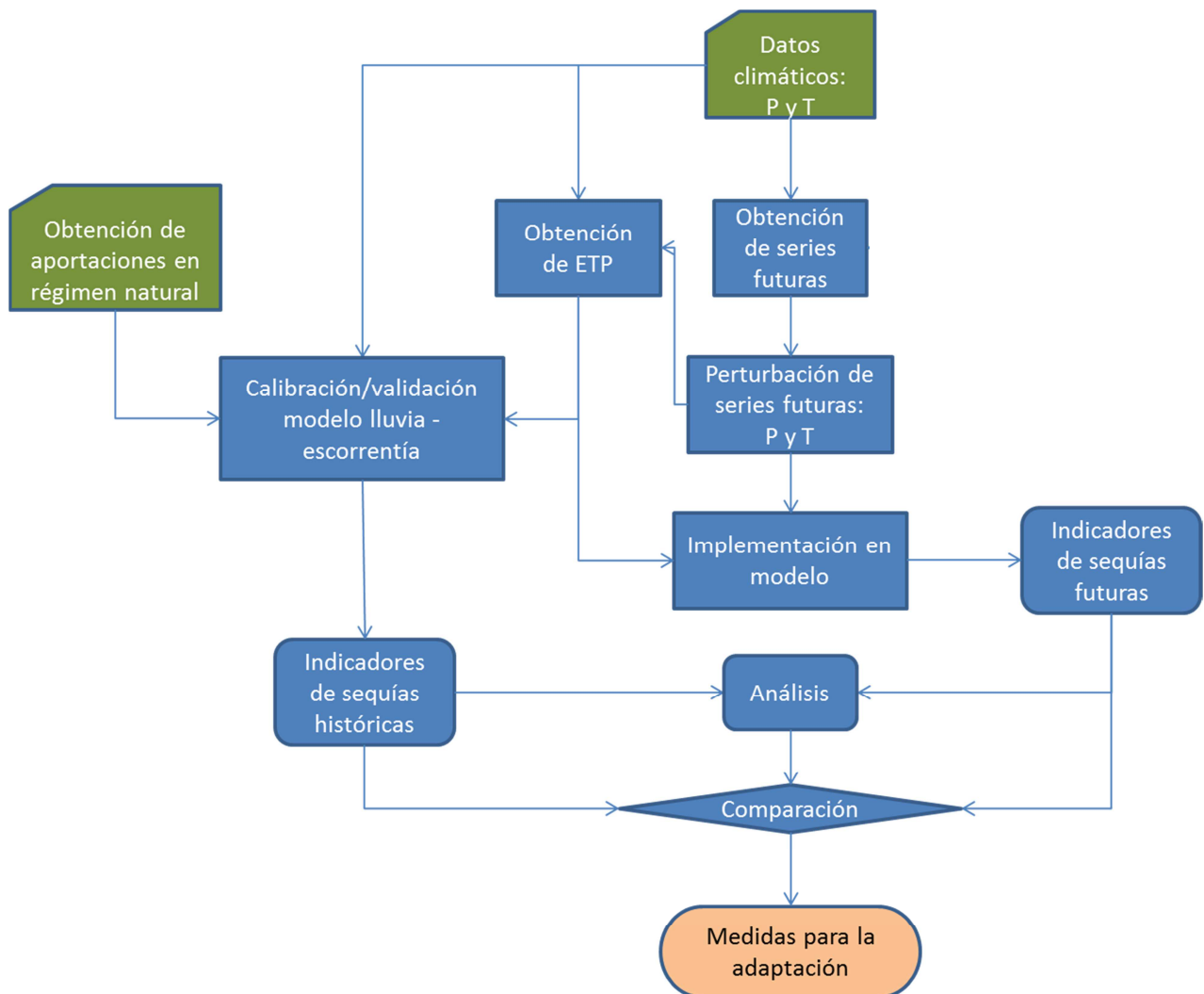


Figura 10: Esquema de metodología propuesto

Se pasa a continuación a describir los puntos más importantes del proceso anteriormente mostrado.

## 5.2. Caracterización hidrológica del sistema. Modelo lluvia-escorrentía.

En este apartado se va a describir la forma en la que se obtuvieron las diferentes variables necesarias a la hora de calibrar el modelo de lluvia escorrentía así como el modelo lluvia escorrentía empleado.

### • 5.2.1 Temperatura y precipitación

Las variables principales a obtener, tal y como señala el esquema metodológico de la figura 10, son la precipitación y la temperatura. Ambas se obtuvieron del proyecto “Spain02” (Herrera, 2015), a través de la web de la universidad de Cantabria, en su versión 4. Spain02 es una malla de información puntual desarrollada para la península ibérica y las islas baleares, que dispone de información diaria de temperaturas medias así como de precipitaciones. De las diferentes resoluciones de malla de las que se dispone, se ha optado por la de máxima resolución, esto es 0,11° (aproximadamente 11 km). Los datos, en esta resolución, comienzan en Enero de 1971.

A continuación, se obtiene la influencia de cada punto de la malla, a los que también se les ha llamado “fid”, en las diferentes subcuencas estudiadas en este trabajo.

Por último, de la ponderación de los diferentes fid en las subcuencas, se obtiene las variables precipitación y temperatura media en la subcuenca con una discretización temporal diaria. Puesto que el modelo necesita discretizaciones mensuales, se agregan las variables para obtenerlas en meses.

Una vez se han obtenido las variables principales, se obtiene la evapotranspiración potencial, que es junto a la precipitación, mas no la temperatura, las variables a introducir en el modelo.

### • 5.2.2 Obtención de la evapotranspiración potencial

Puesto que se dispone, para toda la longitud de la serie, únicamente de la variable temperatura, primeramente se obtiene la evapotranspiración potencial mediante la formulación propuesta por Thornthwaite como una primera aproximación, ya que únicamente emplea el valor de la temperatura y las coordenadas geográficas para su obtención.

El método se traduce en la aplicación de una fórmula que es:

$$ETP(i) = 1,6 \cdot L_d(i) \cdot \left( \frac{10 \cdot t_i}{I} \right)^a$$

Siendo:

$$I = \sum_{j=1}^{12} (t_j \cdot 5)^{1,514}$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 0,01792 \cdot I + 0,49239$$

Donde:

- $L_d$  representa la duración del día solar, que varía en función de la latitud y de la época del año. Esta variable se encuentra tabulada.
- $t_j$  es la temperatura media de cada mes.

Este proceso ha sido mecanizado con la ayuda de hojas de cálculo.

Una vez obtenida la evapotranspiración potencial por el método anterior, de los datos obtenidos de la red de estaciones SiAR, se obtiene la evapotranspiración potencial por el método de Penman-Monteih, que es más precisa que la anterior, ya que tiene en cuenta más procesos involucrados en la evapotranspiración como por ejemplo la radiación neta o la velocidad del viento. Sin embargo, la longitud de datos de esta red de estaciones no es suficientemente larga para este estudio.

Para solventar este problema, se obtiene la relación promedio para cada mes del periodo solapado en el cálculo de ambas metodologías. De esta forma se obtienen 12 factores  $k_i$  para cada una de las subcuencas, que tras multiplicarlos en la serie completa a la evapotranspiración obtenida por el método de Thornthwaite, se obtiene una ETP más precisa para el análisis.

Cabe destacar que estos coeficientes así obtenidos, en general, tienen muy poca desviación entre unos años y otros. Sin embargo, para los meses más fríos, la distorsión se incrementa, de forma que se ha corregido mediante un ajuste de una función temperatura-coeficiente corrector.

### • 5.2.3 Modelo lluvia escorrentía.

Multitud de variables tales como la precipitación, la temperatura, la cobertura vegetal, las pendientes en la cuenca, etc. son las que condicionan el régimen natural de aportaciones en una cuenca. La precipitación marca el agua que entra en juego al sistema, la cobertura vegetal crea unas abstracciones iniciales que merman la cantidad de lluvia, la temperatura influye en la evapotranspiración (tal como se indica anteriormente) mientras que las pendientes existentes dentro de las diferentes cuencas condicionan la infiltración del agua en el subsuelo. Las variables mencionadas son algunas de las que condicionan la hidrología de la cuenca, pero existen muchas más.

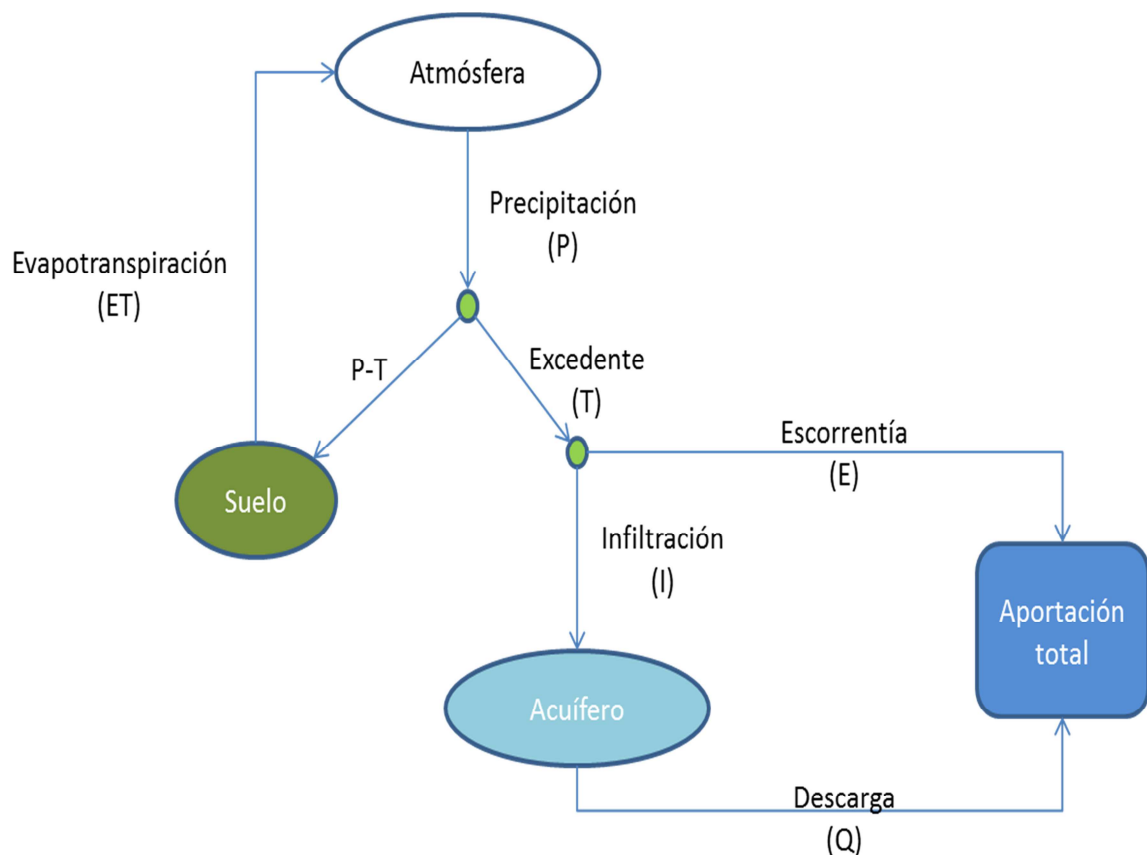
Esta extensión en las variables que condicionan la hidrología de la cuenca, junto con la dificultad de obtener algunas de ellas, hace necesaria la elaboración de modelos conceptuales de lluvia-escorrentía para poder entender el comportamiento de las cuencas frente a los aguaceros.

De las diferentes familias de modelos para la evaluación de los recursos hídricos de una cuenca, se ha optado por un modelo hidrológico de tipo matemático, determinístico, continuo, conceptual y agregado de bajo número de parámetros. Se trata del modelo de Témez, (Témez, 1977).

Las principales características del modelo por el que se ha optado son:

- El modelo de Témez simula el transporte básico del agua en las diferentes fases del ciclo hidrológico. Para ello, se establece un balance hídrico a la vez que se aplica el principio de continuidad.
- La escala del modelo es mensual.
- Hay una total desconexión entre acuíferos. Esto significa que no existen flujos de agua entre ellos.
- Se considera el suelo dividido en dos zonas, una zona superior no saturada, en la que sí que existe humedad del suelo, utilizable por la vegetación, y una zona saturada, que es la correspondiente al acuífero.

Se pasa a mostrar un esquema conceptual de los procesos considerados en el modelo matemático:



*Figura 11: Esquema conceptual de los procesos simulados por el modelo hidrológico escogido*

Para aumentar la similitud del modelo con los procesos que realmente ocurren en la región, se ha introducido una segunda rama de descarga subterránea, o lo que es lo mismo, el modelo



simula la existencia de dos acuíferos. Esto hace que en lugar de utilizar el modelo unicelular para evaluar la descarga subterránea, se pase a un modelo bicelular.

A la hora de establecer la recarga de cada uno de los acuíferos, se establece una proporcionalidad, calibrada por el modelo, del agua infiltrada en el terreno.

Con todas las consideraciones presentes, se tiene que el número de parámetros asciende a 6, que son:

- $H_{max}$ , es la humedad máxima del suelo.
- $C$ , coeficiente de escurrimiento.
- $\alpha_1$ , descarga celda 1 acuífero.
- $\alpha_2$ , descarga celda 2 acuífero
- $I_{max}$ , infiltración máxima capaz de admitir el terreno.
- $C.R.$ , coeficiente de reparto recarga de los acuíferos.

