

Capítulo 4

Efecto del cambio climático en los recursos hídricos y el regadío

Alfonso Domínguez Padilla
José María Tarjuelo Martín-Benito
José Arturo de Juan Valero
Ángel Martínez Romero
*Centro Regional de Estudios del Agua (CREA)
Universidad de Castilla-La Mancha*

Introducción

La producción de alimentos está íntimamente ligada a las condiciones climáticas de la zona en la que se cultivan. La temperatura, la radiación solar y la disponibilidad hídrica son las principales variables climáticas que afectan a las cosechas. En consecuencia, cualquier modificación de las mismas afectará al rendimiento de los cultivos.

Desde la antigüedad, el ser humano ha tratado de reducir la variabilidad del efecto de las anteriores variables sobre los cultivos con el fin de planificar la actividad agraria, homogeneizar en cierta medida las cosechas y garantizar la denominada "Seguridad Alimentaria". Para ello, se han seleccionado las especies y variedades vegetales más adaptadas a las condiciones climáticas de cada zona, se han ajustado las fechas de siembra para lograr que los cultivos se desarrollen en las épocas más favorables, se ha aumentado la disponibilidad hídrica mediante el riego e incluso se han construido invernaderos capaces de controlar en mayor medida las condiciones climáticas en las que se desarrolla el cultivo.

En la actualidad, la humanidad se enfrenta a un nuevo reto originado por ella misma, el cambio climático. La emisión a la atmósfera de una gran cantidad de gases denominados de "efecto invernadero" está provocando, con una alta probabilidad, alteraciones de las condiciones climáticas a nivel planetario. En líneas generales, estas alteraciones se traducen en un aumento de las temperaturas medias y una reducción de las precipitaciones, incrementándose el número de años extremos en cuanto a temperaturas máximas, inundaciones y sequías (Moreno et al., 2005). A modo de ejemplo, se muestra la evolución de la temperatura media anual y de la precipitación anual acumulada en la estación climática de Los Llanos (Albacete) del Instituto Nacional de Meteorología (INM) (Figura 1).

La mayoría de los autores coinciden en señalar que los efectos que sobre la agricultura pueden tener las variaciones climáticas anteriores pueden ser de diferente signo. Efectivamente, un aumento de la temperatura implicará unas mayores necesidades hídricas de los cultivos, así como la posible aparición de nuevas plagas y enfermedades, pero también un crecimiento más rápido y menores limitaciones por frío, lo que puede reducir el efecto de una disminución de las precipitaciones. Además, el dióxido de carbono (CO_2), uno de los principales gases de efecto invernadero, tiene un efecto significativo sobre el rendimiento de los cultivos, ya que mayores concentraciones de este gas pueden favorecer el incremento de las cosechas (FAO, 1997; Moreno et al., 2005).

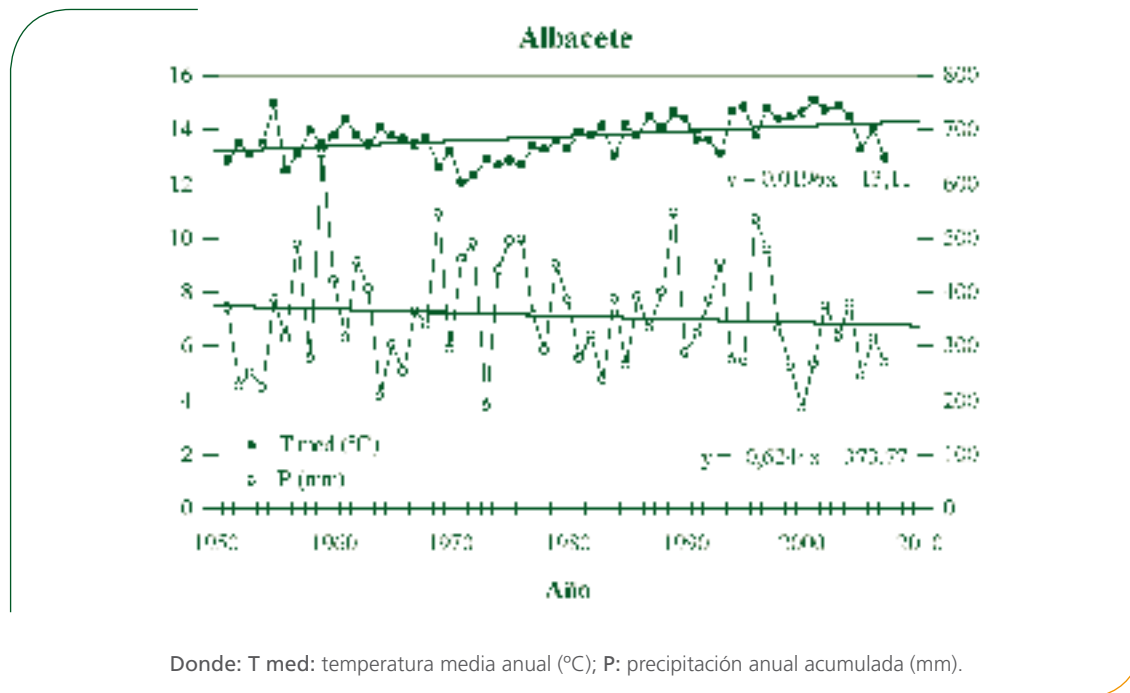


Figura 1: Evolución de la temperatura media anual y de la precipitación anual acumulada en la estación climática de Albacete para el periodo 1951-2007.

Este trabajo pretende analizar los efectos que sobre las zonas agrícolas de las principales cuencas hidrográficas de Castilla-La Mancha puede tener el cambio climático. Para ello, además de un estudio de las variables climáticas, se ha simulado la respuesta de los cultivos más relevantes de la cuenca del Júcar a varios escenarios climáticos mediante la utilización del modelo MOPECO (Ortega et al., 2004).

1. Escenarios de simulación

Son numerosos los trabajos que presentan diferentes escenarios climáticos posibles en función de la evolución mundial de emisiones de CO₂ a la atmósfera (Christensen et al., 2007; Jacob et al., 2007). El Special Report on Emissions Scenarios (SRES) del IPCC (2001) considera cuatro escenarios de emisiones de CO₂ identificados con las siguientes siglas: A1 (escenario de emisiones altas), A2 (escenario de emisiones medias-altas), B2 (escenario de emisiones medias-bajas) y B1 (escenario de emisiones bajas).

El aumento de la temperatura media global por acumulación de CO₂ en la atmósfera implica también cambios en la precipitación. En la Tabla 1 se muestran los valores de los cambios estacionales de la temperatura y la precipitación que, en promedio, podrían experimentarse en

Castilla-La Mancha por cada 1 °C de calentamiento global adicional respecto al clima Actual (periodo de referencia comprendido entre 1961 y 1990) para cualquier escenario de emisiones considerado (de Castro, 2008). Para construir esta tabla el autor ha utilizado los valores medios diarios de diversas variables climáticas, simulados por el conjunto de los modelos regionales aplicados en el proyecto PRUDENCE (Christensen et al., 2007).

Tabla 1: Promedios para Castilla-La Mancha del cambio medio anual y estacional de temperatura y de precipitación por cada grado de aumento de la temperatura media global respecto al periodo 1961-1990.

Periodo	Variación de temperatura (°C)					Variación de precipitación (%)				
	Mín.	25	50	75	Máx.	Máx.	25	50	75	Mín.
Invierno	0,7	1,0	1,1	1,3	1,4	-9	-2	0	1	9
Primavera	0,9	1,2	1,4	1,5	1,8	-17	-13	-10	-6	-2
Verano	1,4	1,9	2,0	2,1	2,4	-28	-16	-10	-5	0
Otoño	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	-15	-9	-7	-7	-1
Anual	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	-12	-9	-6	-5	-2

Nota: Se muestran los valores mínimos (Mín), máximos (Máx), medios (50) y de los cuartiles 25% y 75% de los cambios resultantes de todas las simulaciones realizadas con los modelos regionales. El color naranja indica un consenso entre todas las simulaciones en reducción de precipitación respecto al "clima actual" (periodo 1961-1990).

