

# Índice

Resumen .....	I
Agradecimientos .....	II
<b>Capítulo 1. Marco general</b> .....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Planteamiento y estructura.....	4
1.4. Referencias bibliográficas .....	5
<b>Capítulo 2. Estado del arte</b> .....	7
2.1. Perspectiva sobre la adaptación al cambio climático .....	7
2.2. Caracterización de impactos. El enfoque "top-down" .....	8
2.3. Caracterización de la vulnerabilidad. El enfoque "bottom-up".....	9
2.4. Enfoques existentes para la adaptación en el sector del agua .....	10
2.4.1. Análisis de la respuesta del sistema.....	11

2.4.2.	Identificación de alternativas.....	12
2.4.3.	Selección de alternativas.....	13
2.4.4.	Clasificación de metodologías.....	14
2.4.5.	Enfoques mixtos "top-down"/"bottom-up".....	16
2.5.	Oportunidades para la investigación y motivación .....	16
2.6.	Referencias bibliográficas .....	18
<b>Capítulo 3. Caso de estudio</b>	.....	<b>23</b>
3.1.	Descripción general.....	23
3.2.	Referencias bibliográficas .....	27
<b>Capítulo 4. Enfoque mixto "Top-down"/"Bottom-up"</b>	.....	<b>29</b>
4.1.	Introducción.....	29
4.2.	Esquema general .....	30
4.3.	Referencias bibliográficas .....	32
<b>Capítulo 5. Factores y tendencias climáticas en el periodo histórico.</b>		
<b>Métodos</b>	.....	<b>33</b>
5.1.	Introducción.....	33
5.2.	Análisis de tendencias en las series temporales .....	34
5.3.	Caracterización de sequías meteorológicas e hidrológicas.....	35
5.3.1.	Índices de sequía estandarizados .....	35
5.3.2.	Método de cálculo de la evapotranspiración potencial para el SPEI.....	38
5.4.	Estudio de la influencia de las teleconexiones.....	43
5.4.1.	Oscilación del Atlántico Norte (NAO) .....	43
5.4.2.	Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO) .....	44
5.4.3.	Relación entre teleconexiones y sequías meteorológicas recientes.....	45
5.4.4.	Relación entre el índice NAO y las sequías históricas.....	45

---

5.5. Referencias bibliográficas .....	46
<b>Capítulo 6. Factores y tendencias climáticas en el periodo histórico.</b>	
<b>Resultados .....</b>	<b>51</b>
6.1. Introducción .....	51
6.2. Análisis de tendencias en las series temporales .....	51
6.3. Caracterización de sequías meteorológicas e hidrológicas .....	55
6.4. Estudio de la influencia de las teleconexiones .....	57
6.4.1. Oscilación del Atlántico Norte (NAO) .....	57
6.4.2. Oscilación del Mediterráneo Occidental (WeMO) .....	59
6.4.3. Relación entre teleconexiones y sequías meteorológicas recientes .....	60
6.4.4. Relación entre el índice NAO y las sequías históricas.....	64
6.5. Discusión .....	66
6.6. Referencias bibliográficas .....	67
<b>Capítulo 7. Impactos del cambio climático. Enfoque "Top-down".</b>	
<b>Métodos.....</b>	<b>69</b>
7.1. Introducción .....	69
7.2. Esquema general .....	70
7.3. Selección de proyecciones de cambio climático y reescalado local.....	71
7.3.1. Selección de combinaciones de modelos de cambio climático .....	71
7.3.2. Corrección del sesgo de las variables climáticas .....	73
7.4. Modelización hidrológica .....	74
7.4.1. Modelo de Témez.....	74
7.4.2. Modelo GR2M .....	76
7.4.3. Modelo HBV-light .....	77
7.5. Análisis de sequías en un contexto de cambio climático.....	77

7.5.1. Índices estandarizados relativos .....	78
7.5.2. Evaluación de la incertidumbre y la estacionariedad de los parámetros .....	80
7.6. Referencias bibliográficas .....	80