Además, se tienen que obtener también 3 condiciones de contorno como son:

- $H_{inicial}$ , es la humedad del terreno en el comienzo del periodo analizado.
- $V_1$ , representa el volumen celda 1 acuífero en el comienzo del periodo analizado.
- $V_2$ , representa el volumen celda 2 acuífero en el comienzo del periodo analizado.

Por otra parte, para la caracterización del sistema de explotación del Júcar, se ha decidido dividir en diversas subcuencas. De esta forma, se crea una cadena de modelos hidrológicos para cada una de las subcuencas consideradas en el estudio.

Las aportaciones de las diferentes subcuencas analizadas han sido obtenidas de Confederación Hidrográfica del Júcar, como restitución al régimen natural por la observación de caudales en régimen alterado.

A la hora de calibrar los modelos, se ha tenido en cuenta diversos factores. Se han obtenido ajustes a partir del mínimo error cuadrático medio y el máximo valor del coeficiente Nash y Sutcliffe's (1970).

Por otro lado, tras la obtención de estas calibraciones automatizadas, se analizan los ajustes por parte del autor de este trabajo, eligiendo el mejor considerado.

- El error cuadrático medio se obtiene de la siguiente forma:

$$\bar{e}^2 = (\Delta Q)^2$$

- El coeficiente de Nash Sutcliffe's:

$$E = 1 - \frac{\bar{e}^2}{s_0^2}$$

Donde:

$\Delta Q$  representa la variación media entre el caudal simulado y el observado.

$s_0^2$  representa la desviación típica de los datos observados.

### 5.3. Caracterización de sequías. Indicadores.

Cabe mencionar que las agrupaciones temporales que se pueden aplicar en el análisis de las sequías son muy importantes. Esto es así porque la dependencia temporal de las series implica que las sequías sean más o menos numerosas, así como su prolongación en su aparición y por tanto su magnitud.

Por este motivo, se va a proceder primeramente a analizar la dependencia temporal de la serie. Para ello, se va a utilizar:

- Test de Anderson, (Anderson, 1941).

Establece unos límites en la autocorrelación de las series, de forma que tenemos una confianza del 95% en el análisis de la temporalidad de la serie. Todo valor de correlación que quede fuera de los límites indica que tiene dependencia temporal. Estos límites son los siguientes:

$$\text{Límite inferior: } \frac{-1 - 1,96 \cdot \sqrt{N - k - 1}}{N - k}$$

$$\text{Límite superior: } \frac{-1 + 1,96 \cdot \sqrt{N - k - 1}}{N - k}$$

Siendo:

N representa el número de datos totales de la serie.

K representa el desfase entre los valores.

- Coeficiente de Hurst:

Este coeficiente indica la memoria de la serie. El coeficiente de Hurst se calcula de la siguiente forma:

$$K = \frac{\ln\left(\frac{R^*}{s}\right)}{\ln\left(\frac{N}{2}\right)}$$

$R^*$  es el rango de la serie

S la desviación típica de la serie

N el número de datos de la serie.

Una vez obtenido estos indicadores de dependencia temporal, se agrupa el indicador de la forma que se considera más adecuada para el análisis de las sequías.

La metodología seguida para caracterizar las sequías está basada en el cálculo del indicador S.P.I., que se adapta para obtener los indicadores S.Q.I. y S.H.I. propuestos con anterioridad.

Tal y como se indica en la página 33, apartado de la teoría de rachas, se evalúa la duración, magnitud e intensidad de las sequías. El criterio seguido en este trabajo final de grado es el que se indica en el Plan especial de alerta y eventual sequía en la Confederación Hidrográfica del Júcar (C.H.J. 2007) y se explica a continuación:

- Se considera sequía cuando el valor del índice estandarizado o el acumulado de varios años es inferior a -0,84.
- La sequía finaliza, una vez entrado en ella, cuando el indicador pasa a ser positivo.
- La gravedad de las sequías se obtiene como la magnitud de las mismas.

Se categorizan tal como indica la siguiente tabla:

| Intensidad de la sequía | Valor del indicador |
|-------------------------|---------------------|
| Extrema                 | Menor a -1,65       |
| Severa                  | Menor a -1,28       |
| Moderada                | Menor a -0,84       |
| Leve o inexistente      | Mayor a -0,84       |

Se considera este criterio tanto para las sequías meteorológicas, edáficas como las hidrológicas.

## 5.4. Generación de escenarios climáticos. Proyecto CORDEX.

Los escenarios de cambio climático se generan a partir de los datos del proyecto CORDEX. De los diferentes forzamientos de radiación con los que trabaja el proyecto, ya comentados en capítulos anteriores, se ha decidido utilizar los correspondientes a los RCP 4,5 y RCP 8,5.

Se ha optado por estos escenarios ya que son el escenario del mínimo incremento continuo de temperaturas en todo el periodo analizado (el RCP 2,6 llegado a un año, comienza a disminuir la temperatura), y el escenario más grave de los que estudia este proyecto.

Para este trabajo final de grado, se ha escogido los modelos de cambio climático que emplea el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI), que se codifican como SMHI-RCA4\_v1. Con variables a escala mensual, centradas en el dominio europeo EUR, concretamente el EUR-44. La resolución de los datos corresponde con la 0,44° que corresponde aproximadamente con una malla de 44 km. De esta malla, se ha obtenido las variables precipitación y temperaturas.

Por otro lado, se establecen divisiones temporales, de longitud de 30 años con discretización mensual, en las dos predicciones de CORDEX analizadas, esto es a corto plazo (desde 2011 hasta 2040) y a medio plazo (desde 2041 hasta 2070). De esta forma se tienen los siguientes escenarios:

- Corto plazo RCP 4,5.
- Medio plazo RCP 4,5.
- Corto plazo RCP 8,5.
- Medio plazo RCP 8,5.

El siguiente paso es corregir los errores en las predicciones de ese estudio.

Esto es posible gracias al periodo de control que se implementa en dicho estudio, que solapa las series de observaciones históricas con las de las predicciones realizadas de las variables. Para ello se hace una estimación empírica cuantil a cuantil enfrentando los valores de la serie histórica a la del periodo de control. Aplicando este algoritmo a la series de los escenarios futuros, se minimiza el error de predicción por regionalización del modelo climático.

Este proceso se hace tanto para las precipitaciones como para las temperaturas en cada una de las diversas subcuencas en las que se ha dividido el sistema de explotación del Júcar.

El cálculo de la corrección cuantil a cuantil se ha realizado mediante el uso de un software llamado RStudio, aplicando el paquete de cálculo “*qmap*” versión 1.0-3 (Gudmunson et al.,2012) cuyo título es “*Statistical transformations for post-processing climate model output*”.

## 5.5. Evaluación del impacto del cambio climático en las sequías.

A la hora de evaluar las sequías de los escenarios del cambio climático generados, se aplica también el procedimiento de caracterizar las sequías meteorológicas, hidrológicas y edáficas con los indicadores estandarizados de las variables hidrológicas precipitación, caudales en régimen natural y humedad del suelo, SPI, SQI y SHI.

Sin embargo, aquí hay que hacer un matiz: queremos evaluar las sequías futuras usando el mismo valor de referencia que tenemos en las actuales, para así mostrar el cambio potencial en la presentación de sequías en el clima futuro. Ello nos lleva a definir unos indicadores SPI, SQI y SHI relativos, que se calibran para la serie histórica pero que luego se aplican a las series futuras.

De este modo, se obtiene la probabilidad de ocurrencia de la variable del escenario futuro generado usando la función de distribución gamma ajustada para la serie histórica.

De esta forma, se puede corregir las perturbaciones en la consideración de sequías producidas por el cambio en el régimen de precipitaciones y temperaturas debido al cambio climático.

Las fronteras para la consideración de sequía en estos escenarios son las mismas que en las sequías de la serie histórica.

Recordando el concepto de sequía establecido en este trabajo, que es el mismo que el usado en el *“Plan especial de alerta y eventual sequía en la Confederación Hidrográfica del Júcar”*:

- Se considera sequía cuando el valor del índice estandarizado o el acumulado de varios años es inferior a -0,84.
- La sequía finaliza, una vez entrado en ella, cuando el indicador pasa a ser positivo.
- La gravedad de las sequías se obtiene como la magnitud de las mismas.

Se categorizan tal como indica la siguiente tabla:

| Intensidad de la sequía | Valor del indicador |
|-------------------------|---------------------|
| Extrema                 | Menor a -1,65       |
| Severa                  | Menor a -1,28       |
| Moderada                | Menor a -0,84       |
| Leve o inexistente      | Mayor a -0,84       |

Paralelamente a esto, se obtiene el caudal seguro que puede proporcionar el embalse.

Con el caudal seguro, se obtiene el máximo caudal que permanentemente es posible suministrar sin que existan fallos en el mencionado suministro, que se entiende como el no proporcionar la totalidad del caudal en algún momento dado. Para ello, se obtiene un balance hídrico de entradas y salidas.

La formulación es:

$$I - O = \Delta S$$

Siendo:

“I”: aportaciones de entrada al embalse (inputs).

“O”: salidas de agua del embalse (outputs).

“ $\Delta S$ ”: incremento de volumen en el embalse.

Para este cálculo, se debe de conocer la capacidad del embalse a calcular y el nivel del embalse al comienzo del cálculo (condición de contorno).

Obviamente el caudal seguro será aquel que en algún momento deja el embalse sin agua, pero que no llega a dar fallo ya que las aportaciones del periodo siguiente son mayores que las salidas y por tanto entra más agua de la que sale.

## Capítulo 6 : Caracterización de sequías.

### 6.1. Modelos lluvia-escorrentía en las subcuencas del caso de estudio.

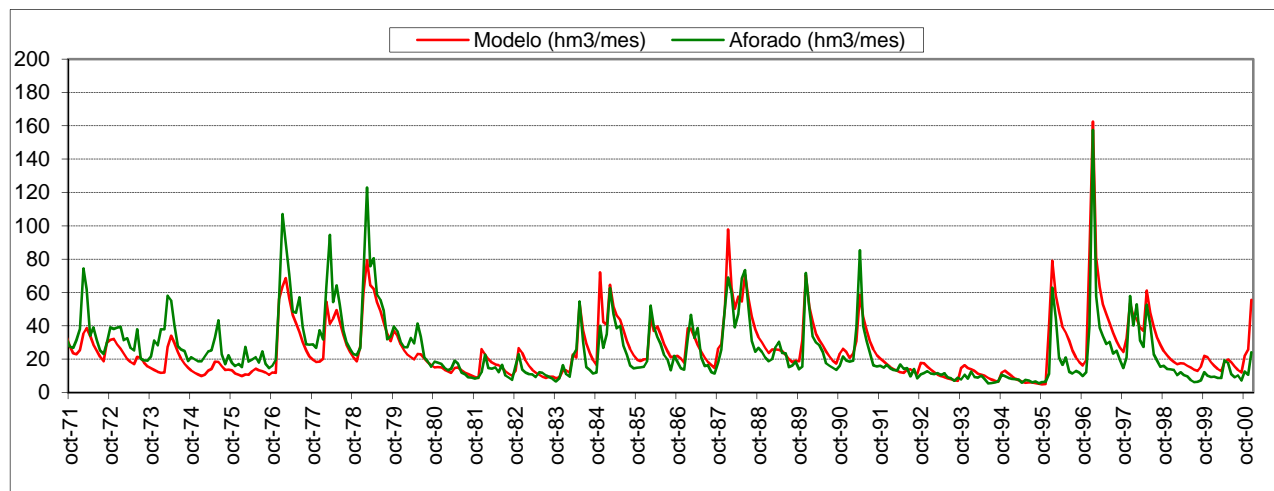
Se presenta entre este capítulo, el anexo 1 y el anexo 2, para cada una de las subcuencas estudiadas, las gráficas de las aportaciones medias mensuales, anuales y mensuales simuladas, enfrentadas a las aportaciones de referencia restituidas al régimen natural proporcionadas por Confederación hidrográfica del Júcar.

Cabe hacer una mención especial a que los modelos calibrados de las subcuencas referentes a Alarcón, Molinar y Sueca, fueron proporcionados por el departamento de ingeniería hidráulica y medio ambiente (D.I.H.M.A.). Las gráficas de sus ajustes se muestran en el anexo 1 correspondiente.

Se presenta también las gráficas de validación de los modelos hidrológicos calibrados.

Las gráficas que se presentan en el Anexo 2 son las de calibración (y validación) de los modelos hidrológicos del resto de las subcuencas de este trabajo final de grado. Se extrae a esta memoria las referentes a la subcuenca de Contreras.