Para la simulación del efecto del cambio climático sobre la agricultura de Castilla-La Mancha, se ha considerado como escenario de simulación aquel en el que al final del siglo XXI la temperatura media global no haya aumentado más de 2 °C, al ser éste el objetivo de la Unión Europea.

Se han determinado dos periodos de tiempo en los que realizar la simulación, uno a corto plazo (2011-2040) y otro a medio plazo (2041-2070). No se ha considerado conveniente generar escenarios a más largo plazo dado que los avances tecnológicos, la aparición de nuevas técnicas agrícolas, la mejora genética de variedades, etc. pueden aminorar el efecto del cambio climático sobre la agricultura en el futuro. Según de Castro (2008), el incremento de la temperatura media mundial desde la época preindustrial hasta el periodo 1961-1990 fue de 0,6 °C. Para los dos periodos de simulación se ha asumido que los incrementos de la temperatura media global serán de 1 y 1,6 °C respectivamente respecto a la etapa preindustrial. Por lo tanto, los factores de multiplicación que hay que tener en cuenta en la Tabla 1 para obtener los datos de los escenarios de simulación (Tabla 2), se obtienen restando al incremento de la temperatura media mundial el incremento correspondiente al periodo de referencia, resultando 0,4 y 1 respectivamente. Los cuatro escenarios considerados son los que implican las mínimas y máximas variaciones de temperatura y precipitación respecto al clima Actual. En este trabajo se ha asumido que cualquier otro escenario ofrecería unos resultados comprendidos entre los anteriores.

Tabla 2: Escenarios de simulación.

	2011-2040 Mín.		2011-2040 Máx.		2041-2070 Mín.		2041-2070 Máx.	
	T (°C)	P (%)	T (°C)	P (%)	T (°C)	P (%)	T (°C)	P (%)
Invierno	0,3	3,6	0,6	-3,6	0,7	9,0	1,4	-9,0
Primavera	0,4	-0,8	0,7	-6,8	0,9	-2,0	1,8	-17,0
Verano	0,6	0,0	1,0	-11,2	1,4	0,0	2,4	-28,0
Otoño	0,5	-0,4	0,7	-6,0	1,2	-1,0	1,7	-15,0
Anual	0,5	-0,8	0,7	-4,8	1,2	-2,0	1,7	-12,0

En la Tabla 1, el Escenario “2011-2040 Mín.” representa la situación de mínimas variaciones para el periodo 2011-2040; el Escenario “2011-2040 Máx.” representa la situación de máximas variaciones para el periodo 2011-2040, representando lo mismo para el Escenario “2041-2070”. Los valores de T (temperatura) indican la variación de la temperatura media, por estaciones del año, respecto al clima Actual; los valores de P (precipitación) muestran la variación en porcentaje de la precipitación total acumulada respecto al clima Actual, por estaciones del año.

Los valores de la Tabla 2 han sido utilizados para generar las series climáticas de estudio en los diferentes escenarios, en función de los datos climáticos disponibles, que se indican en la Tabla 3.

Tabla 3: Datos climáticos utilizados en las diferentes cuencas hidrográficas.

Donde: INM: Instituto Nacional de Meteorología; T med: temperatura media; Precip.: precipitación.

Cuenca Hidrográfica	Estación climática	Serie climática
Júcar	Los Llanos (Albacete); INM	T med: 1961-1990 diarios Precip.: 1961-1990 diarios
Tajo	Lorenzana/Buenavista (Toledo); INM	T med: 1981-1990 mensuales Precip.: 1961-1981 mensuales
Guadiana	Alcázar de San Juan (Ciudad Real); INM	T med: 1981-1990 mensuales Precip.: 1961-1990 mensuales
Segura	Embalse del Talave (Albacete); INM	T med: 1981-1990 mensuales Precip.: 1961-1990 mensuales

Nota: Los datos climáticos utilizados han sido: temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación; Para el caso de la cuenca del Júcar se dispone de datos diarios, mientras que para las otras cuencas solamente se disponen de datos mensuales, con el problema añadido de que solo se dispone de datos de temperatura a partir de 1981, y en la cuenca del Tajo no se disponen de datos de precipitación a partir de 1981.

Según la Tabla 3, sólo la cuenca del Júcar cuenta con la serie completa de datos climáticos perteneciente al periodo de referencia. Para el resto de cuencas, la situación de referencia no está completa para el caso de la temperatura, ya que disponen de la tercera parte de los datos (1981-1990). Hay que tener en cuenta que sólo se ha utilizado la estación meteorológica por cuenca con la serie de datos más amplia disponible, lo que limita la extrapolación de los resultados para todo el territorio que ocupan. Sin embargo, puede asumirse que los resultados serán válidos para determinar posibles tendencias en cuanto al comportamiento de las variables climáticas y su efecto sobre los cultivos, al situarse en zonas representativas de la cuenca.

Para generar los datos de los escenarios de simulación se han modificado los datos climáticos de cada uno de los años del periodo de referencia de según los valores de la Tabla 2. Es decir, los datos de temperatura diarios (Júcar) o mensuales (resto de cuencas) se han incrementado con los valores de la Tabla 2 dependiendo de la estación del año a la que pertenezca. Del mismo modo se ha actuado con los valores de precipitación. De esta manera se han obtenido las cuatro series climáticas futuras de cada cuenca.

En los siguientes epígrafes, los resultados ofrecen un solo valor por escenario, habiendo elegido el año medio, al que se le ha asignado el incremento de temperatura global considerado para dicho periodo.

2. Posibles efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos en Castilla-La Mancha

Administrativamente, Castilla-La Mancha está implicada en 7 cuencas hidrográficas (Figura 2). Las correspondientes a los ríos Tago, Guadiana y Júcar abarcan la mayor parte del territorio, estando presentes en menor medida en las del Segura, Guadalquivir y Ebro, siendo prácticamente nula la superficie correspondiente a la cuenca del Duero.



Figura 2: Cuencas hidrográficas en Castilla-La Mancha.

La extensión total de cada una de las cuencas, la temperatura media anual, la precipitación media acumulada así como los recursos hídricos generados en el territorio de Castilla-La Mancha aparecen en la Tabla 4 (Tarjuelo et al., 2006). Puede asumirse que estos valores corresponden al escenario de referencia (Actual).

Tabla 4: Recursos hídricos en régimen natural en Castilla-La Mancha por cuencas hidrográficas.

Donde: S: superficie de la cuenca (km²); T_{med}: temperatura media anual ponderada de la cuenca (°C); P: precipitación media total en la cuenca (hm³/año); Sup.: volumen anual de escorrentías superficiales (hm³/año); Sub.: volumen anual de escorrentías subterráneas (hm³/año).

Fuentes: (1) Datos de las Confederaciones Hidrográficas. Los porcentajes corresponden a la superficie total de las cuencas; (2) de Castro (2008); (3) Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (1985); (4) El Plan Hidrológico Nacional (PHN) muestra una relación de los aportes netos de aguas superficiales para las cuencas del Tajo, Júcar, Segura y Guadalquivir. Los datos correspondientes a la cuenca del Guadiana se han obtenido de su Plan Hidrológico de Cuenca, mientras que los de la cuenca del Ebro proceden de Castillo et al. (2003); (5) Documentos: Tajo: Plan Hidrológico de cuenca del Tajo; Júcar: Júcar Pilot River Basin. Provisional Article 5 Report. Confederación Hidrográfica del Júcar, 2004; Segura: Plan Hidrológico de cuenca del Segura (AP-RN "Aportaciones en Régimen Natural" <http://www.mma.es/cuencas/segura/pdf/memoria.pdf>); Guadiana: Elaborado por la Confederación Hidrográfica del Guadiana de varios estudios (borrador del Plan Especial del Alto Guadiana 2004 y Plan Hidrológico de cuenca del Guadiana); Guadalquivir: Plan Hidrológico de cuenca del Guadalquivir; Ebro: Unidades Hidrogeológicas de la Cuenca del Ebro. Confederación Hidrográfica del Ebro. Oficina de Planificación Hidrológica, 1999; Duero: Plan Hidrológico Nacional. Delimitación y asignación de recursos en acuíferos compartidos, 2000.