## **Capítulo 8. Impactos del cambio climático. Enfoque "Top-down".**

<b>Resultados</b> .....	85
8.1. Introducción.....	85
8.2. Escenarios futuros de precipitación y temperatura .....	85
8.3. Bondad de ajuste de los modelos hidrológicos .....	87
8.4. Aportaciones futuras .....	89
8.5. Incertidumbre asociada a la modelización hidrológica .....	91
8.6. Análisis de sequías en un contexto de cambio climático.....	93
8.6.1. Índices estandarizados relativos .....	93
8.6.2. Evaluación de la incertidumbre y la estacionariedad de los parámetros .....	96
8.7. Discusión .....	99
8.8. Referencias bibliográficas .....	102

## **Capítulo 9. Función de respuesta climática del sistema.**

<b>Métodos</b> .....	105
9.1. Introducción.....	105
9.2. Esquema general .....	106
9.3. Implementación y calibración de un modelo de gestión del agua.....	106
9.4. Identificación de criterios de fallo.....	108
9.5. Generación de series sintéticas de aportaciones.....	109
9.6. Simulación del comportamiento del sistema para las series sintéticas.....	111
9.7. Asignación de variables climáticas a las series sintéticas de aportaciones.	111
9.8. Análisis del desfase temporal entre inicio de la sequía y fallo del sistema	112

---

9.9. Implementación y calibración de un modelo de regresión logística (LR) ..	113
9.10. Validación del modelo LR mediante series de cambio climático .....	114
9.11. Referencias bibliográficas .....	116
<b>Capítulo 10. Función de respuesta climática del sistema.</b>	
<b>Resultados</b> .....	119
10.1. Introducción.....	119
10.2. Calibración del modelo de gestión de recursos hídricos .....	119
10.3. Validación de las series sintéticas de aportaciones .....	120
10.4. Desfase temporal entre sequía y fallo del sistema.....	122
10.5. Comportamiento del sistema para las series sintéticas de aportaciones .....	124
10.6. Bondad de ajuste del modelo de regresión logística (LR) .....	125
10.7. Capacidad predictiva del modelo LR (validación).....	127
10.8. Discusión .....	131
10.9. Referencias bibliográficas .....	133
<b>Capítulo 11. Escenarios socioeconómicos y medidas de adaptación.</b>	
<b>Enfoque "Bottom-up". Métodos</b> .....	135
11.1. Introducción.....	135
11.2. Esquema general .....	136
11.3. Escenarios socioeconómicos.....	137
11.4. Entrevistas con expertos y talleres participativos. Sector agrícola.....	138
11.4.1. Entrevistas con expertos .....	139
11.4.2. Diseño de narrativas .....	139
11.4.3. Talleres participativos con integrantes del sector agrícola local.....	139
11.5. Análisis de medidas de adaptación a escala de cuenca.....	141
11.6. Referencias bibliográficas .....	142

<b>Capítulo 12. Escenarios socioeconómicos y medidas de adaptación.</b>	
<b>Enfoque "Bottom-up". Resultados.....</b>	<b>145</b>
12.1. Introducción.....	145
12.2. Tendencias futuras del sector agrícola .....	145
12.2.1. Combinación SSP5xRCP 8.5 (liberalismo).....	145
12.2.2. Combinación SSP3xRCP 8.5 (proteccionismo) .....	146
12.3. Potenciales medidas de adaptación .....	147
12.3.1. Medidas relativas a la oferta (disponibilidad del recurso).....	147
12.3.2. Medidas que afectan a la demanda .....	148
12.3.3. Otras medidas.....	149
12.3.4. Evaluación de las medidas a escala de cuenca .....	150
12.4. Discusión .....	154
12.5. Referencias bibliográficas .....	154
<b>Capítulo 13. Selección de medidas de adaptación. Modelo hidroeconómico. Métodos .....</b>	<b>155</b>
13.1. Introducción.....	155
13.2. Caracterización de medidas de adaptación .....	156
13.2.1. Modernización de regadíos .....	156
13.2.2. Desalación.....	160
13.2.3. Reutilización .....	162
13.2.4. Pozos de sequía y rebombes .....	166
13.2.5. Sustitución de bombeos .....	167
13.3. Inclusión de medidas de adaptación en el modelo de gestión.....	168
13.4. Referencias bibliográficas .....	172