- **Contreras.**



*Figura 12: Gráfica mensual de calibración de la subcuenca de Contreras.*

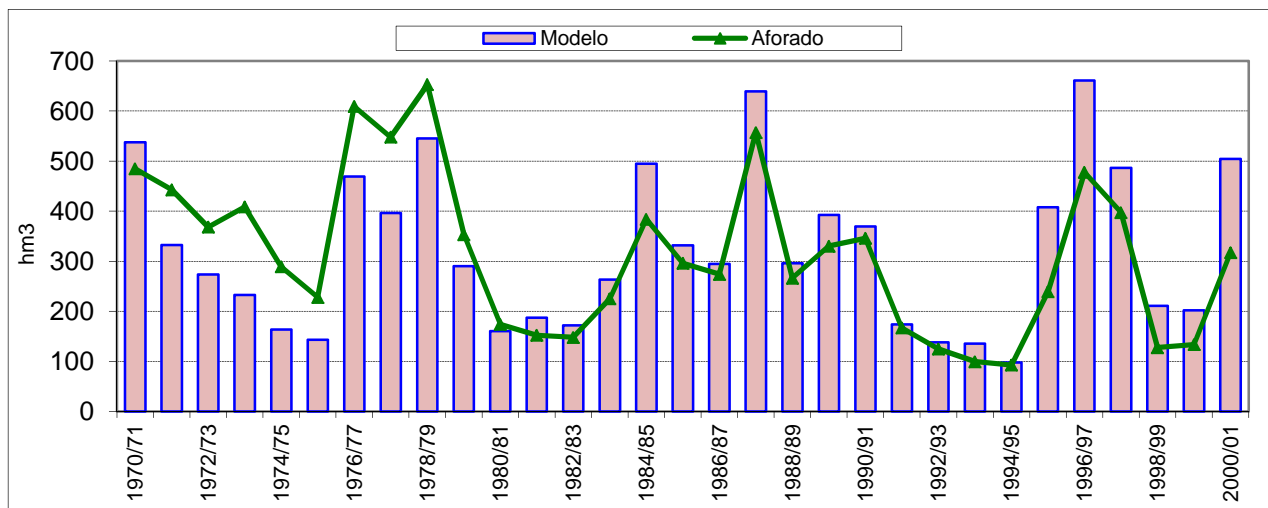


Figura 13: Gráfica anual de calibración de la subcuenca de Contreras.

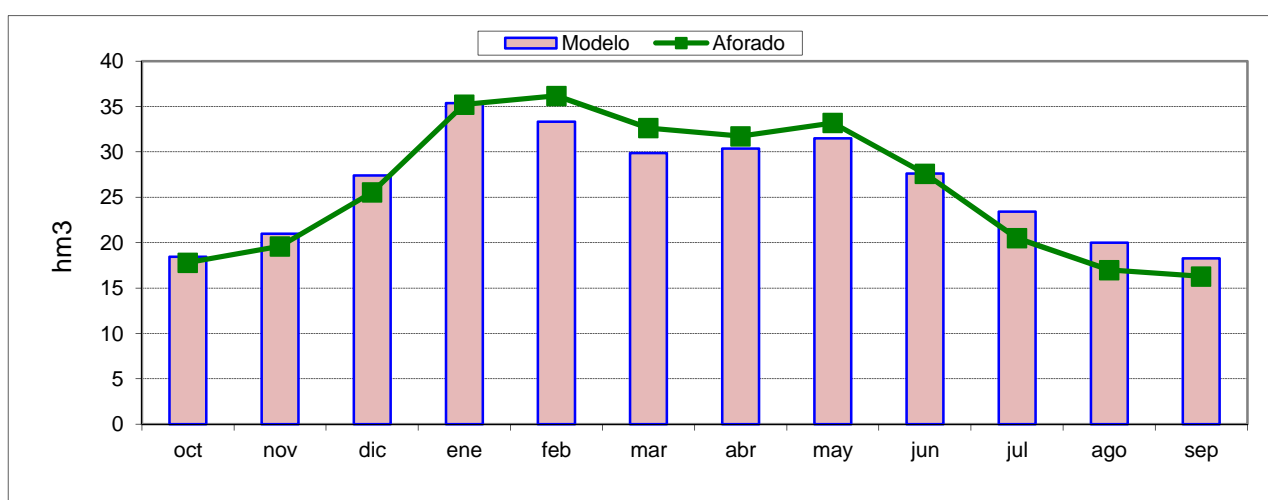


Figura 14: Gráfica de calibración de la subcuenca de Contreras. Aportaciones medias mensuales.

Las gráficas referentes a la validación de los modelos hidrológicos de las subcuencas de Contreras, Bellús, Tous y Forata también se presentan en el Anexo 2. Se muestra a continuación la gráfica de calibración de Contreras

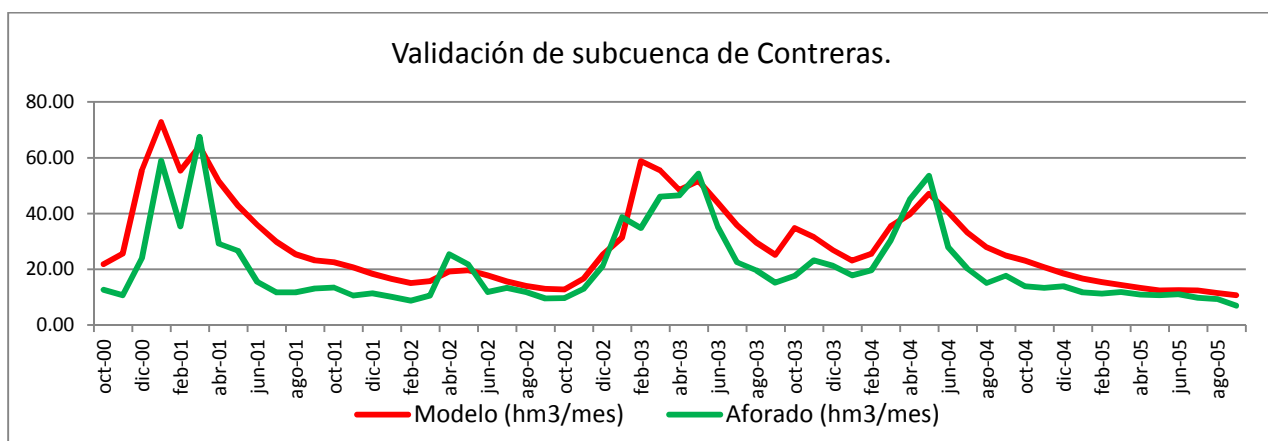


Figura 15: Gráfica de validación de la subcuenca de Contreras. Aportaciones mensuales.



En la tabla siguiente, se muestran los indicadores de bondad de ajustes obtenidos para los modelos hidrológicos de Témiz (Témiz, 1977) ajustados a todas las subcuencas a las que hace referencia este trabajo final de grado tanto para la fase de calibración como la de validación.

Tabla 1: Bondad de ajuste de los modelos

| Subcuenca            | Calibración |      | Validación |      |
|----------------------|-------------|------|------------|------|
|                      | E           | R    | E          | R    |
| Contreras            | 0,71        | 0,84 | 0,58       | 0,87 |
| Bellús               | 0,78        | 0,88 | 0,52       | 0,86 |
| Tous                 | 0,89        | 0,57 | -0,95      | 0,54 |
| Forata               | 0,78        | 0,82 | 0,05       | 0,70 |
| Alarcón (cabecera)   | 0,80        | 0,90 | 0,84       | 0,92 |
| Alarcón (intermedia) | 0,84        | 0,99 | 0,91       | 0,98 |
| Alarcón (baja)       | 0,69        | 0,89 | 0,92       | 0,98 |
| Molinar              | 0,50        | 0,71 | 0,06       | 0,26 |
| Sueca                | 0,60        | 0,78 | 0,68       | 0,83 |

El ajuste menos bueno de los analizados es el que se refiere a la subcuenca de Tous. En esta subcuenca, se ha tenido que trabajar más a fondo que en el resto, probando, entre otros, los aforos del régimen alterado, sin obtener resultados satisfactorios. Se ha llegado a la conclusión de que este era el mejor ajuste posible con la metodología propuesta en este trabajo final de grado.

Sin embargo, a la vista de las gráficas de calibración, las de validación de cada una de las subcuencas objeto de estudio, así como de los valores de los indicadores de bondad de ajuste de las mismas, se concluye que los modelos están convenientemente calibrados, dando por buenos los ajustes.

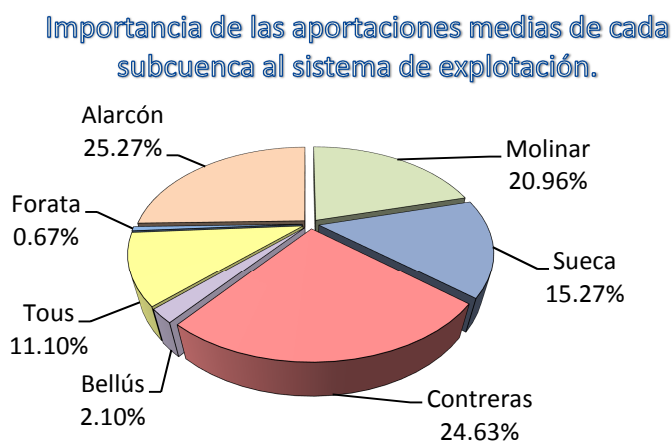
## 6.2. Caracterización de sequías. Escenario base (clima actual)

En cualquier estudio de cambio climático es conveniente saber la situación de la que se parte, de forma que se pueden comparar con las situaciones futuras previstas.

Por tanto, este capítulo trata de ofrecer una idea global del sistema de explotación del Júcar estudiando la situación actual en cuanto a la importancia de las aportaciones de cada subcuenca al sistema y de la dependencia temporal de los caudales de cada subcuenca. También se analizan las sequías históricamente producidas.

## 6.2.1. Análisis de las aportaciones.

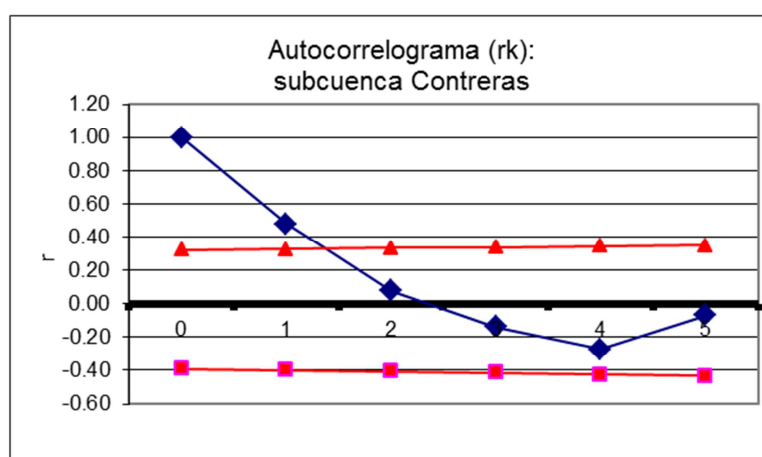
En la gráfica siguiente, se observa la importancia de la aportación de cada subcuenca, en las que se ha trabajado en este estudio, al sistema de explotación.



**Figura 16: Importancia relativa media de cada subcuenca frente a la aportación total del sistema.**

Es interesante observar que las cuencas de cabecera del sistema, Contreras y Alarcón, aportan aproximadamente la mitad de los caudales generados en el sistema, a pesar de no ser las subcuencas más grandes, título que corresponde a la subcuenca denominada Molinar, que siendo mayor que la agrupación de las anteriores, aporta menos que cada una de ellas por individual.

Las figuras que se muestran a continuación son los autocorrelogramas de las subcuencas, aplicados a la serie de caudales anuales, que nos indican si tienen dependencia temporal o no, aplicando los límites de Anderson comentados en el capítulo 5, apartado 4 de este documento.



**Figura 17: Autocorrelograma de Contreras.**

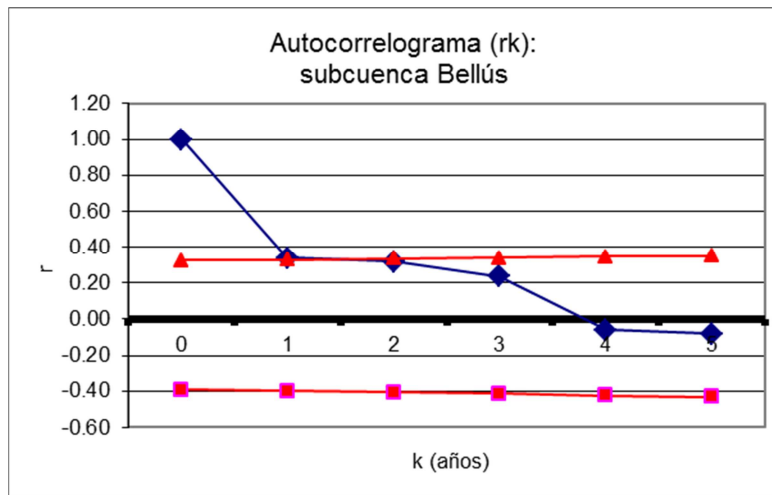


Figura 18: Autocorrelograma de Bellús.

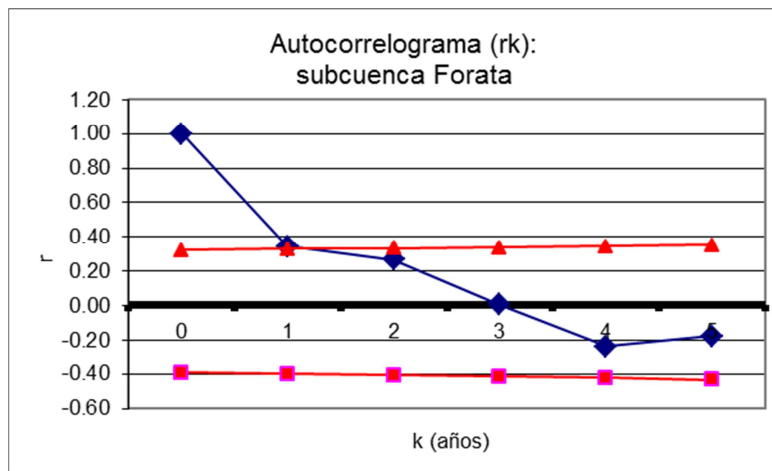


Figura 19: Autocorrelograma Forata.