Cuenca	S ⁽¹⁾ (km ²)	T _{med} ⁽²⁾ (°C)	P ⁽³⁾ (hm ³ /año)	Recursos hídricos totales (escorrentías superficiales y subterráneas) (hm ³ /año)		
				Sup. ⁽⁴⁾	Subt. ⁽⁵⁾	Total
Júcar	15.736	12,5	6.800	1.161	1.011	2.172
Tajo	26.699	13,0	15.800	3.204w	1.108	4.312
Guadiana	26.431	14,0	13.300	1.189	625	1.814
Segura	4.721	14,3	2.000	509	254	763
Guadalquivir	4.428	13,8	2.600	45	25	70
Ebro	1.063	12,0	500	50	68	118
Duero	48	12,0	SD	SD	9	>9
TOTAL	79.226	13,3	41.000	6.158	3.100	9.258

La escorrentía superficial y subterránea generada en una cuenca, es decir, la parte de la precipitación que discurre por la superficie del terreno o que se infiltra en el mismo recargando los acuíferos, depende fundamentalmente de factores climáticos, fisiográficos y humanos. En consecuencia, las variaciones de precipitación y temperatura ligadas al cambio climático, pueden afectar a la disponibilidad de recursos hídricos en la Región.

En España se han realizado varios estudios para determinar, bajo diferentes escenarios de cambios de temperatura y precipitación, las variaciones en la escorrentía total generada. La Tabla 5 resume los resultados obtenidos por los casos más relevantes.

Tabla 5: Variaciones en la escorrentía en España como consecuencia de posibles escenarios de cambio climático.

Referencia	Escenario			Variación de la escorrentía
	Año	T (°C)	P (%)	
MIMAM (2000)	2030	+1,0	0	Reducción media: España: 5%; Júcar: 9%; Tajo: 7%; Guadiana: 11%; Segura: 11%; Guadalquivir: 8%; Ebro: 5%; Duero: 6%.
MIMAM (2000)	2030	+1,0	-5	Reducción media: España: 14%; Júcar: 20%; Tajo: 17%; Guadiana: 24%; Segura: 22%; Guadalquivir: 20%; Ebro: 15%; Duero: 16%.
CEDEX (1998)	2040-49	(1)	0	Reducción media: 14% en España; Júcar: 15%; Tajo: 14%; Guadiana: 20%; Segura: 16%; Guadalquivir: 17%; Ebro: 14%; Duero: 17%.
Ayala-Carcedo (1996)	2060	+2,5	-8	Reducción media: 17% en España; Júcar: 22%; Tajo: 17%; Guadiana: 23%; Segura: 28%; Guadalquivir: 34%; Ebro: 16%; Duero: 22%.
Proyecto PRUDENCE	2071-00	(2)		Resultados muy dispares, incluso con aumento de las escorrentías en algunos casos. Para el escenario B2 se considera un aumento medio del 15% en España, mientras que para el A2, se considera una reducción media del 35%. En el sur peninsular las reducciones son mayores.

Nota: (1) Variaciones de temperatura mensual propuestas por el modelo PROMES (PRONóstico a MESoescala) (MOMAC, 1993); (2) El proyecto europeo PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects) (EVK2-CT2001-00132) ha generado diferentes resultados de recursos en régimen natural para la Península Ibérica. Estos resultados proceden de modelos regionales de clima anidados en un mismo modelo global. Los escenarios de emisiones A2 y B2 son dos de los propuestos en el informe del IPCC (2001). Los resultados medios para España son las conclusiones del análisis de once series temporales para el escenario A2 propuestas por ocho equipos de investigación participantes en este proyecto, y cuatro series temporales propuestas para el escenario B2.

Como puede observarse en los resultados, la cuantía de la variación de la escorrentía no está muy clara en estos momentos. Efectivamente, la elevada variabilidad estacional del régimen hidrológico de los ríos españoles, y de los de Castilla-La Mancha en particular, puede explicar estas diferencias. Un pequeño aumento de la precipitación en invierno puede compensar fuertes aumentos de temperatura o disminuciones en la precipitación en verano, pues las aportaciones en este periodo son en muchos casos despreciables frente al resto de estaciones (Garrote et al., 2008).

Los recursos hídricos en régimen natural de Castilla-La Mancha asociados a cada escenario que resultan de los trabajos anteriores, aparecen recogidos en la Tabla 6.

Tabla 6: Estimación de los recursos hídricos en régimen natural de Castilla-La Mancha para diferentes escenarios climáticos según varios autores.

Recursos hídricos totales (hm ³ /año)					
	Actual	MIMAM (2000)	CEDEX (1998)	Ayala-Carcedo (1996)	
Variación de T (°C)	-	+1	+1	Variable	+2,5
Variación de P (%)	-	0	-5	0	-8
Júcar	2.172	1.977	1.738	1.846	1.694
Tajo	4.312	4.010	3.579	3.708	3.579
Guadiana	1.814	1.614	1.379	1.451	1.397
Segura	763	679	595	641	549
Guadalquivir	70	64	56	58	46
Ebro	118	112	100	101	99
Duero	9	8	8	7	7
Total	9.258	8.465	7.454	7.814	7.372

En términos porcentuales, las cuencas del Guadiana y del Segura son las más afectadas en la reducción de los recursos en régimen natural. En términos absolutos, la cuenca del Tajo es la que pierde una mayor cantidad de recursos, seguida por las del Júcar y el Guadiana que son del mismo orden de magnitud.

La disparidad de resultados, que ha quedado patente dentro del Proyecto PRUDENCE, no permite cuantificar la variación de recursos en régimen natural de las cuencas de Castilla-La Mancha. Sin embargo, la mayoría de estudios coinciden en una reducción considerable de los recursos disponibles para unas variaciones climáticas relativamente bajas, poniendo de manifiesto la elevada sensibilidad de nuestra región al cambio climático.

3. Posibles efectos del cambio climático en las zonas agrícolas de las principales cuencas hidrográficas de Castilla-La Mancha

3.1 Cuenca del Júcar

La temperatura media anual en la cuenca del Júcar para el periodo de referencia es de 13,5 °C. Como consecuencia de los cambios en la temperatura media considerados en los escenarios de la Tabla 1, la temperatura media anual puede llegar a incrementarse hasta 1,9 °C (Figura 3a). Por estaciones del año, para el escenario de máximas variaciones el invierno rondaría 7 °C, la primavera 13,5 °C, el verano 25,5 °C y el otoño 16 °C (Figura 3b).

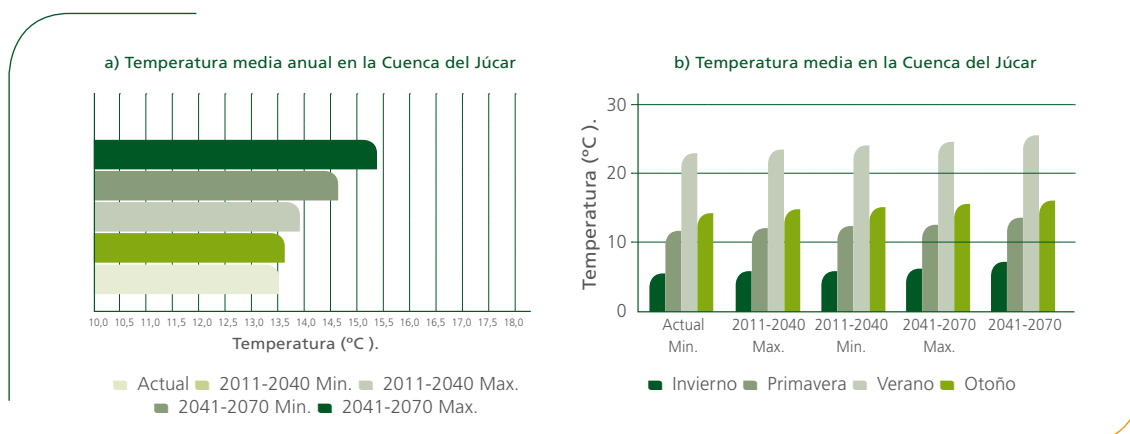


Figura 3: Posible evolución de la temperatura media en la cuenca del Júcar.