---

<b>Capítulo 14. Selección de medidas de adaptación. Modelo hidroeconómico. Resultados .....</b>	<b>177</b>
14.1. Introducción .....	177
14.2. Escenario sin medidas .....	177
14.3. Activación de medidas de adaptación .....	178
14.3.1. Modernización de regadíos .....	178
14.3.2. Desalación .....	183
14.3.3. Reutilización .....	184
14.3.4. Rebombeos .....	186
14.4. Déficit en los escenarios con y sin medidas.....	187
14.5. Cálculo del coste del programa de medidas.....	188
14.6. Relación entre condiciones climáticas y coste del programa de medidas ..	191
14.7. Relación entre coste y eficacia del programa de medidas .....	194
14.8. Discusión .....	197
14.9. Referencias bibliográficas .....	199
<b>Capítulo 15. Conclusiones y líneas futuras de investigación .....</b>	<b>201</b>
15.1. Conclusiones .....	201
15.2. Líneas futuras de investigación .....	203
15.3. Referencias bibliográficas .....	204
<b>Anexo I. Divulgación de resultados .....</b>	<b>205</b>
Participación en congresos .....	205
Artículos en revistas de investigación .....	207
Capítulos de libros .....	207
Publicaciones relacionadas .....	207
Publicaciones pendientes.....	208

Publicaciones en elaboración.....	208
<b>Anexo II. Derechos de autor</b> .....	209
Reproducción parcial del contenido de artículos publicados.....	209



# Índice de figuras

<b>Figura 1.1.</b> Disminución del espacio de la adaptación debido a barreras.....	2
<b>Figura 2.1.</b> Esquema de clasificación de marcos metodológicos para adaptación. 15	
<b>Figura 3.1.</b> Demarcaciones hidrográficas intercomunitarias .....	24
<b>Figura 3.2.</b> Principales subcuencas, embalses y Unidades de Demanda Agraria (UDAs) y Urbana (UDUs) en la cuenca del Júcar .....	25
<b>Figura 4.1.</b> Enfoque mixto “top-down”/”bottom-up”. Esquema general .....	31
<b>Figura 5.1.</b> Test de autocorrelación de Anderson para la aportación anual. Subcuenca de Contreras.....	36
<b>Figura 5.2.</b> Estaciones SIAR consideradas en el sistema Júcar .....	39
<b>Figura 5.3.</b> Variación del coeficiente corrector “k” con la temperatura media durante los meses de invierno .....	40
<b>Figura 5.4.</b> ETP estimada (mm) usando el método de Penman-Monteith y el método de Thorntwaite modificado (Ec. 5.1) en dos zonas climáticas .....	41
<b>Figura 5.5.</b> ETP estimada (mm) usando el método de Penman-Monteith y el método de Thorntwaite modificado (Ec. 5.3) en dos zonas climáticas .....	42

<b>Figura 6.1.</b> Gráficos MASH de media móvil de precipitación (mm).....	52
<b>Figura 6.2.</b> Gráficos MASH de media móvil de temperatura (°C).....	53
<b>Figura 6.3.</b> Gráficos MASH de media móvil de caudal (m <sup>3</sup> /s).....	54
<b>Figura 6.4.</b> SPI12 y SPEI12 en la subcuenca de Contreras (1971-2000).....	55
<b>Figura 6.5.</b> Relación entre el SPEI y los índices NAO y WeMO para el periodo 1950-2016.....	61
<b>Figura 6.6.</b> Espectro de potencias “cross-wavelet” para el par SPEI/NAO en el Júcar .....	62
<b>Figura 6.7.</b> Potencia media del análisis “cross-wavelet” para el par SPEI/NAO en el Júcar.....	62
<b>Figura 6.8.</b> Espectro de potencias “cross-wavelet” para el par SPEI/WeMO en el Júcar .....	63
<b>Figura 6.9.</b> Potencia media del análisis “cross-wavelet” para el par SPEI/WeMO en el Júcar .....	63
<b>Figura 6.10.</b> Espectro de potencias “cross-wavelet” para el par precipitación/NAO invernal en la cabecera del Cabriel.....	64
<b>Figura 7.1.</b> Enfoque “top-down” para análisis de impactos del cambio climático	70
<b>Figura 7.2.</b> Comparativa entre la precipitación observada en el periodo de control y la generada por los modelos climáticos. Subcuenca de Contreras ..	72
<b>Figura 7.3.</b> Comparativa entre la temperatura observada en el periodo de control y la generada por los modelos climáticos. Subcuenca de Contreras .....	73
<b>Figura 7.4.</b> Esquema del modelo de Témex con dos ramas de descarga .....	75
<b>Figura 7.5.</b> SPI12 para la serie histórica y el escenario RCP 8.5 a medio plazo (MP) .....	78
<b>Figura 7.6.</b> rSPI12 en el escenario RCP 8.5 a medio plazo (MP) .....	79
<b>Figura 8.1.</b> Comparativa entre la precipitación y la temperatura en el periodo 1971-2000 y en los escenarios RCP 4.5 a corto (CP) y medio plazo (MP) en la cuenca alta .....	86