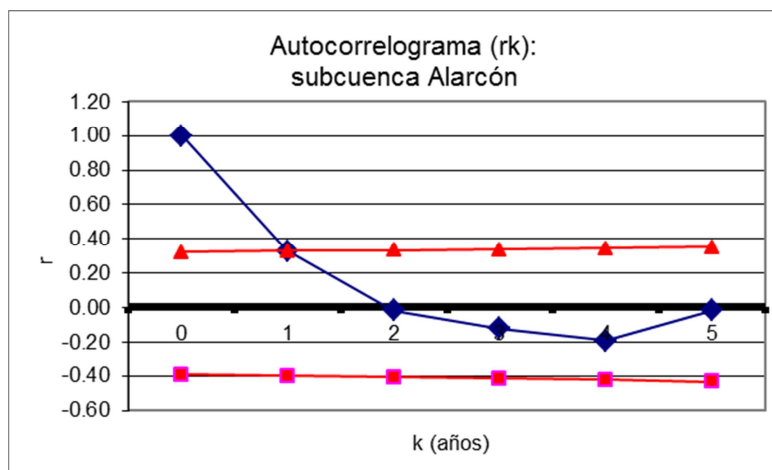


Figura 20: Autocorrelograma de Alarcón.

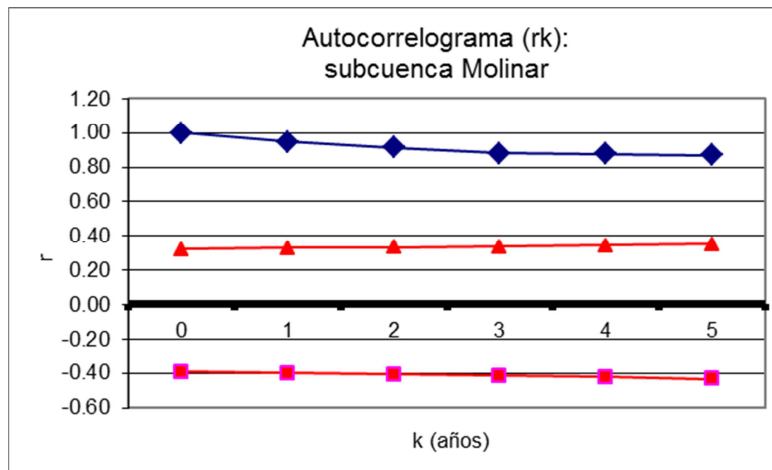


Figura 21: Autocorrelograma de Molinar.

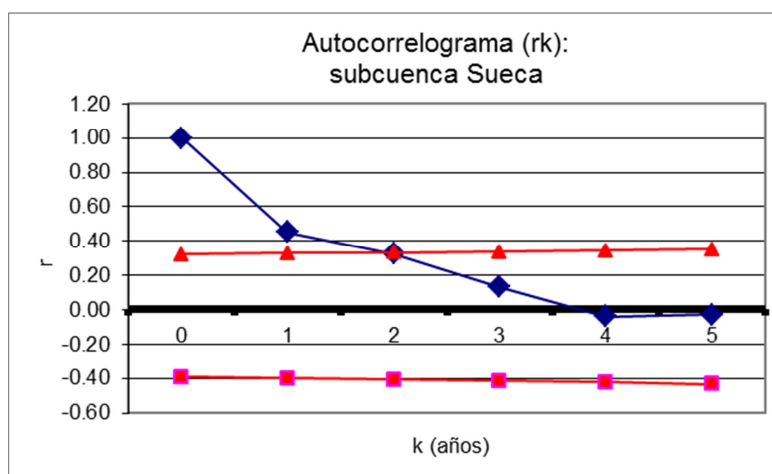


Figura 22: Autocorrelograma de Sueca.

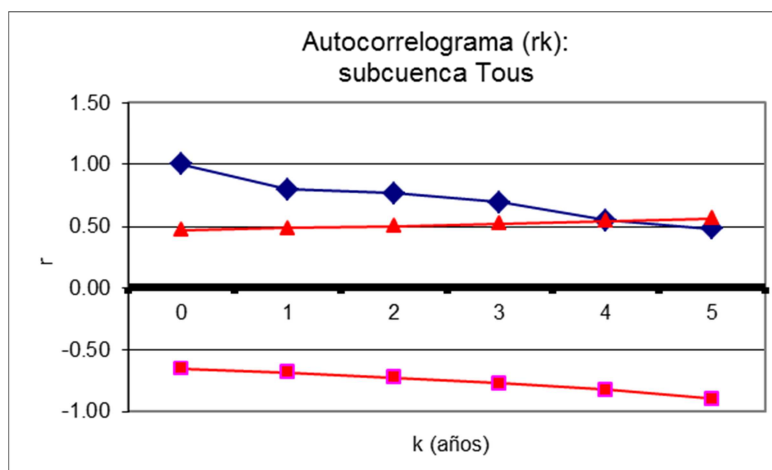


Figura 23: Autocorrelograma de Tous.

Además, se presenta a continuación los coeficientes de Hurst de cada una de las subcuencas analizadas.

Tabla 2: Coeficientes de Hurst

| Subcuenca | Coeficiente de Hurst |
|-----------|----------------------|
| Contreras | 0,56                 |
| Alarcón   | 0,53                 |
| Molinar   | 0,70                 |
| Bellús    | 0,37                 |
| Tous      | 0,28                 |
| Forata    | 0,43                 |
| Sueca     | 0,40                 |

A la vista de los autocorrelogramas anteriores, figuras de la 17 a la 23, se observa que todas las subcuencas tienen una dependencia temporal. En general, la dependencia temporal es de un año en las cuencas del sistema de explotación. Sin embargo hay dos subcuencas con una dependencia temporal mayor, que son Molinar y Tous (si bien ya hemos comentado la complejidad de la restitución al régimen natural en ambas cuencas).

Si además de observar los autocorrelogramas, se contrastan con los coeficientes de Hurst para cada una de ellas, se observa, en general, la concordancia del análisis de dependencia temporal. Únicamente nos encontramos con la diferencia de la subcuenca de Tous, en la que el autocorrelograma indica una dependencia temporal fuerte, mientras que el coeficiente de Hurst no. Esto es, sin duda, debido a que la serie disponible para la subcuenca de Tous es mucho más corta que el resto, distorsionando así la credibilidad del coeficiente de Hurst de dicha subcuenca.

### 6.2.2. Indicadores de sequías.

En esta sección se obtienen los parámetros de las sequías producidas históricamente en el sistema de explotación del río Júcar. Para ello, se emplean los indicadores comentados en capítulos anteriores.

Puesto que el comportamiento hidrológico de las subcuencas, tal como se ha visto en el apartado anterior, tiene una dependencia temporal clara, se analizará únicamente las agrupaciones de 12 meses. Además, también es interesante esta agrupación temporal de 12 meses, ya que lo que se pretende es conocer el comportamiento interanual de las diferentes subcuencas, no el comportamiento estacional que dan las agrupaciones menores.

Las líneas amarilla, naranja y roja de los gráficos, indican la severidad de las sequías. Por encima de la línea amarilla, se considera que aunque hay déficit, no existe sequía por ser de

escasa importancia. La línea roja es la que marca el extremo más arduo de las sequías, un verdadero problema en cuanto a la gestión de los recursos hídricos.

- **Sequías meteorológicas.**

Se realiza mediante la utilización de los indicadores S.P.I y S.P.E.I. que se compararán entre ellos para observar sus diferencias.

A continuación se muestran las gráficas de los indicadores de las sequías meteorológicas de las subcuencas de Contreras y Bellús. Todas las gráficas del resto de subcuencas se encuentran en el anexo 3.

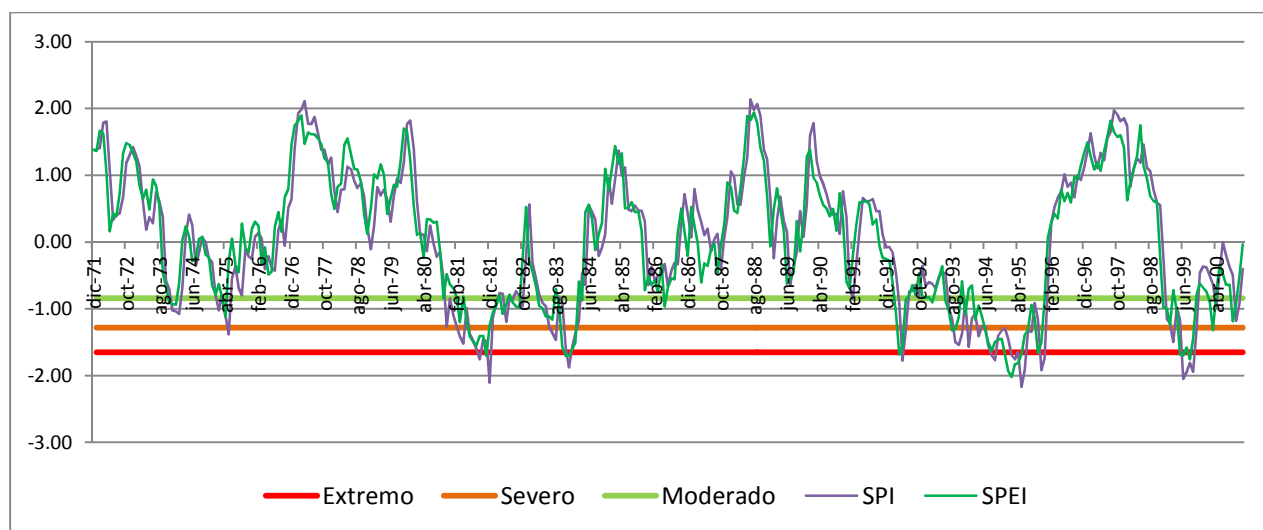


Figura 24: Gráfica de S.P.I-12 y S.P.E.I-12. Subcuenca: Contreras.

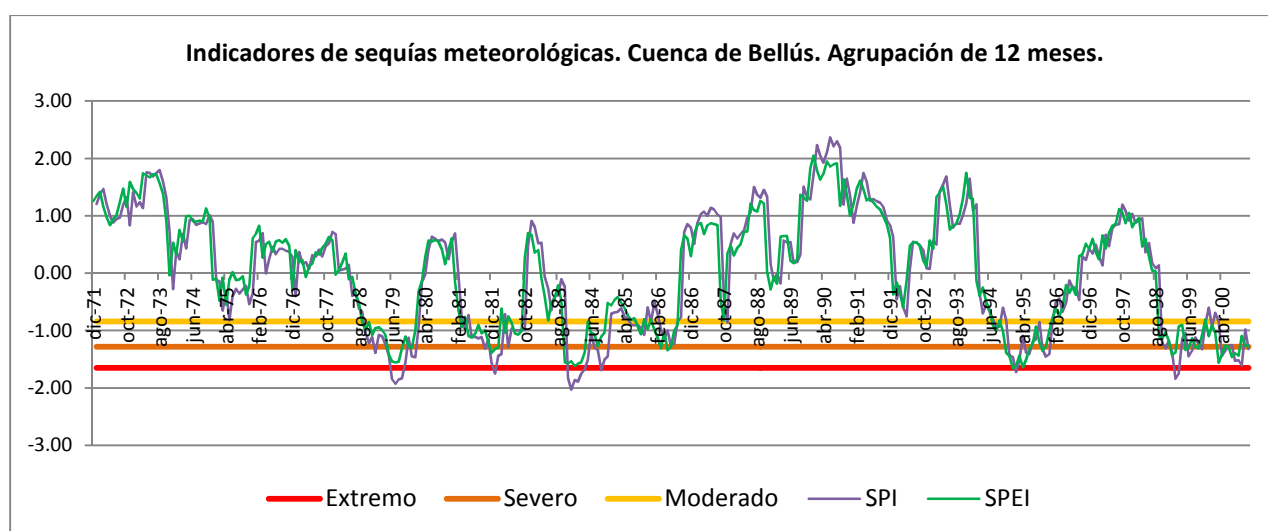


Figura 25: Gráfica de S.P.I-12 y S.P.E.I-12. Subcuenca: Bellús.

A la vista de las gráficas de las diferentes subcuencas, comparando los indicadores S.P.I. y S.P.E.I. se puede concluir que suministran la misma información en cuanto a sequías meteorológicas se refiere.

Puesto que el indicador S.P.I. necesita menos información, únicamente valores de precipitación, frente al S.P.E.I., que necesita también la evapotranspiración y que es menos fiable en su obtención, con resultados obtenidos tan similares, es preferible usar el indicador S.P.I., sobre todo en escenarios de cambio climático, ya que así se eliminan errores, como por ejemplo en la obtención de las variables hidrológicas, principalmente evapotranspiración potencial.

Hay que hacer notar que en la subcuenca de Tous, como la serie es más corta, no debería de compararse en cambio climático el indicador “Nº de sequías”.

Se presenta ahora una tabla resumen con las características de las sequías meteorológicas de cada subcuenca.

Tabla 3: Parámetros de sequías meteorológicas (histórico)

| Subcuenca          | Nº de sequías | Magnitud media | Intensidad media | Duración media |
|--------------------|---------------|----------------|------------------|----------------|
| Contreras          | 10            | -14,92         | -1,32            | 16,10          |
| Bellús             | 8             | -19,99         | -1,46            | 20,38          |
| Forata             | 10            | -15,00         | -1,37            | 17,50          |
| Tous               | 2             | -25,95         | -1,70            | 26,50          |
| Sueca              | 8             | -16,01         | -1,46            | 17,25          |
| Molinar            | 10            | -12,37         | -1,40            | 13,90          |
| Alarcón cabecera   | 12            | -11,36         | -1,23            | 14,25          |
| Alarcón intermedia | 14            | -9,51          | -1,21            | 11,36          |
| Alarcón final      | 9             | -16,52         | -1,45            | 16,67          |

- **Sequías edáficas.**

Tal y como se comentó con anterioridad, el indicador mostrado en las gráficas siguientes es la variación del S.P.I., que en lugar de la variable precipitación, analiza la humedad del suelo.