Como consecuencia del incremento generalizado de las temperaturas en las diferentes estaciones del año, el número de días en los que se producirán heladas se reducirá (Tabla 7). Este hecho tiene una especial relevancia en cuanto al inicio y final de la temporada de riesgo de heladas, que condiciona las fechas de siembra de muchos cultivos. En consecuencia, el rango de fechas favorables para la siembra se verá ampliado.

Tabla 7: Días de heladas en la cuenca del Júcar.

Días de heladas					
	Actual	2011-2040 Mín	2011-2040 Máx	2041-2070 Mín	2041-2070 Máx
Invierno	41	40	39	37	31
Primavera	11	11	9	9	5
Verano	0	0	0	0	0
Otoño	7	6	6	5	4
Total	59	58	54	51	40

Mientras que en el caso de la temperatura media ésta siempre es mayor respecto a la situación de referencia, no sucede lo mismo en el caso de la precipitación. Así, respecto a los 366 mm de media del escenario de referencia, los escenarios de mínimas variaciones presentan un ligero incremento, mientras que en el de máximas variaciones pueden llegar a reducirse hasta casi un 17%, dejando la precipitación media total en unos 304 mm (Figura 4a).

Por estaciones, las variaciones totales sobre la cantidad total de agua recibida son poco relevantes. Así, el invierno puede llegar a recibir de media hasta 7 mm más en la situación más favorable

o reducirse en la misma cantidad en la situación más desfavorable. La precipitación en primavera puede llegar a reducirse hasta en 21 mm, mientras que el verano y el otoño coinciden en unos 16 mm menos de media en la situación más desfavorable (Figura 4b).

En función de las cuantías anteriores, las consecuencias para los cultivos de esta cuenca parecen en principio poco relevantes aunque, en general, de sentido negativo. Sin embargo, estas reducciones pueden tener una mayor importancia en cuanto al volumen total de agua disponible para la agricultura de regadío.

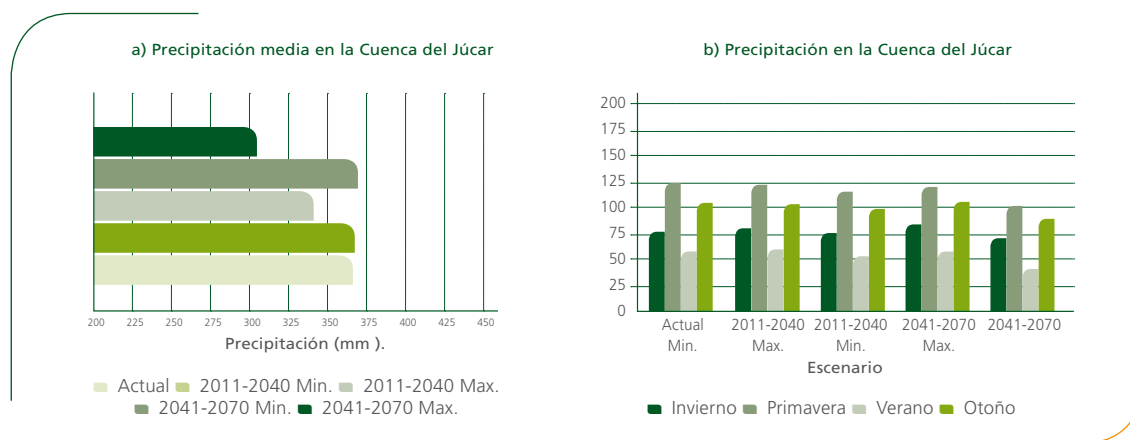


Figura 4: Evolución de la precipitación en la cuenca del Júcar.

Mediante la ecuación de Hargreaves (Hargreaves et al., 1985), se ha calculado la evapotranspiración de referencia (ET_o) para los diferentes escenarios. Los valores obtenidos con esta metodología han resultado semejantes a los obtenidos con la metodología de de Penman-Monteith-FAO (Allen et al., 1998) para las condiciones climáticas de Castilla-La Mancha (López-Urrea, 2004), con la ventaja de necesitar un menor número de datos climáticos.

La ET_o media anual en la situación de referencia es de 1.210 mm, pudiendo aumentar hasta los 1.281 mm en la situación de máximas variaciones 2041-2070 (Figura 5a). Por estaciones del año, los mayores incrementos porcentuales de ET_o se producen durante los meses de otoño, salvo para el escenario de máximas variaciones 2041-2070 que se producen en verano (6,2 %). En términos absolutos, en verano es cuando se producen los mayores incrementos (hasta 34 mm más) (Figura 5b).

En consecuencia las necesidades hídricas de los cultivos aumentan para todas las estaciones del año, afectando en mayor medida a los cultivos con mayores necesidades de agua durante los meses de verano.

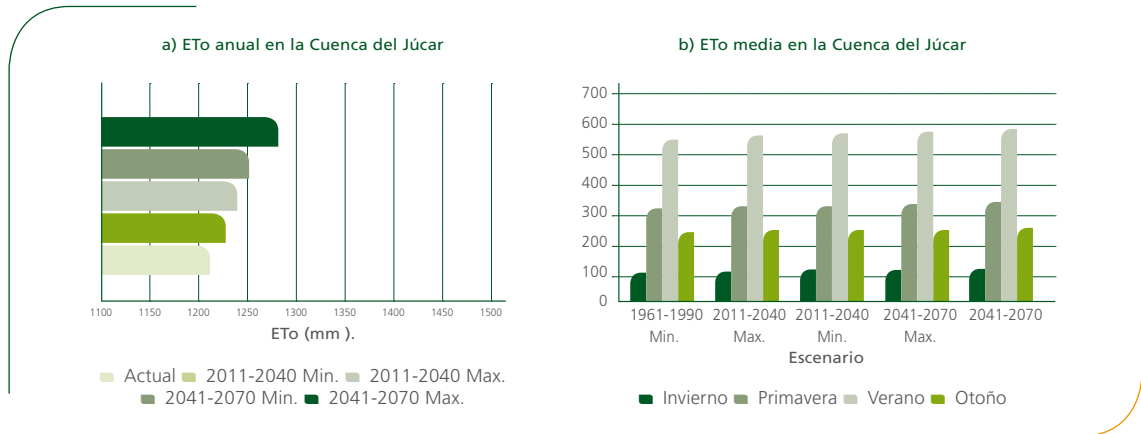


Figura 5: Evolución de la evapotranspiración de referencia en la cuenca del Júcar.

Las variables anteriores permiten construir un conjunto de indicadores que ofrecen una mayor información sobre las consecuencias de las variaciones climáticas en la zona para la agricultura. La Figura 6a muestra el diagrama ombrotérmico (Gaussen, 1955), que ofrece una idea clara y sintética de la interrelación entre la precipitación y la temperatura en la cuenca de Júcar, en el que se han agrupado los datos climáticos por estaciones. Así, se consideran periodos húmedos aquellos en los que la línea de precipitación se encuentra por encima de la temperatura, siendo secos el resto. El área comprendida entre ambas líneas ofrece una idea de cómo de húmedo o seco es el periodo. En este caso, los meses de verano son los únicos considerados como secos. Sin embargo, para el escenario más desfavorable el área comprendida entre ambas líneas en la zona húmeda se reduce considerablemente. Por otro lado, la Figura 6b muestra el Índice de aridez de De Martonne (1923) (I_M) que clasifica el tipo de clima de una zona en función de la relación entre la temperatura media anual y la precipitación total acumulada. Así, la zona actualmente es considerada como semiárida atravesando el umbral de árida para los escenarios de máximas variaciones.