<b>Figura 8.2.</b> Comparativa entre la precipitación y la temperatura en el periodo 1971-2000 y en los escenarios RCP 4.5 a corto (CP) y medio plazo (MP) en la cuenca media .....	87
<b>Figura 8.3.</b> Comparativa entre la precipitación y la temperatura en el periodo 1971-2000 y en los escenarios RCP 4.5 a corto (CP) y medio plazo (MP) en la cuenca baja .....	87
<b>Figura 8.4.</b> Porcentaje de reducción de la aportación anual a corto plazo (2011-40) respecto de la media histórica (1940/41-2008/09) .....	89
<b>Figura 8.5.</b> Porcentaje de reducción de la aportación anual a medio plazo (2041-70) respecto de la media histórica (1940/41-2008/09) .....	90
<b>Figura 8.6.</b> Porcentaje de reducción de las aportaciones mensuales a medio plazo (2041-2070) .....	91
<b>Figura 8.7.</b> Reducción de aportaciones al embalse de Alarcón .....	92
<b>Figura 8.8.</b> Reducción de aportaciones al embalse de Contreras.....	93
<b>Figura 8.9.</b> Magnitud media de las sequías meteorológicas (rSPI) a corto (ST) y medio plazo (MT).....	94
<b>Figura 8.10.</b> Evolución del rSPI y el rSPEI en Contreras. RCP 8.5 medio plazo..	95
<b>Figura 8.11.</b> Magnitud media de las sequías meteorológicas (rSPEI) a corto (ST) y medio plazo (MT).....	95
<b>Figura 8.12.</b> Magnitud media de las sequías hidrológicas (rSSI) a corto (ST) y medio plazo (MT).....	96
<b>Figura 8.13.</b> Comparativa entre el OVL medio de los parámetros de la distribución del SPEI en los distintos escenarios .....	97
<b>Figura 8.14.</b> Distribución espacial del OVL para los distintos escenarios .....	98
<b>Figura 9.1.</b> Esquema general para la definición de la Función de Respuesta Climática del sistema .....	106
<b>Figura 9.2.</b> Esquema de gestión del sistema de recursos hídricos .....	108
<b>Figura 9.3.</b> Esquema del algoritmo “Simulated Annealing” .....	110