A continuación se muestran las gráficas de los indicadores de sequías edáficas de las subcuencas de Contreras y Bellús. Las gráficas del indicador S.H.I de este apartado se encuentran en el anexo 3.

A simple vista de estas gráficas se observa que el valor de esta variable, humedad del suelo, es más estable que el de la precipitación.

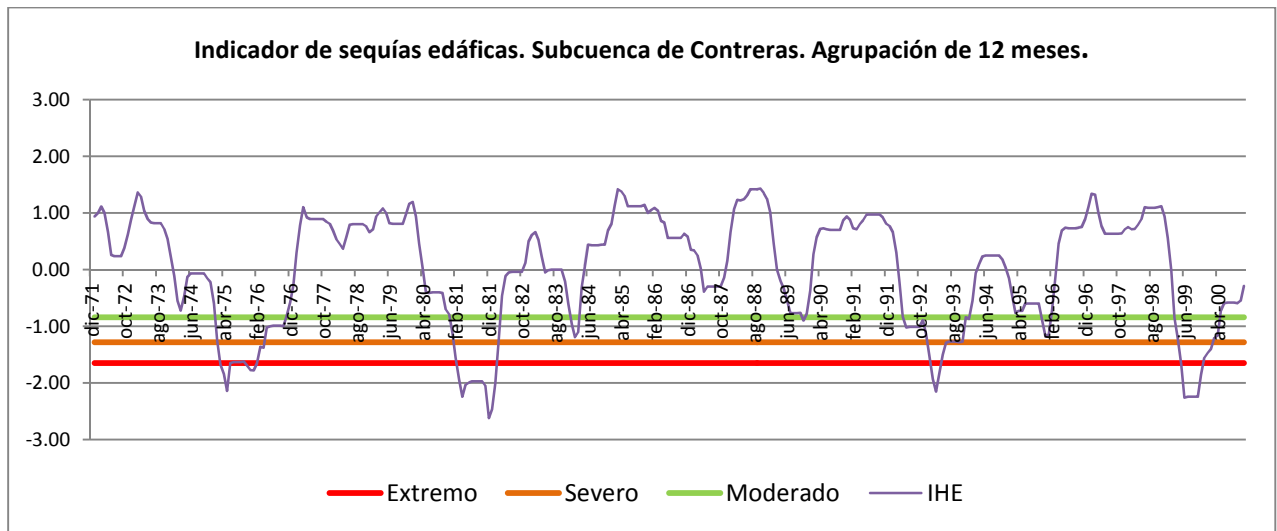


Figura 26: Gráfica de S.H.I.-12. Subcuenca: Contreras.

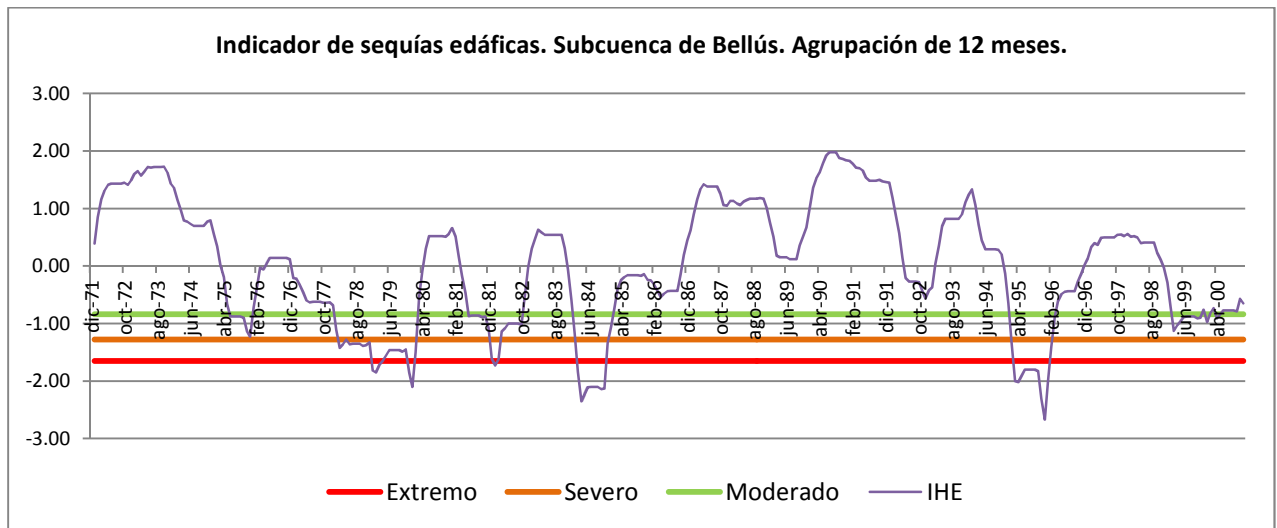


Figura 27: Gráfica de S.H.I.-12. Subcuenca: Bellús.

La siguiente tabla muestra las características de las sequías edáficas históricas producidas en las diversas subcuencas del caso de estudio.

Tabla 4: Parámetros de sequías edáficas (histórico)

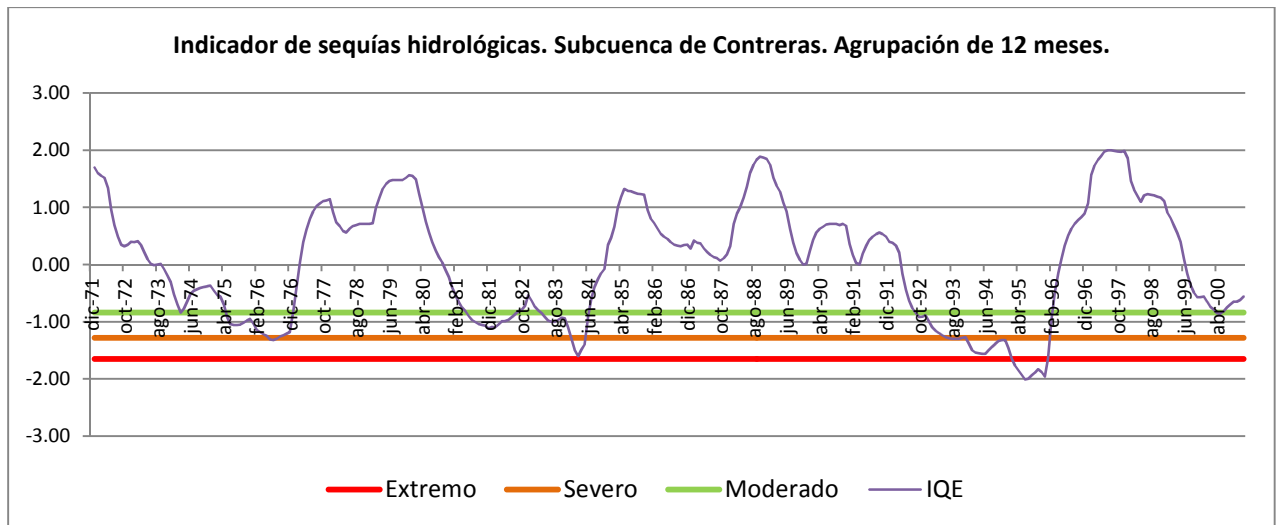
| Subcuenca          | Nº de sequías | Magnitud media | Intensidad media | Duración media |
|--------------------|---------------|----------------|------------------|----------------|
| Contreras          | 8             | -18,39         | -1,60            | 19,88          |
| Bellús             | 7             | -22,37         | -1,68            | 24,00          |
| Forata             | 7             | -20,15         | -1,52            | 27,86          |
| Tous               | 5             | -9,07          | -1,15            | 8,20           |
| Sueca              | 5             | -26,31         | -1,51            | 30,40          |
| Molinar            | 8             | -14,33         | -1,32            | 21,00          |
| Alarcón cabecera   | 9             | -16,07         | -1,69            | 14,59          |
| Alarcón intermedia | 8             | -19,15         | -1,75            | 17,38          |
| Alarcón final      | 6             | -24,55         | -1,76            | 20,67          |



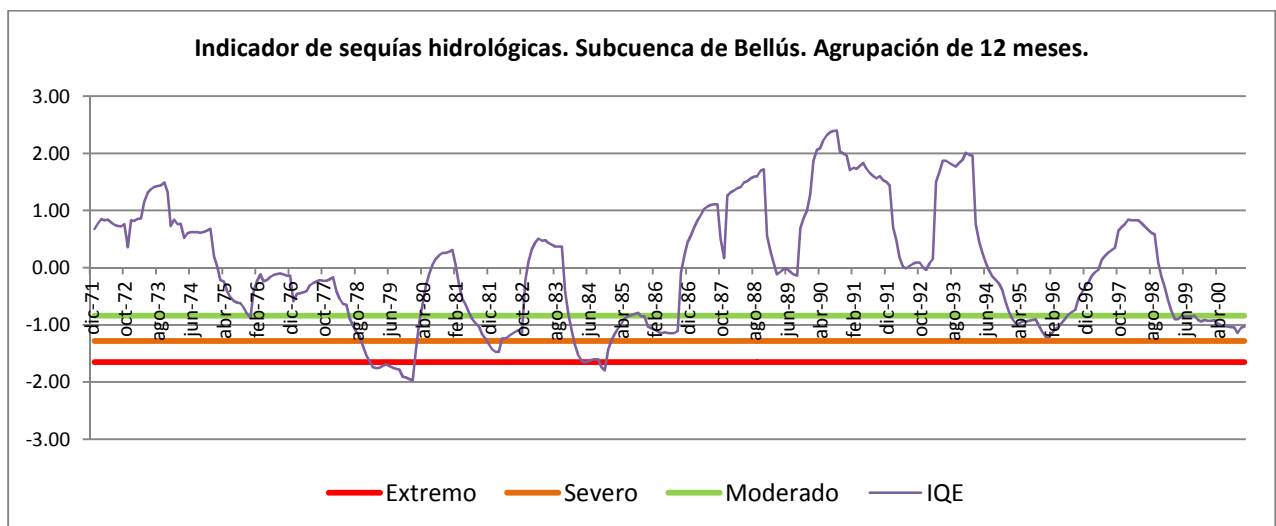
- **Sequías hidrológicas.**

En el aspecto de la planificación de los recursos hídricos el concepto de las sequías hidrológicas es el más importante, ya que indica el recurso que realmente se puede aprovechar para suministrarlo a la demanda. Por ello, se procede a analizar las sequías hidrológicas.

Se realiza el análisis de las sequías históricas mediante el indicador S.Q.I. presentado en capítulos anteriores. Los resultados para las subcuencas de Contreras y Bellús son los que se muestran a continuación, todas las gráficas del indicador que se hace referencia en este apartado, para las diferentes subcuencas, se pueden encontrar en el anexo 3.



**Figura 28: Gráfica de S.Q.I.-12. Subcuenca: Contreras.**



**Figura 29: Gráfica de S.Q.I.-12. Subcuenca: Bellús.**

Para concluir, se muestra una tabla resumen con las características medias de las sequías hidrológicas de las subcuencas en las que se ha dividido el caso de estudio.

Tabla 5: Parámetros de sequías hidrológicas (histórico)

| <b>Subcuenca</b>   | <b>Nº de sequías</b> | <b>Magnitud media</b> | <b>Intensidad media</b> | <b>Duración media</b> |
|--------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| Contreras          | 4                    | -37,49                | -1,45                   | 39,25                 |
| Bellús             | 5                    | -32,09                | -1,52                   | 36,40                 |
| Forata             | 8                    | -17,25                | -1,19                   | 22,50                 |
| Tous               | 3                    | -15,49                | -1,43                   | 18,00                 |
| Sueca              | 4                    | -35,00                | -1,40                   | 44,75                 |
| Molinar            | 4                    | -20,85                | -0,72                   | 45,75                 |
| Alarcón cabecera   | 8                    | -16,72                | -1,18                   | 20,50                 |
| Alarcón intermedia | 6                    | -18,71                | -0,91                   | 25,50                 |
| Alarcón final      | 6                    | -18,63                | -1,00                   | 25,83                 |

## Capítulo 7 : Análisis de impactos del cambio climático en las sequías.

Los análisis de las sequías producidas en los escenarios futuros de cambio climático con los que se ha realizado el presente trabajo final de grado, se han comparado con los resultados de las sequías producidas en el periodo histórico. Para ello, como se mencionó anteriormente, se utilizan los indicadores de sequías.

Es importante destacar que la caracterización de las sequías se ha realizado bajo las mismas premisas con las que se considera sequía en la actualidad. Por ello, se sigue el mismo criterio que el empleado en el capítulo anterior. Además, para homogeneizar el análisis, se ha obtenido la probabilidad de ocurrencia de sequías aplicándole los parámetros calibrados para los indicadores históricos a los valores de las variables de los diferentes escenarios de cambio climático.

### 7.1. Análisis de las aportaciones del sistema.

Un aspecto clave para comprender el comportamiento futuro de las sequías en el sistema de explotación del río Júcar pasa por el estudio de las aportaciones generadas.

Obviamente, dependiendo del escenario escogido se obtienen unas predicciones u otras. Sin embargo, se observa la misma clara tendencia, la reducción a medio plazo de los caudales generados dentro de las subcuencas del sistema, aunque también es cierto, que de los resultados se colige que a corto plazo este efecto podría no notarse o tener un efecto mínimo.