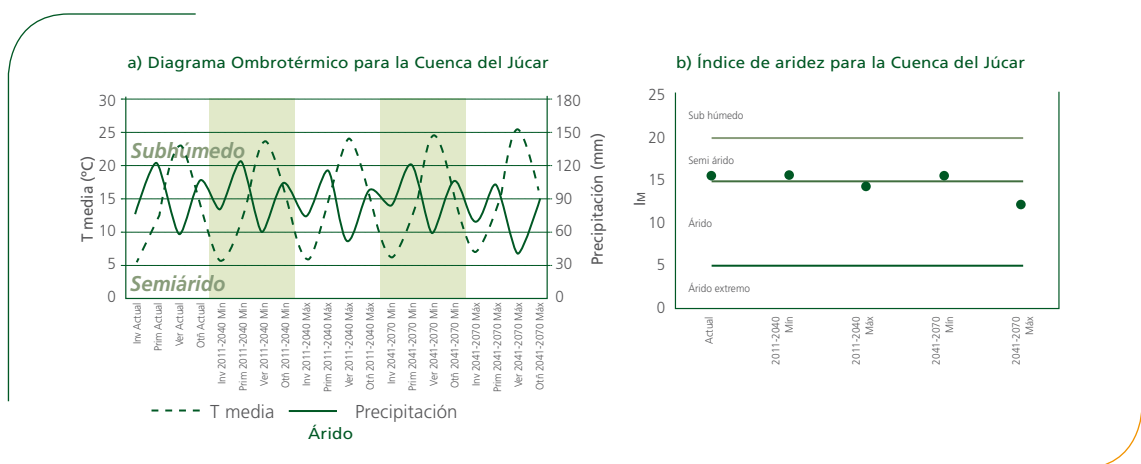


Figura 6: Diagrama ombrotérmico e índice de aridez para la cuenca del Júcar.

3.2 Cuenca del Tajo

Con el fin de no repetir los mismos comentarios que en el apartado anterior, ya que son similares para el resto de cuencas, sólo se resaltarán los aspectos más relevantes y/o diferentes.

La temperatura media en esta cuenca puede llegar a incrementarse hasta en 1,8 °C (Figura 7a). Por estaciones del año, para el escenario de máximas variaciones el invierno rondaría 8,6 °C, la primavera 15,3 °C, el verano 27,3 °C y el otoño 18,3 °C (Figura 7b).

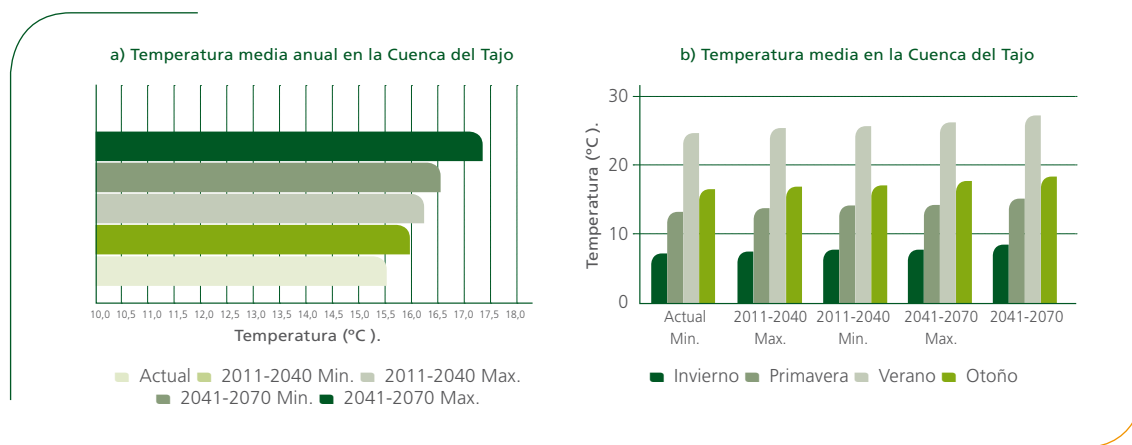


Figura 7: Evolución de la temperatura media en la cuenca del Tajo.

La precipitación media de la cuenca para el escenario de referencia es de 395 mm, los escenarios de mínimas variaciones presentan un ligero incremento, mientras que en el de máximas variaciones pueden llegar a reducirse hasta casi un 15,5%, dejando la precipitación media total en unos 334 mm (Figura 8a).

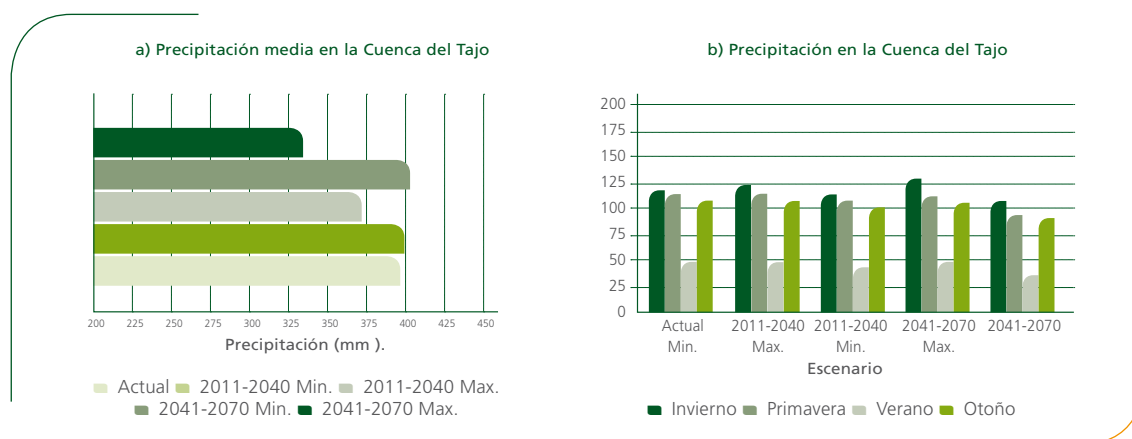


Figura 8: Evolución de la precipitación en la cuenca del Tajo.

Por estaciones, las variaciones totales sobre la cantidad de agua total recibida son poco relevantes. Así, el invierno puede llegar a recibir de media hasta 9 mm más en la situación más favorable o reducirse en la misma cantidad en la situación más desfavorable. De media, la precipitación en primavera puede llegar a reducirse hasta en 17 mm, en verano 28 mm y en otoño 15 mm para la situación más desfavorable (Figura 8b).

La ETo media anual en la situación de referencia es de 1.291 mm, pudiendo aumentar hasta los 1.361 mm en la situación más desfavorable (Figura 9a). Por estaciones del año, tanto en términos absolutos como en relativos los mayores incrementos de ETo se producen durante los meses de verano, pudiendo aumentar hasta en 33 mm (Figura 9b).

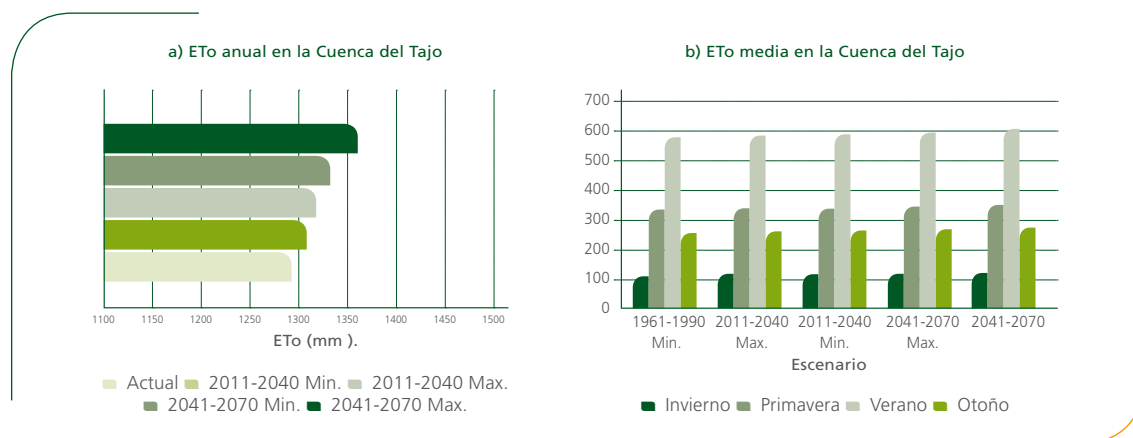


Figura 9: Evolución de la evapotranspiración de referencia en la cuenca del Tajo.

El periodo húmedo es bastante uniforme gracias a la aportación de la precipitación durante el invierno, la primavera y el otoño (Figura 10a). En cuanto al índice de aridez, la cuenca pasa a ser considerada como árida en los escenarios de máximas variaciones (Figura 10b).