<b>Figura 9.4.</b> Procedimiento para vincular la precipitación (P) y la temperatura (T) a las aportaciones (Q).....	112
<b>Figura 9.5.</b> Enfoque “top-down” para caracterizar el comportamiento del sistema en un contexto de cambio climático .....	115
<b>Figura 10.1.</b> Bondad de ajuste del modelo de gestión de recursos hídricos .....	120
<b>Figura 10.2.</b> Media y desviación típica mensual de la serie observada y de la sintética.....	121
<b>Figura 10.3.</b> Autocorrelación temporal entre la serie observada y la sintética (Alarcón) y correlación espacial entre las series sintéticas de Alarcón y Contreras.....	122
<b>Figura 10.4.</b> Evolución del SPEI, SSI y fallos del sistema.....	123
<b>Figura 10.5.</b> Comportamiento del sistema en función de la media anual de P, T y Q en los 3 años precedentes.....	124
<b>Figura 10.6.</b> Franjas de calibración GiViTI.....	126
<b>Figura 10.7.</b> Gráfico 3D sobre la relación entre P, T y probabilidad de fallo para los modelos calibrados .....	126
<b>Figura 10.8.</b> Gráfico 2D sobre la relación entre P, T y probabilidad de fallo en el modelo “3 años” .....	127
<b>Figura 10.9.</b> Precipitación y temperatura anual (2011-2070). RCPs 4.5 y 8.5 ....	128
<b>Figura 10.10.</b> Franja de calibración GiViTI para los datos de ENSEMBLE.....	130
<b>Figura 10.11.</b> Mapa de curvas de nivel de probabilidad (modelo “3 años”) y salidas de los modelos climáticos .....	130
<b>Figura 10.12.</b> Mapa de curvas de nivel de probabilidad (modelo “4 años”) y salidas de los modelos climáticos .....	131
<b>Figura 11.1.</b> Enfoque “top-down” para analizar los impactos del cambio climático sobre las aportaciones y sequías.....	136
<b>Figura 11.2.</b> Desafíos mitigación/adaptación de los SSPs.....	137
<b>Figura 12.1.</b> Evaluación cuantitativa de medidas de adaptación .....	150

<b>Figura 12.2.</b> Potenciales barreras respecto a la modernización de regadíos .....	151
<b>Figura 12.3.</b> Potenciales barreras respecto a la reutilización .....	151
<b>Figura 12.4.</b> Potenciales barreras respecto a la desalación .....	152
<b>Figura 12.5.</b> Potenciales barreras respecto a los trasvases.....	152
<b>Figura 12.6.</b> Potenciales barreras respecto a los mercados del agua.....	153
<b>Figura 12.7.</b> Potenciales barreras respecto a los precios del agua.....	153
<b>Figura 12.8.</b> Potenciales barreras respecto a la gobernanza del agua.....	154
<b>Figura 13.1.</b> Esquema simplificado de la EDAR de Pinedo en la actualidad .....	163
<b>Figura 13.2.</b> Modelo de gestión del sistema modificado para incluir medidas....	169
<b>Figura 14.1.</b> Déficit medio anual en el escenario base (sin medidas) .....	178
<b>Figura 14.2.</b> Activación de la modernización (escenario RCP 4.5 corto plazo) .	179
<b>Figura 14.3.</b> Activación de la modernización (escenario RCP 8.5 corto plazo) .	180
<b>Figura 14.4.</b> Activación de la modernización (escenario RCP 4.5 medio plazo)	181
<b>Figura 14.5.</b> Activación de la modernización (escenario RCP 8.5 medio plazo)	182
<b>Figura 14.6.</b> Volumen medio anual de agua ahorrada para cada escenario .....	183
<b>Figura 14.7.</b> Volumen medio anual de agua desalada para cada escenario .....	184
<b>Figura 14.8.</b> Volumen medio anual de agua reutilizada para cada escenario .....	185
<b>Figura 14.9.</b> Volumen medio anual de agua rebombada para cada escenario ...	186
<b>Figura 14.10.</b> Déficit medio anual en los escenarios sin medidas (rojo) y con medidas (verde) .....	187
<b>Figura 14.11.</b> Coste de los programas de medidas (millones de €) para cada uno de los escenarios considerados .....	189
<b>Figura 14.12.</b> Volumen medio anual adicional debido a las medidas. RCP 4.5 a corto plazo .....	190
<b>Figura 14.13.</b> Volumen medio anual adicional debido a las medidas. RCP 8.5 a corto plazo .....	190

<b>Figura 14.14.</b> Volumen medio anual adicional debido a las medidas. RCP 4.5 a medio plazo .....	191
<b>Figura 14.15.</b> Volumen medio anual adicional debido a las medidas. RCP 8.5 a medio plazo .....	191
<b>Figura 14.16.</b> Relación entre precipitación, temperatura y coste. RCP 4.5 a corto plazo .....	192
<b>Figura 14.17.</b> Relación entre precipitación, temperatura y coste. RCP 8.5 a corto plazo .....	192
<b>Figura 14.18.</b> Relación entre precipitación, temperatura y coste. RCP 4.5 a medio plazo .....	193
<b>Figura 14.19.</b> Relación entre precipitación, temperatura y coste. RCP 8.5 a medio plazo .....	193
<b>Figura 14.20.</b> RCP 4.5 a corto plazo. Déficit evitado respecto al escenario sin medidas y coste.....	196
<b>Figura 14.21.</b> RCP 4.5 a medio plazo. Déficit evitado respecto al escenario sin medidas y coste.....	196
<b>Figura 14.22.</b> RCP 8.5 a corto plazo. Déficit evitado respecto al escenario sin medidas y coste.....	197
<b>Figura 14.23.</b> RCP 8.5 a medio plazo. Déficit evitado respecto al escenario sin medidas y coste.....	197