Haciendo un análisis por separado del comportamiento de las subcuencas, se tiene lo que se muestra en el siguiente gráfico:

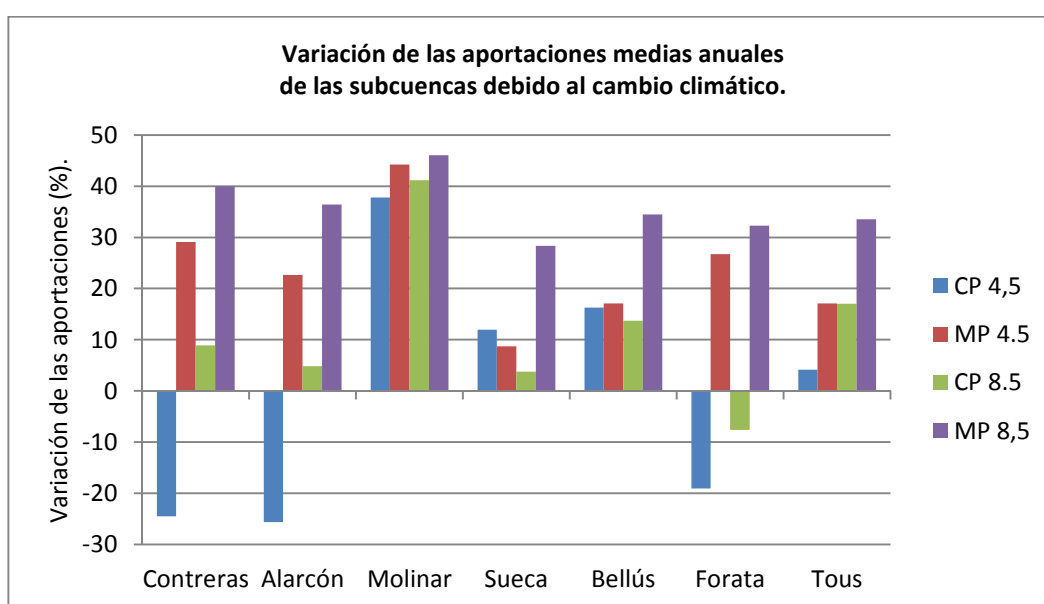


Figura 30: Variación de las aportaciones medias anuales

A corto plazo se puede observar que las diferentes subcuencas se comportan de forma diferente. Mientras que las cuencas de cabecera como Contreras y Alarcón, a corto plazo en el escenario de RCP 4,5 pueden sufrir un aumento en sus aportaciones medias anuales, las subcuencas del tramo medio y final sufren un decremento de las mismas.

Como la importancia de cada subcuenca es diferente, se ha estimado oportuno hacer el balance general del sistema, tal como se muestra en la siguiente gráfica.

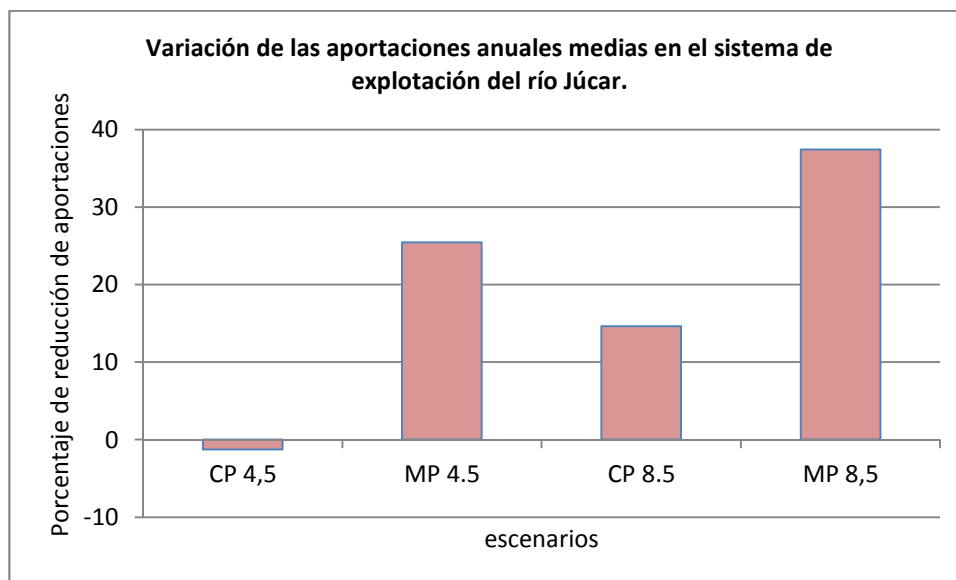


Figura 31: Variación de las aportaciones medias anuales en el sistema de explotación del río Júcar.

Se muestra así que el cambio climático, en el sistema de explotación del río Júcar, podría producir efectos perniciosos a la hora de explotar los recursos del mismo, sobre todo a medio plazo. De hecho, se está tratando de posibles reducciones a medio plazo de entre un 25% a un 40% en las aportaciones medias anuales.

## 7.2. Impacto del cambio climático en el sistema Júcar. Comparativa de escenarios.

Se pasa a continuación a describir las sequías en los escenarios futuros generados. Acto seguido, se comparan los estadísticos de las mismas.

Cabe mencionar que la consideración de sequías en los escenarios futuros, se ha realizado con el mismo criterio que en la serie histórica para poder comparar los resultados y hacer así un análisis.

El orden de exposición es el mismo que en el capítulo anterior, sequías meteorológicas, sequías edáficas y sequías hidrológicas. Se muestra una tabla resumen con los resultados obtenidos en cada subcuenca para los diferentes escenarios considerados.

## 7.2.1 Sequías meteorológicas.

Se muestran a continuación una serie de tablas con los parámetros medios de los indicadores de sequías para cada una de las subcuencas del caso de estudio, indicando el escenario de las proyecciones futuras empleadas.

Tabla 6: Subcuenca de Contreras. Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 13,00         | 12,46    | -12,56   | -1,65      |
| Medio plazo 4,5 | 11,00         | 23,18    | -30,51   | -2,45      |
| Corto plazo 8,5 | 12,00         | 16,42    | -19,26   | -1,97      |
| Medio plazo 8,5 | 8,00          | 33,88    | -59,74   | -3,09      |

Tabla 7: Subcuenca de Bellús. Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 16,00         | 13,75    | -13,94   | -1,33      |
| Medio plazo 4,5 | 12,00         | 18,42    | -18,76   | -1,90      |
| Corto plazo 8,5 | 10,00         | 21,40    | -25,25   | -1,66      |
| Medio plazo 8,5 | 9,00          | 26,00    | -40,76   | -2,16      |

Tabla 8: Subcuenca de Forata. Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 13,00         | 15,46    | -15,38   | -1,67      |
| Medio plazo 4,5 | 13,00         | 19,23    | -24,26   | -2,05      |
| Corto plazo 8,5 | 10,00         | 20,80    | -26,49   | -1,85      |
| Medio plazo 8,5 | 6,00          | 45,33    | -79,11   | -2,70      |

Tabla 9: Subcuenca de Tous. Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 16            | 13,31    | -16,10   | -1,81      |
| Medio plazo 4,5 | 11            | 22,27    | -32,06   | -2,78      |
| Corto plazo 8,5 | 12            | 18,25    | -26,64   | -2,00      |
| Medio plazo 8,5 | 8             | 32,75    | -70,07   | -2,97      |

Tabla 10: Subcuenca de Alarcón (cabecera). Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 13            | 14,08    | -13,76   | -1,70      |
| Medio plazo 4,5 | 11            | 23,36    | -31,86   | -2,11      |
| Corto plazo 8,5 | 9             | 22,56    | -29,08   | -2,55      |
| Medio plazo 8,5 | 8             | 33,88    | -62,64   | -2,76      |

Tabla 11: Subcuenca de Alarcón (intermedia). Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 15            | 12,47    | -11,96   | -1,54      |
| Medio plazo 4,5 | 9             | 29,11    | -39,51   | -2,20      |
| Corto plazo 8,5 | 10            | 20,80    | -27,00   | -2,38      |
| Medio plazo 8,5 | 7             | 39,14    | -69,51   | -3,12      |

Tabla 12: Subcuenca de Alarcón (final). Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 17            | 10,35    | -8,95    | -1,20      |
| Medio plazo 4,5 | 9             | 28,67    | -33,53   | -1,88      |
| Corto plazo 8,5 | 11            | 18,64    | -21,60   | -1,88      |
| Medio plazo 8,5 | 7             | 38,14    | -60,51   | -2,79      |

Tabla 13: Subcuenca de Molinar. Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 3             | 109,33   | -210,15  | -3,67      |
| Medio plazo 4,5 | 1             | 337,00   | -798,33  | -4,32      |
| Corto plazo 8,5 | 1             | 337,00   | -695,87  | -4,38      |
| Medio plazo 8,5 | 1             | 337,00   | -916,78  | -5,10      |

Tabla 14: Subcuenca de Sueca. Parámetros sequías meteorológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 13            | 16,00    | -17,28   | -1,63      |
| Medio plazo 4,5 | 11            | 17,00    | -20,63   | -2,03      |
| Corto plazo 8,5 | 8             | 24,75    | -30,54   | -2,04      |
| Medio plazo 8,5 | 9             | 25,33    | -24,08   | -2,14      |

A la vista de los resultados anteriores se puede concluir que el efecto del cambio climático en las sequías meteorológicas podría ser bastante acentuado en caso de producirse las previsiones del escenario RCP 8,5.

De hecho, de forma general en el sistema de explotación del río Júcar, parece ser que se producirán menos sequías, pero estas serán más duraderas y más intensas.

### 7.2.2 Sequías edáficas.

En el método de cálculo propuesto para obtener las sequías edáficas respecto al cambio climático con la consideración actual de sequía, se tiene problemas matemáticos en el ajuste por la aparición de ceros en escenarios del cambio climático cuando no aparecen en el escenario histórico al calcular. Para ello, se ha desarrollado un método aproximado para obtener las sequías, que se explica en el anexo 4.

A continuación se presentan una serie de tablas con el resumen de los indicadores número de sequías y duración de las mismas de las sequías edáficas.

Tabla 15: Subcuenca de Contreras. Parámetros sequías edáficas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración |
|-----------------|---------------|----------|
| Corto plazo 4,5 | 9             | 14,22    |
| Medio plazo 4,5 | 8             | 22,88    |
| Corto plazo 8,5 | 11            | 17,73    |
| Medio plazo 8,5 | 7             | 32,57    |

Tabla 16: Subcuenca de Bellús. Parámetros sequías edáficas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración |
|-----------------|---------------|----------|
| Corto plazo 4,5 | 7             | 36,29    |
| Medio plazo 4,5 | 7             | 35,57    |
| Corto plazo 8,5 | 7             | 39,57    |
| Medio plazo 8,5 | 7             | 39,00    |

Tabla 17: Subcuenca de Forata. Parámetros sequías edáficas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración |
|-----------------|---------------|----------|
| Corto plazo 4,5 | 9             | 14,44    |
| Medio plazo 4,5 | 9             | 13,11    |
| Corto plazo 8,5 | 7             | 19,43    |
| Medio plazo 8,5 | 9             | 16,33    |

Tabla 18: Subcuenca de Tous. Parámetros sequías edáficas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración |
|-----------------|---------------|----------|
| Corto plazo 4,5 | 11            | 16,64    |
| Medio plazo 4,5 | 9             | 17,44    |
| Corto plazo 8,5 | 9             | 28,56    |
| Medio plazo 8,5 | 7             | 28,86    |

Tabla 19: Subcuenca de Sueca. Parámetros sequías edáficas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración |
|-----------------|---------------|----------|
| Corto plazo 4,5 | 5             | 39,40    |
| Medio plazo 4,5 | 8             | 21,13    |
| Corto plazo 8,5 | 9             | 20,56    |
| Medio plazo 8,5 | 7             | 28,86    |

Tabla 20: Subcuenca de Molinar. Parámetros sequías edáficas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración |
|-----------------|---------------|----------|
| Corto plazo 4,5 | 8             | 30,88    |
| Medio plazo 4,5 | 6             | 44,67    |
| Corto plazo 8,5 | 4             | 72,50    |
| Medio plazo 8,5 | 4             | 69,75    |

Tabla 21: Subcuenca de Alarcón (cabecera). Parámetros sequías edáficas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración |
|-----------------|---------------|----------|
| Corto plazo 4,5 | 10            | 14,80    |
| Medio plazo 4,5 | 8             | 21,38    |
| Corto plazo 8,5 | 9             | 20,67    |
| Medio plazo 8,5 | 9             | 25,11    |

Tabla 22: Subcuenca de Alarcón (intermedia). Parámetros sequías edáficas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración |
|-----------------|---------------|----------|
| Corto plazo 4,5 | 8             | 13,88    |
| Medio plazo 4,5 | 6             | 28,33    |
| Corto plazo 8,5 | 9             | 17,11    |
| Medio plazo 8,5 | 8             | 26,38    |



Tabla 23: Subcuenca de Alarcón (final). Parámetros sequías edáficas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración |
|-----------------|---------------|----------|
| Corto plazo 4,5 | 8             | 12,88    |
| Medio plazo 4,5 | 8             | 20,38    |
| Corto plazo 8,5 | 8             | 20,13    |
| Medio plazo 8,5 | 10            | 18,40    |

Se puede observar como en general, las sequías son más duraderas en el escenario RCP 8,5 que en el RCP 4,5.

### 7.2.3 Sequías hidrológicas.

Se pasa a continuación a presentar los estadísticos de las sequías hidrológicas para los posibles escenarios futuros.