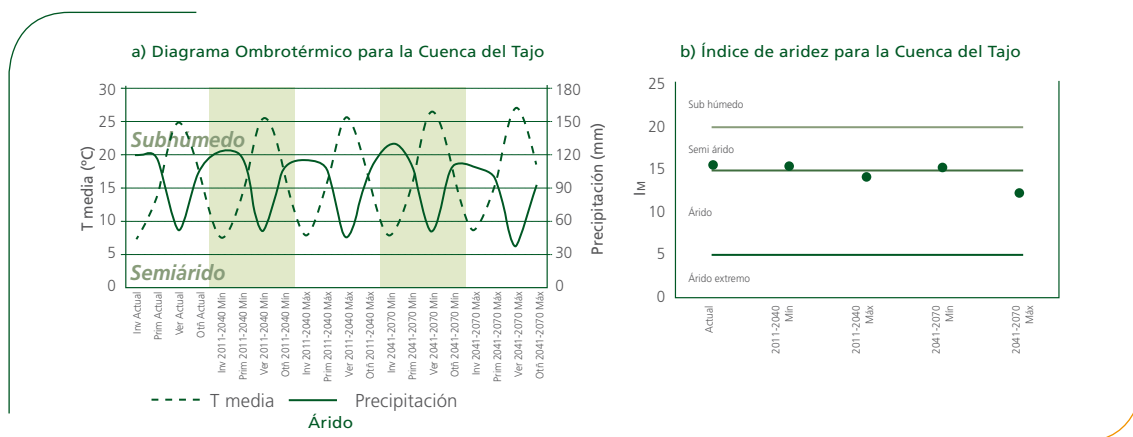


Figura 10: Diagrama ombrotérmico e índice de aridez para la cuenca del Tajo.

3.3 Cuenca del Guadiana

La temperatura media en esta cuenca puede llegar a incrementarse hasta en 1,8 °C (Figura 11a). Por estaciones del año, para el escenario de máximas variaciones el invierno rondaría una temperatura media de 7,8 °C, la primavera 14,7 °C, el verano 26,8 °C y el otoño 17,6 °C (Figura 11b).

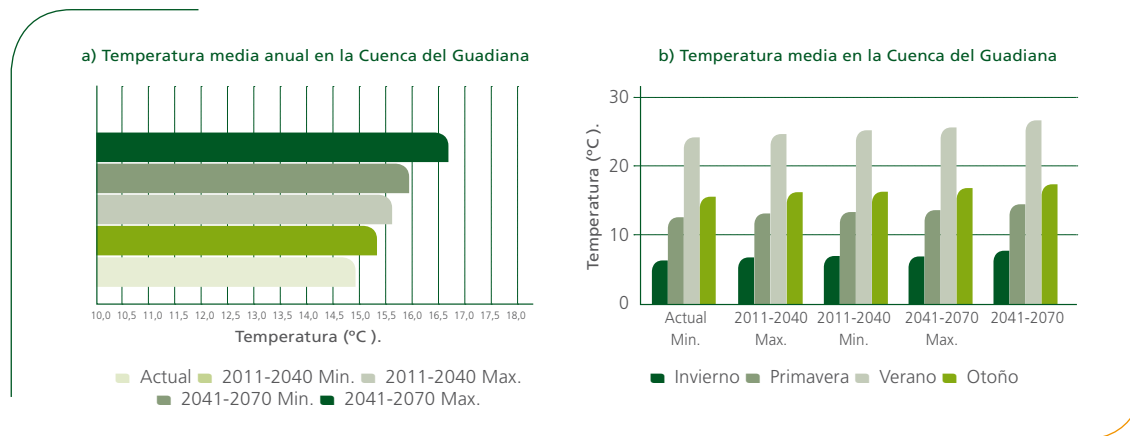


Figura 11: Evolución de la temperatura media en la cuenca del Guadiana.

La precipitación media de la cuenca para el escenario de referencia es de 390 mm, los escenarios de mínimas variaciones presentan un ligero incremento, mientras que en el de máximas variaciones pueden llegar a reducirse hasta un 15%, dejando la precipitación media total en unos 330 mm (Figura 12a).

Por estaciones, las variaciones totales sobre la cantidad de agua total recibida son poco relevantes. Así, el invierno puede llegar a recibir de media hasta 10 mm más en la situación más

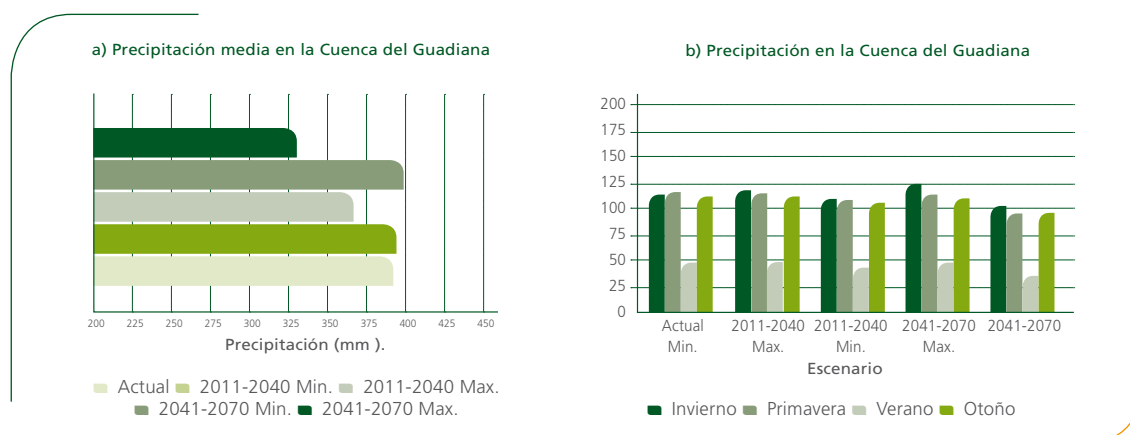


Figura 12: Evolución de la precipitación en la cuenca del Guadiana.

favorable o reducirse la misma cantidad en la más desfavorable. De media, la precipitación en primavera puede llegar a reducirse hasta en 20 mm, en verano 13 mm y en otoño 17 mm para la situación más desfavorable (Figura 12b).

La ETo media anual en la situación de referencia es de 1.267 mm, pudiendo aumentar hasta los 1.337 mm en la situación más desfavorable (Figura 13a). Por estaciones del año, tanto en términos absolutos como en relativos los mayores incrementos de ETo se producen durante los meses de verano, pudiendo aumentar hasta en 32 mm (Figura 13b).

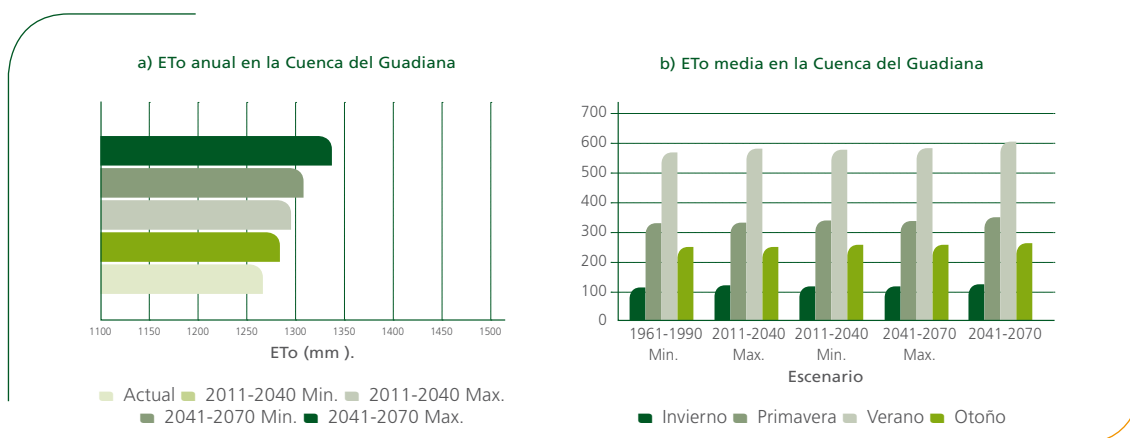


Figura 13: Evolución de la evapotranspiración de referencia en la cuenca del Guadiana.