# Índice de tablas

<b>Tabla 5.1.</b> Categorías de sequía según los valores del SPI .....	38
<b>Tabla 6.1.</b> Análisis de sequías meteorológicas (SPI12) entre 1971 y 2000 .....	56
<b>Tabla 6.2.</b> Análisis de sequías hidrológicas (SSI12) entre 1971 y 2000 .....	57
<b>Tabla 6.3.</b> Correlación en los meses invernales entre el índice NAO y la precipitación .....	58
<b>Tabla 6.4.</b> Correlación en los meses invernales entre el índice NAO y la temperatura .....	58
<b>Tabla 6.5.</b> Correlación mensual entre el índice WeMO y la precipitación .....	59
<b>Tabla 6.6.</b> Correlación mensual entre el índice WeMO y la temperatura.....	60
<b>Tabla 6.7.</b> Correlación mensual entre los índices SPEI, NAO y WeMO .....	60
<b>Tabla 6.8.</b> Comparativa entre SPEI, NAO y sequías documentadas en CEDEX (2013).....	65
<b>Tabla 6.9.</b> Reducción de las aportaciones en la DHJ (hm <sup>3</sup> /año) en el periodo histórico .....	66

<b>Tabla 7.1.</b> Combinaciones de modelos climáticos globales (MCGs) y regionales (MCRs) .....	71
<b>Tabla 7.2.</b> Coeficientes de bondad de ajuste del modelo de Témex para las distintas subcuencas .....	76
<b>Tabla 8.1.</b> Bondad de ajuste de los modelos hidrológicos.....	88
<b>Tabla 9.1.</b> Coeficiente de correlación entre precipitación (mm) y aportación mensual (hm <sup>3</sup> ) .....	111
<b>Tabla 10.1.</b> Parámetros y bondad de ajuste de los modelos LR.....	125
<b>Tabla 10.2.</b> Bondad de ajuste de los modelos LR para las series de validación .	129
<b>Tabla 11.1.</b> Principales medidas de adaptación analizadas a escala de cuenca ..	141
<b>Tabla 13.1.</b> Superficie concesional y demanda bruta para distintos horizontes temporales .....	159
<b>Tabla 13.2.</b> Tarifas y costes medios del riego por goteo (€/m <sup>3</sup> ).....	159
<b>Tabla 13.3.</b> Distribución mensual del volumen de agua procedente de la EDAR de Pinedo potencialmente reutilizable para riego.....	164
<b>Tabla 13.4.</b> Costes de explotación por proceso de tratamiento (€/m <sup>3</sup> ) .....	165
<b>Tabla 13.5.</b> Cuotas vigentes EDAR Pinedo I y II en €/m <sup>3</sup> (sin IVA) .....	165
<b>Tabla 13.6.</b> Capacidad de bombeo de los pozos de sequía, volumen máximo bombeado en la sequía 2005/08 y volúmenes máximos a autorizar según escenario de sequía.....	166
<b>Tabla 13.7.</b> Capacidad de bombeo, volumen máximo rebombeado en la sequía 2005/08 y volúmenes máximos a autorizar para cada escenario de sequía.....	167
<b>Tabla 14.1.</b> Coste de las actuaciones consideradas (millones de €) a precio constante del año base .....	188
<b>Tabla 14.2.</b> Coste de las actuaciones de modernización consideradas (millones de €) en cada UDA.....	189



**Tabla 14.3.** Aportación media anual (hm<sup>3</sup>) en la cuenca del Júcar por modelo y escenario ..... 194