Tabla 24: Subcuenca de Contreras. Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 7             | 19,00    | -10,02   | -0,84      |
| Medio plazo 4,5 | 5             | 52,40    | -59,87   | -1,66      |
| Corto plazo 8,5 | 8             | 29,57    | -24,87   | -1,23      |
| Medio plazo 8,5 | 4             | 71,25    | -107,15  | -2,35      |

Tabla 25: Subcuenca de Bellús. Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 6             | 44,00    | -47,38   | -1,37      |
| Medio plazo 4,5 | 7             | 35,57    | -36,75   | -1,71      |
| Corto plazo 8,5 | 8             | 28,14    | -34,18   | -1,76      |
| Medio plazo 8,5 | 6             | 43,50    | -49,72   | -2,33      |

Tabla 26: Subcuenca de Forata. Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 7             | 25,43    | -16,65   | -1,02      |
| Medio plazo 4,5 | 8             | 29,14    | -19,76   | -1,05      |
| Corto plazo 8,5 | 7             | 23,71    | -20,18   | -1,06      |
| Medio plazo 8,5 | 5             | 50,40    | -55,88   | -1,72      |

Tabla 27: Subcuenca de Tous. Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 6             | 36,17    | -120,30  | -5,66      |
| Medio plazo 4,5 | 9             | 30,00    | -97,50   | -4,81      |
| Corto plazo 8,5 | 7             | 34,86    | -135,93  | -5,07      |
| Medio plazo 8,5 | 5             | 54,40    | -311,85  | -8,81      |

Tabla 28: Subcuenca de Sueca. Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 6             | 36,67    | -44,40   | -1,66      |
| Medio plazo 4,5 | 7             | 27,14    | -30,32   | -1,51      |
| Corto plazo 8,5 | 7             | 27,29    | -34,98   | -1,87      |
| Medio plazo 8,5 | 6             | 40,83    | -68,84   | -2,70      |

Tabla 29: Subcuenca de Molinar. Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 1             | 285      | -749,05  | -4,08      |
| Medio plazo 4,5 | 1             | 288      | -928,00  | -4,90      |
| Corto plazo 8,5 | 1             | 277      | -855,48  | -4,40      |
| Medio plazo 8,5 | 1             | 288      | -994,14  | -5,92      |

Tabla 30: Subcuenca de Alarcón (cabecera). Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 9             | 13,33    | -11,88   | -1,28      |
| Medio plazo 4,5 | 7             | 25,14    | -31,46   | -2,15      |
| Corto plazo 8,5 | 9             | 20,89    | -21,26   | -1,73      |
| Medio plazo 8,5 | 5             | 46,40    | -63,18   | -2,82      |

Tabla 31: Subcuenca de Alarcón (intermedia). Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 8             | 18,13    | -15,21   | -1,30      |
| Medio plazo 4,5 | 9             | 28,00    | -25,59   | -1,49      |
| Corto plazo 8,5 | 8             | 25,38    | -26,28   | -1,73      |
| Medio plazo 8,5 | 5             | 52,60    | -70,64   | -1,83      |

Tabla 32: Subcuenca de Alarcón (final). Parámetros sequías hidrológicas (escenarios)

| Escenario       | Nº de sequías | Duración | Magnitud | Intensidad |
|-----------------|---------------|----------|----------|------------|
| Corto plazo 4,5 | 7             | 14,00    | -9,37    | -0,89      |
| Medio plazo 4,5 | 9             | 22,67    | -20,33   | -1,29      |
| Corto plazo 8,5 | 9             | 20,22    | -16,42   | -1,23      |
| Medio plazo 8,5 | 5             | 48,20    | -59,53   | -1,81      |

### Comparación de los resultados obtenidos:

A la vista de estos resultados, se puede concluir que los posibles escenarios futuros predicen, en general, un impacto negativo del cambio climático en los diferentes tipos de sequías analizadas para el sistema de explotación del río Júcar.

Además, se muestra también que con el paso del tiempo se van a ir agravando sus efectos. Simplemente comparando los efectos del corto y del medio plazo, ya que son agrupaciones homogéneas de 30 años, en los dos escenarios estudiados se evidencia un incremento de los efectos nocivos del cambio climático.

En caso de cumplirse las predicciones, principalmente las del escenario RCP 8,5, las sequías serán más duraderas en el tiempo y por tanto, el déficit hídrico será mayor. Además también serán más intensas, lo que quiere decir que durante el periodo de sequías, la recarga hídrica será menor, lo que obligará a estar mejor preparados frente al suceso.

Si bien es cierto que a corto plazo, algunas de las previsiones estudiadas indican que no habría cambios considerables a estos efectos (en el R.C.P. 4,5), a largo plazo sí que parece ser que aparecerán en mayor o menor grado.

Por otro lado, no solo se sentirán los efectos del cambio climático en los fenómenos de sequías, sino que además, como se señala en el subapartado anterior, la disponibilidad del recurso hidráulico puede ser menor en función de que los escenarios previstos en este trabajo final de grado sean más o menos certeros en su predicción de ocurrencia.

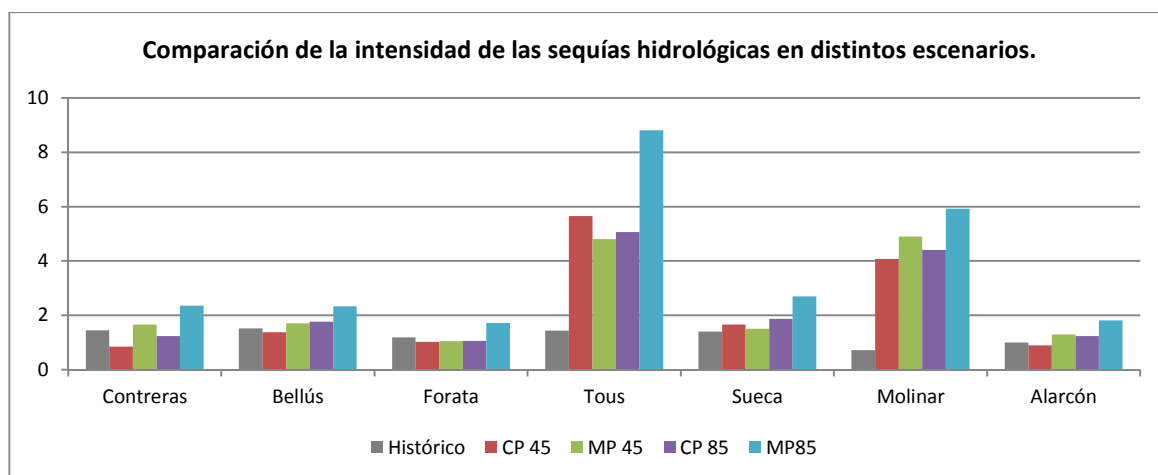
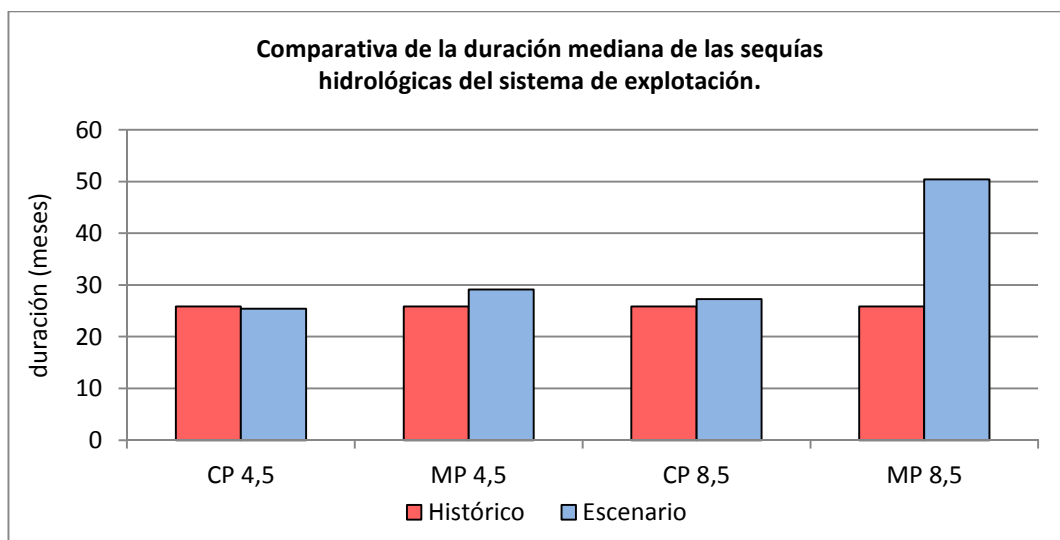


Figura 32: Comparativa del parámetro intensidad de las sequías hidrológicas de los distintos escenarios estudiados.

Para ilustrar estos comentarios, se presenta la gráfica anterior, que muestra la comparativa de la intensidad de las sequías para las subcuencas estudiadas de los diversos escenarios contemplados.

Por otro lado, para observar de forma visual el impacto de las sequías hidrológicas de las subcuencas del sistema de explotación, se muestra a continuación la duración mediana de las sequías hidrológicas de las subcuencas analizadas, contrastándose con la duración mediana para el periodo histórico.



*Figura 33: Comparativa de la duración de las sequías hidrológicas en el caso de estudio.*

Se observa claramente como las sequías hidrológicas, a corto plazo, no sufren una gran distorsión en cuanto a su duración. Sin embargo, se nota que a medio plazo, la tendencia clara es a aumentar su duración. Esto ocurre tanto en el escenario del RCP 4,5 como en el 8,5, aunque en este último, el efecto es mucho más acusado que en el primero.

Por tanto, ya que parece ser que las sequías serán más duraderas y de mayor intensidad en el sistema de explotación Júcar, y por tanto de mayor magnitud, se debería de plantear un sistema de mitigación de efectos de las sequías.

## Capítulo 8 : Adaptación al cambio climático en el sistema de explotación del río Júcar.

El presente capítulo trata de poner sobre la mesa una serie de acciones y/o posibles medidas a realizar para mitigar los efectos de las sequías hidrológicas en el sistema de explotación del Júcar.

Es importante señalar que las medidas que se puedan tomar a escala del sistema de explotación, o incluso a escala de cuenca, lo único que son capaces de hacer es paliar las consecuencias nocivas del cambio climático (adaptación), pero nunca neutralizarlas a largo plazo.

Para ilustrar los efectos que provocan la alteración de los parámetros de las sequías por el cambio climático, se ha obtenido el caudal seguro que puede proporcionar el embalse de Contreras en cada uno de los escenarios estudiados. Para homogeneizar la comparación, se decide comenzar el periodo de estudio con el embalse a la mitad de su capacidad.

El caudal seguro simboliza el máximo caudal que se puede suministrar permanentemente en el periodo de estudio. Caudales superiores provocarían fallo del sistema, entendiendo como fallo del sistema el no poder suministrar dicho caudal

Tabla 33: Caudal seguro de Contreras.

| Escenario       | Caudal seguro (hm <sup>3</sup> /mes) |
|-----------------|--------------------------------------|
| Histórico       | 26,65                                |
| Corto plazo 4,5 | 28,61                                |
| Medio plazo 4,5 | 16,24                                |
| Corto plazo 8,5 | 21,36                                |
| Medio plazo 8,5 | 15,43                                |

Tal y como era de esperar, a corto plazo no existen grandes diferencias, incluso en el escenario del R.C.P. 4,5 a corto plazo puede ser beneficioso.

Sin embargo, a medio plazo las reducciones de las aportaciones son importantes, lo que obliga a plantear una serie de medidas para paliar estos efectos.

Las medidas que se proponen se pueden clasificar en medidas estructurales y medidas de gestión.

### 8.1 Medidas estructurales.

Las medidas estructurales que se proponen, tienen el enfoque de aprovechar mejor el recurso hídrico disponible actuando sobre la infraestructura del sistema. Se puede actuar sobre los siguientes puntos:

1. Modernización del sistema de transporte:

La red de transporte de agua del sistema de explotación del río Júcar se compone principalmente de acequias y azarbes. Por diversos factores, se tienen pérdidas en el transporte de agua de esta forma. Las filtraciones en los paramentos verticales de la red son las pérdidas mayoritarias en este tipo de sistemas de transporte, aunque existen otras como la evaporación. En la actualidad hay sistemas más eficientes, como es el caso del transporte por tubería.

Por tanto, una forma de reducir las pérdidas en el transporte del recurso, es realizar obras de modernización, de forma que este transporte se realice a través de conducciones a presión.

Si bien es verdad que en la actualidad ya se han acometido obras de modernización, como por ejemplo las actuaciones realizadas en el transporte de agua por la Acequia Real del Júcar para sustituir el transporte en lámina libre por transporte de agua por tubería, aún queda mucho trabajo por realizar.

2. Aumento de la capacidad de agua embalsada:

Puede ser conveniente el acometer obras de ampliación de la capacidad de agua embalsada para aprovechar la mayor cantidad posible de agua aportada de episodios habituales en esta región tales como aguaceros de gota fría o en situaciones en las que los embalses actuales puedan encontrarse en situación de no aceptación del recurso y así tener que aliviar esas aportaciones. De esta forma, se podría aumentar la disponibilidad de agua dentro del sistema.

3. Estaciones desaladoras:

Una forma de aumentar el recurso disponible en el sistema de explotación del Júcar es mediante la desalación de agua del mar. Esto es posible ya que este sistema de explotación dispone de diversos kilómetros de costa donde instalar las estaciones desaladoras.

Si bien es verdad que para grandes distancias (mayores de 50 km) la infraestructura puede resultar cara en cuanto al abastecimiento de agua, para los abastecimientos más cercanos al litoral podría resultar recomendable emplear este tipo de recurso, dejando para las demandas más lejanas al litoral mayor proporción del recurso de tipo convencional.