El periodo húmedo es bastante uniforme no siendo acusada la reducción de superficie en el escenario más desfavorable (Figura 14a). En cuanto al índice de aridez, en los escenarios más restrictivos la cuenca pasa a ser considerada como árida (Figura 14b).

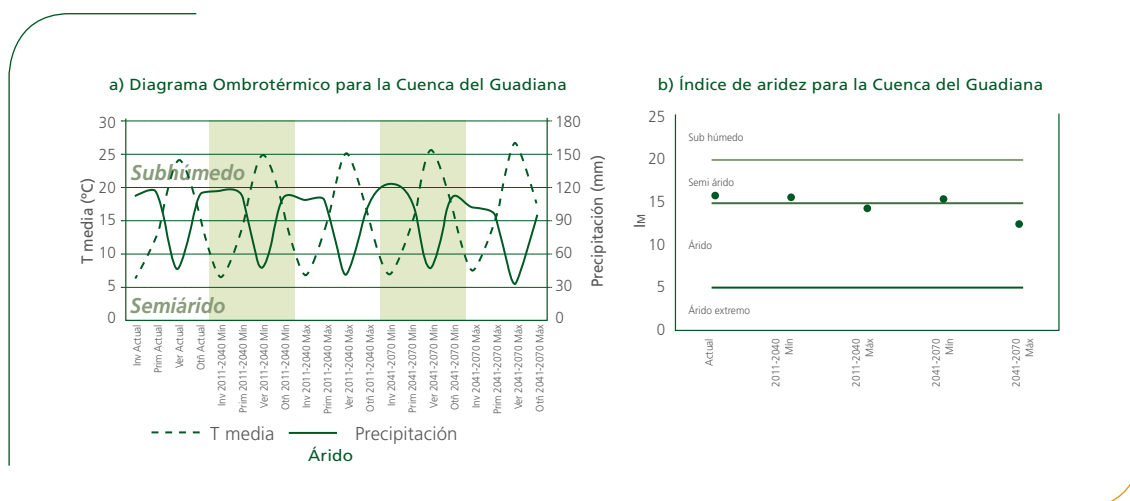


Figura 14: Diagrama ombrotérmico e índice de aridez para la cuenca del Guadiana.

3.4 Cuenca del Segura

La temperatura media en esta cuenca puede llegar a incrementarse hasta en 1,8 °C (Figura 15a). Por estaciones del año, para el escenario de máximas variaciones el invierno rondaría una temperatura media de 9,7 °C, la primavera 15,7 °C, el verano 26,3 °C y el otoño 18,6 °C (Figura 15b).

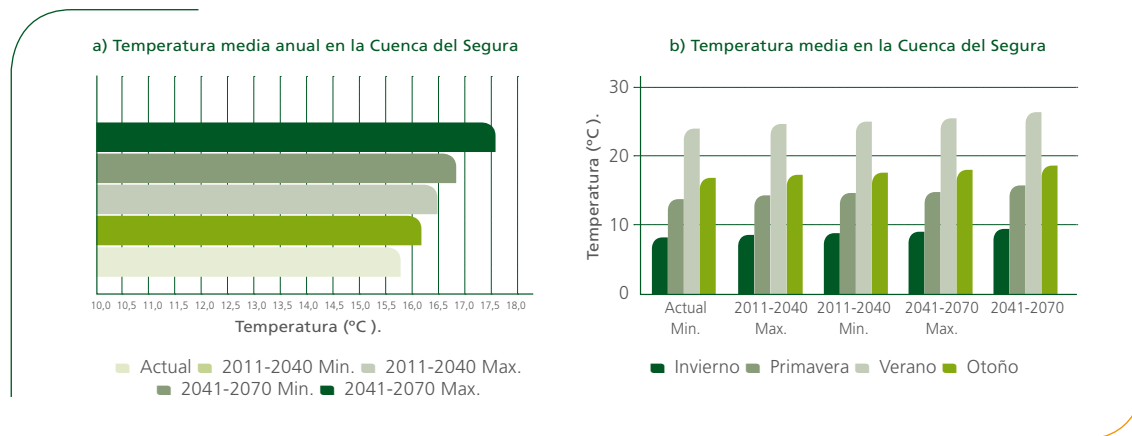


Figura 15: Evolución de la temperatura media en la cuenca del Segura.

La precipitación media de la cuenca para el escenario de referencia es de 338 mm, los escenarios de mínimas variaciones presentan un ligero incremento, mientras que en el de máximas variaciones pueden llegar a reducirse hasta casi un 17%, dejando la precipitación media total en unos 281 mm (Figura 16a).

Por estaciones, las variaciones totales sobre la cantidad de agua total recibida son poco relevantes. Así, el invierno puede llegar a recibir de media hasta 6 mm más en la situación más fa-

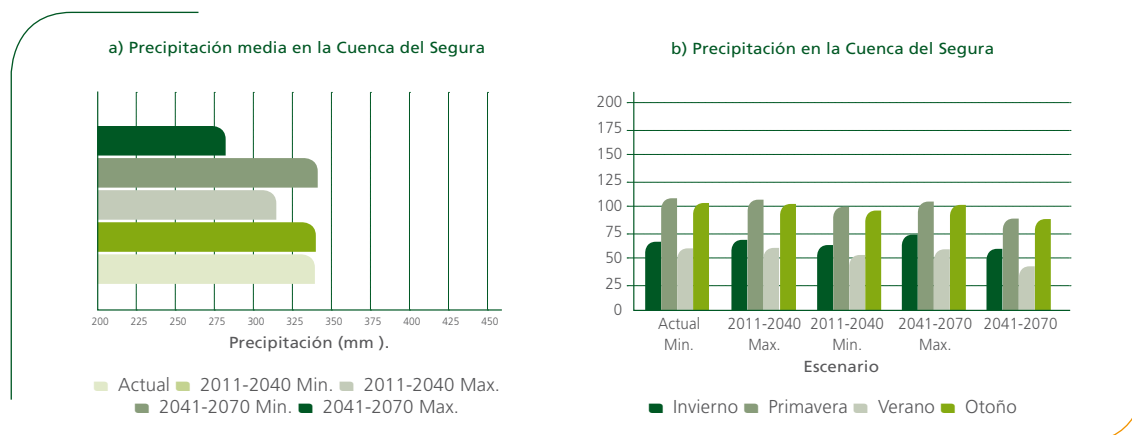


Figura 16: Evolución de la precipitación en la cuenca del Segura.

vorable o reducirse en la misma cantidad en la más desfavorable. De media, la precipitación en primavera puede llegar a reducirse hasta en 18 mm, en verano 17 mm y en otoño 16 mm para la situación más desfavorable (Figura 16b).

La ETo media anual en la situación de referencia es de 1.283 mm, pudiendo aumentar hasta los 1.353 mm en la situación más desfavorable (Figura 17a). Por estaciones del año, tanto en términos absolutos como en relativos los mayores incrementos de ETo se producen durante los meses de verano, pudiendo aumentar hasta en 32 mm (Figura 17b).

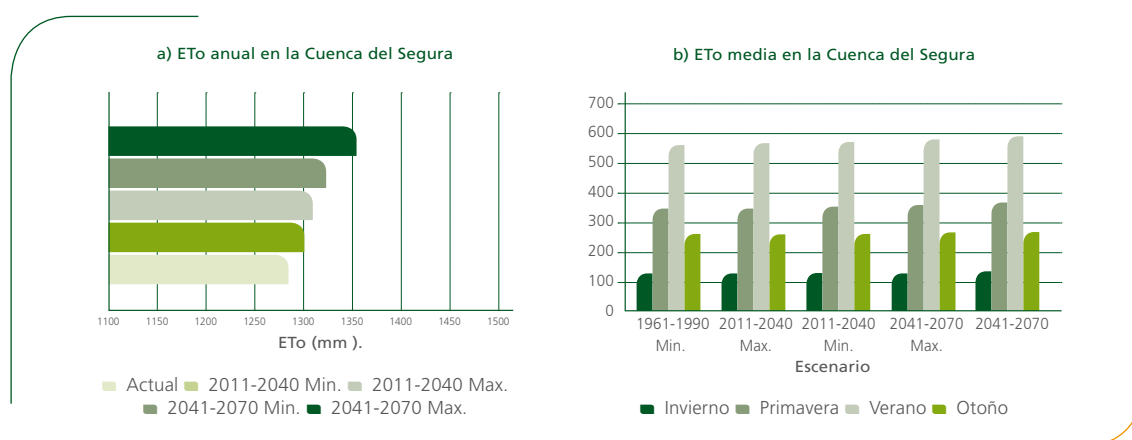


Figura 17: Evolución de la evapotranspiración de referencia en la cuenca del Segura.