Sin embargo, también se debería de evaluar la medida desde el punto de vista de la incidencia en el aspecto medioambiental, ya que estas estaciones desaladoras generan un rechazo, llamado salmuera, el cual se suele dispersar en las aguas de transición afectando al ecosistema marino. Además hay que recordar que las costas de la Demarcación del Júcar pertenecen al mar Mediterráneo, poblado por la llamada Poseidonia Oceánica, que goza de especial protección.

#### 4. Modernización del regadío:

En la mayoría de los casos, puede resultar conveniente la promoción de la modernización de los sistemas de regadío. En el sistema de explotación del Júcar, existe mucha superficie agrícola con un sistema de riego ineficiente como es el “riego a manta”, que trata de regar por inundación los campos de cultivo, que puede llegar a alcanzar el 0,6 de eficiencia.

Si bien es verdad a grandes rasgos, es conveniente realizar estudios en zonas concretas para ver si esto es beneficioso o perjudicial, ya que la modernización del regadío generalizada puede llegar a provocar un “efecto rebote”. Este vendría dado por la disminución de la recarga de los acuíferos debido al riego a manta, ya que el riego por goteo, por ejemplo, al ser más eficiente, reduce drásticamente la percolación del agua en el terreno.

Por ello se propone en este trabajo, la realización de campañas de estudios pormenorizadas para prever si resulta conveniente o no la modernización del regadío y allí donde resulte ventajoso, cambiar, con la ayuda de incentivos económicos a los agricultores, a sistemas más eficientes como el riego por goteo o el riego por aspersión, que alcanzan eficiencias mucho mayores.

### **8.2 Medidas de gestión del recurso.**

Las medidas de gestión del recurso se orientan a promover el uso más eficiente tanto a nivel social como económico. De esta forma, se propone el empleo de recursos alternativos así como la creación de políticas de gestión que racionalicen los impactos económicos en la zona de estudio.

#### 1. Extensión del uso de aguas regeneradas:

Se trata de una medida ya contemplada en la legislación española. En el año 2007 se publica el R.D. 1620/2007 de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

Este real decreto, establece los usos admitidos para las aguas regeneradas así como los criterios de calidad que deben de cumplir para cada uso. También establece una serie de prohibiciones expresas al uso de estas aguas.

La utilización de aguas regeneradas no hace aumentar el volumen del recurso disponible, pero hace que el agua se pueda emplear más veces en el sistema, de forma que a igualdad de disponibilidad, se puede aumentar el número de procesos que utilizan el agua. Por ejemplo, una industria que necesite emplear agua para refrigeración o limpieza de sus productos, emplee de nuevo ese volumen de agua que la industria ha utilizado tras depurarla, el mayor número de veces posible.

2. Medidas de reducción de la evaporación en depósitos:

Existen técnicas novedosas para reducir la evaporación en depósitos de agua en el caso de sequías. Reduciendo la evaporación, se consigue un mayor aprovechamiento del agua embalsada. Esto se puede conseguir con las denominadas "bolas de sombra". Se trata de esferas de polietileno de alta densidad, de unos 10 cm de diámetro, que tras verterlas en el depósito, crea una superficie que impide la penetración de la luz solar, reduciendo así la evaporación. Hay ciudades de Estados Unidos que ya están utilizando este sistema, como es el caso de Los Ángeles.

3. Políticas de concienciación ciudadana:

En este enfoque lo que se pretende es la creación de una serie de campañas de concienciación ciudadana para que se emplee el recurso de forma más eficiente y no se malgaste.

Principalmente está orientado a la población cosmopolita, con medidas tales como por ejemplo, la instalación de cisternas de doble descarga para su uso. Si se consigue concienciar a la población para que se rebaje la demanda del recurso, queda más cantidad de recurso para otros usos y/o almacenar para una posible sequía.

4. Políticas de contención del gasto de agua:

Por último, lo que se puede hacer es establecer en el plan de sequías de la cuenca una serie de medidas tales como:

- Sistema de incentivos para el cambio de cultivo por otros de menor consumo hídrico.
- Para sequías prolongadas, primar el recurso a cultivos con menor demanda hídrica.

En este sistema de explotación, el cultivo de arroz es importante. También es verdad que es un cultivo que en determinadas épocas del año, consume mucha agua.

Se debería de estudiar por tanto, ante un evento de sequía, si resulta conveniente para la sociedad, el reducir en mayor grado la dotación de agua a cultivos tales como el arroz que a otros como los cítricos, ya que el coste económico de la pérdida del cultivo de arroz es menos importante que el de los cítricos. Se podría compensar a los agricultores perjudicados con acciones como por ejemplo una reducción de las tarifas del agua durante la época normal (sin sequías) o mediante compensaciones económicas que reduzcan los daños por la pérdida de arroz, equiparándolas a las pérdidas que resulte de la menor reducción del volumen suministrados a otros cultivos como los cítricos.



## Capítulo 9 : Síntesis y conclusiones.

En este trabajo final de grado se ha tratado de analizar el impacto del cambio climático sobre las sequías en el sistema de explotación del Júcar.

Para ello, se ha partido de los nuevos modelos climáticos del proyecto CORDEX de los que se obtuvieron las variables precipitación y temperatura para los posibles escenarios futuros.

Con las variables precipitación y temperatura obtenidas del proyecto SPAIN02, y tras obtener la ETP, se calibraron los parámetros de una serie de modelos conceptuales agregados de Témez (Témez, 1977), con dos ramas de descarga en la aplicación de los acuíferos, en las diversas subcuencas en las que se dividió el sistema de explotación en el periodo histórico.

Con los modelos calibrados para el periodo histórico, se introdujeron las variables del modelo climático para los posibles escenarios futuros y se obtuvo la evolución de las precipitaciones, de la humedad del suelo y de la aportación de los caudales en cada una de las subcuencas estudiadas.

La identificación de las sequías se ha realizado mediante el empleo de una serie de índices estandarizados basados en el SPI estableciendo el mismo criterio que el usado en el *“Plan especial de alerta y eventual sequía en la Confederación Hidrográfica del Júcar”* (C.H.J.,2007). Además se le aplicó la teoría de rachas a las diversas variables, obteniendo así el número de sequías, así como su duración, magnitud e intensidad. Todo esto se ha realizado para el periodo histórico así como para cada uno de los posibles escenarios futuros estudiados.

Tras esto, se ha comparado los efectos de cada una de las diferentes sequías en el sistema de explotación así como también se ha comparado la disponibilidad del recurso hídrico en el sistema. En ambos casos, se observa que, en general, a corto plazo hay un escenario que indica un posible efecto beneficioso, pero que a medio plazo, tal como indican el resto de escenarios, el efecto del cambio climático puede ser muy acusado, con reducciones de las aportaciones de aproximadamente hasta el 40%.

Para finalizar, se propone una serie de medidas para combatir los efectos perniciosos del cambio climático en el sistema de explotación del Júcar. Para ello se ha diferenciado entre medidas estructurales y medidas de gestión del recurso, con diferentes enfoques de actuación, ya sea para mejorar o construir infraestructuras de forma que se tengan menores pérdidas en el transporte o aumento de la capacidad embalsada, o bien estableciendo una política de gestión basada en los incentivos y en las compensaciones económicas para los mayores perjudicados por la desigual reducción de aportaciones, que están basadas en el coste socioeconómico de los diferentes cultivos.

Como conclusiones de este trabajo final de grado, se puede reseñar las siguientes:

- El cambio climático es un proceso indudable que puede producir importantes distorsiones en los aspectos ambientales, sociales y económicos de esta sociedad.

- Se prevé que la duración de las sequías en el sistema de explotación del Júcar aumente, así como la intensidad de las mismas.
- Los efectos no se van a sentir por igual en todas las áreas.
- Se necesitan medidas efectivas para tratar de evitar al máximo sus efectos.
- Estas medidas pasan por todos los niveles de actuación, desde las acciones internacionales hasta las pequeñas actuaciones individuales.
- Es posible actuar para reducir en gran medida los efectos nocivos, pero tal y como queda reflejado en la comparativa de los escenarios RCP 4,5 y RCP 8,5, mientras más se tarde en actuar, mayor será la intensidad de esas medidas y por tanto del coste económico de las mismas.
- Puede que sea necesario la implementación de medidas para mitigar los efectos del cambio climático en el sistema de explotación Júcar no aceptadas por todos los sectores de población, por ejemplo las medidas de contención del gasto de agua en el sector arrocero. Así puede ser beneficioso establecer charlas explicativas y participativas con estos sectores.

Para finalizar, me gustaría señalar que se debe de entender las limitaciones en los modelos por causas de simplificación de los procesos físicos que intervienen (como en todos los modelos), la obtención de los datos y el posible sesgo de la información. Por ello se trató de trabajar con series lo más largas posibles. Además, el proceso de predicción puede tener factores que se desarrollen entre el trabajo realizado y la época de predicción de forma que cambie sustancialmente las previsiones obtenidas.

Por tanto, los resultados obtenidos de este trabajo final de grado se deben de entender como orientativos, y que pueden ayudar a entender mejor los efectos analizados en el sistema y nunca considerarlos como una verdad absoluta.

## Referencias.

- C.H.J. 2007. Plan especial de alerta y eventual sequía en la Confederación Hidrográfica del Júcar. Programa A.G.U.A.
- C.H.J. 2013. Esquema de temas importantes para la planificación hidrológica en la demarcación hidrográfica del Júcar. Mayo de 2013
- C.H.J. 2014. Memoria - Anejo 6. Sistemas de explotación y balances. Demarcación Hidrográfica del Júcar.
- C.H.J. 2014. Memoria Proyecto del plan hidrológico de cuenca. Demarcación hidrográfica del Júcar.
- C.H.J. Ficha de embalse 8009. Embalse de Contreras. [Consulta Julio 2015] Disponible en: <http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/afo/embalse-datos.asp>
- C.H.J. La cuenca hidrográfica. Hidrología. [Consulta: Julio de 2015]. Disponible en: <http://www.chj.es/es-es/medioambiente/cuencahidrografica/Paginas/Hidrolog%C3%ADa.aspx#dos>.
- Changnon, Stanley A., Jr. 1987. Detecting Drought Conditions in Illinois. Illinois State Water. Survey, Champaign, Circular 169.
- Christensen O.B., Gutowski W.J., Nikulin G. and Legutke S. 2014. CORDEX Archive design. Disponible en <http://cordex.dmi.dk/>
- Fernández, J. Grupo de Meteorología Aplicada UC-INM. Modelos climáticos regionales.
- García Prats, A. 2010. Sequías. Teoría y prácticas. Editorial, Universidad Politécnica de Valencia
- Grupo de meteorología de Santander [Consulta: Agosto de 2015]. Disponible en: <http://www.meteo.unican.es/es/projects/CORDEX>
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., and Engen-Skaugen, T. 2012. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3383-3390. doi:10.5194/hess-16-3383-2012
- Herrera, S., Fernández, J. and Gutiérrez, J. M. 2015. Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: assessing the effect of the interpolation methodology. *Int. J. Climatol.* doi: 10.1002/joc.4391
- Index: SPEI, The Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index. [Consulta Junio de 2015]. Disponible en: <http://sac.csic.es/spei/>
- IPCC, 2013. Cambio Climático: Bases Físicas. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC. Grupo de trabajo I. Fundación Biodiversidad, Oficina Española de Cambio Climático, Agencia Estatal de Meteorología, Centro Nacional de Educación Ambiental
- IPCC, 2013: Annex II: Climate System Scenario Tables [Prather, M., G. Flato, P. Friedlingstein, C. Jones, J.-F. Lamarque, H. Liao and P. Rasch (eds.)]. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. idgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014 Synthesis Report. Summary for Policymakers.
- Naciones Unidas, 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático.
- National Drought Mitigation Center. [Consulta Junio de 2015]. Disponible en: <http://drought.unl.edu/>
- Pulido Velázquez, M. 2010 Apuntes de Planificación y gestión de los recursos hídricos de ITOP-H.
- Ramirez, M. 96 millones de bolas de plástico para luchar contra la sequía en California. [Consulta Agosto de 2015] Disponible en: <http://www.renovablesverdes.com/96-millones-de-bolas-de-plastico-para-luchar-contra-la-sequia-en-california/>
- Real Academia Española. [Consulta: Agosto de 2015]. Disponible en: <http://www.rae.es/>
- Real Decreto Legislativo R.D.L. 1/2001, de 20 de Julio, por el que se aprueba el texto refundido de la ley de aguas. BOE, 24 de julio de 2001, num 176, p. 26791 a 26817
- Real Decreto R.D. 125/2007, de 2 de febrero, por el que se fija el ámbito territorial de las demarcaciones hidrográficas. BOE, 3 de febrero de 2007, num 30, p. 5118 a 5120
- Real Decreto R.D. 1620/2007 de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. BOE, 8 de diciembre de 2007, num 294, p.50639 a 50661
- Sistema de Información Agroclimática para el regadío. [Consulta: Mayo de 2015]. Disponible en: <http://portal.magrama.gob.es/websiar/SeleccionParametrosMap.aspx?dst=1>
- Vicente-Serrano, Sergio M.; Beguería Santiago; López-Moreno, Juan I.; A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of climate. Octubre de 2009
- Vujica Yevjevich, 1967. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Hydrology papers Colorado State University. Fort Collins, Colorado.
- WRCP Cordex [Consulta: Agosto de 2015]. Disponible en: <http://www.cordex.org/index.php/about-cordex/ipoc>