En esta cuenca la estación más húmeda es la primavera. Dado el bajo nivel de precipitaciones durante el invierno y la primavera, el periodo húmedo se anula en el escenario más restrictivo (Figura 18a). En cuanto al índice de aridez, esta cuenca está clasificada como árida en todos los escenarios, agravándose la situación para los más desfavorables (Figura 18b).

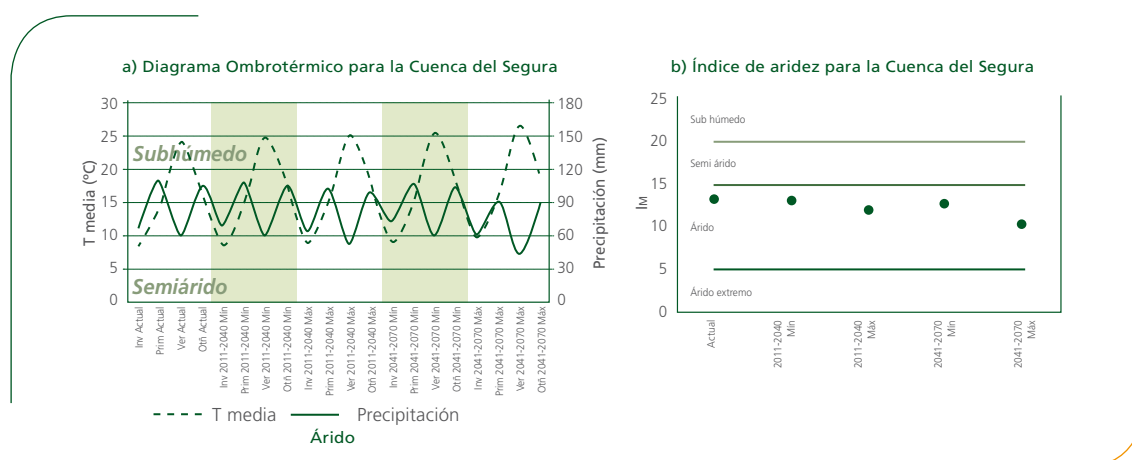


Figura 18: Diagrama ombrotérmico e índice de aridez para la cuenca del Segura.

4. Posibles efectos del cambio climático sobre los cultivos

Los efectos del cambio climático sobre los cultivos pueden ser de diferente signo. Para el caso de la precipitación, una disminución de la misma puede provocar una reducción de rendimiento y/o unas mayores necesidades de riego. Sin embargo, es posible que en los meses de invierno puedan aumentar las precipitaciones (Tabla 2), lo que favorecería a los cultivos que se desarrollan durante ese periodo. Para el caso de la temperatura, un incremento de la misma, además de aumentar la evapotranspiración y, en consecuencia, las necesidades hídricas de los cultivos, también puede ocasionar que los cultivos se desarrollen más rápidamente, reduciendo por tanto el periodo de riegos. Igualmente, este efecto puede modificar las fechas de siembra y cosecha, permitiendo su desarrollo en épocas más favorables. Así, adelantando las fechas de siembra por un menor riesgo de heladas, algunos cultivos puede alcanzar el momento de la cosecha antes de que lleguen los días más calurosos del verano.

Con el fin de estudiar más detalladamente la respuesta de los cultivos a estos efectos, se ha utilizado el modelo MOPECO "Modelo de Optimización Económica del Agua de Riego". Este modelo permite simular el rendimiento de los cultivos bajo diferentes condiciones de déficit hídrico y/o salinidad, teniendo en cuenta el efecto de la uniformidad del riego. Del mismo modo, este modelo permite determinar cual es la distribución de cultivos que maximiza el margen bruto de una explotación bajo ciertas restricciones de superficie y de agua para riego disponible (Ortega et al., 2004; Domínguez et al., 2007; López-Mata et al., 2008). La principal limitación de este modelo para la simulación de cultivos bajo los escenarios de cambio climático es que no tiene en cuenta las variaciones de concentración de CO₂ en la atmósfera.

Dado que las series climáticas más fiables son las correspondientes a la cuenca del Júcar, son éstas las que se han utilizado para la simulación. Los cultivos seleccionados aparecen recogidos en la Tabla 8, siendo representativos de la zona de estudio.

Tabla 8: Cultivos seleccionados para la simulación en la cuenca del Júcar.

Grupo	Regadío	Secano
Cereales	Maíz, Cebada de primavera	Cebada de invierno
Hortícolas	Ajo morado	
Leñosos	Vid "Cencibel"	Vid "Airén"

Se han realizado 30 simulaciones (una por cada año de la serie) por escenario y por cultivo, lo que hace un total de 900 simulaciones. Los resultados medios obtenidos aparecen recogidos en los siguientes apartados.

4.1 Los cultivos de regadío en la cuenca del Júcar

Las fechas entre las que se ha desarrollado cada cultivo son de especial relevancia a la hora de realizar este conjunto de simulaciones. Para ello, a partir de las fechas de referencia actuales para cada cultivo, se ha tratado de determinar las fechas más probables de desarrollo de las distintas etapas fenológicas mediante el cálculo de los grados-día acumulados (Sutton and Stucker, 1974). La Tabla 9 muestra a modo de resumen las fechas de nascencia (brotación para la vid) y maduración de los distintos cultivos de regadío.

Tabla 9: Duración de las etapas de desarrollo de los cultivos de regadío.

	Maíz	Cebada primavera	Ajo morado	Vid "Cencibel"
Actual Fecha Inicio Fecha Fin Duración (días)	10 de mayo 5 de octubre 145	10 de enero 3 de julio 174	5 de enero 1 de julio 174	15 de abril 15 de septiembre 153
2011-2040 Mín. Fecha Inicio Fecha Fin Duración (días)	7 de mayo 29 de septiembre 145	10 de enero 30 de junio 171	5 de enero 23 de junio 166	11 de abril 9 de septiembre 151
2011-2040 Máx. Fecha Inicio Fecha Fin Duración (días)	4 de mayo 23 de septiembre 142	10 de enero 28 de junio 169	5 de enero 16 de junio 159	8 de abril 4 de septiembre 149
2041-2070 Mín. Fecha Inicio Fecha Fin Duración (días)	1 de mayo 18 de septiembre 140	10 de enero 26 de junio 167	5 de enero 12 de junio 158	7 de abril 1 de septiembre 147
2041-2070 Máx. Fecha Inicio Fecha Fin Duración (días)	27 de abril 10 de septiembre 136	10 de enero 19 de junio 160	5 de enero 28 de mayo 146	31 de marzo 23 de agosto 145

En general, todos los cultivos reducen el tiempo de desarrollo, siendo especialmente relevante en el caso del ajo. El maíz y la cebada de primavera mantienen unas duraciones parecidas, aunque adelantando en ambos casos las etapas fenológicas. Finalmente, la brotación de la viña se producirá antes con el consiguiente adelanto de la vendimia.

Una vez determinadas las fechas de inicio y finalización de las distintas etapas de desarrollo de los cultivos ha sido posible realizar la simulación. Por cada año el modelo ofrece una nube de 100 puntos que relaciona la dosis de riego aplicada con el rendimiento obtenido. Los 3000 puntos por cultivo y por escenario han sido ajustados a una ecuación polinómica de 4º grado mediante el programa estadístico Statgraphics (Statistical Graphics Corporation, 2001). La ecuación resultante es la función de producción media para el cultivo en la zona de La Mancha Oriental para ese escenario (Figura 19).

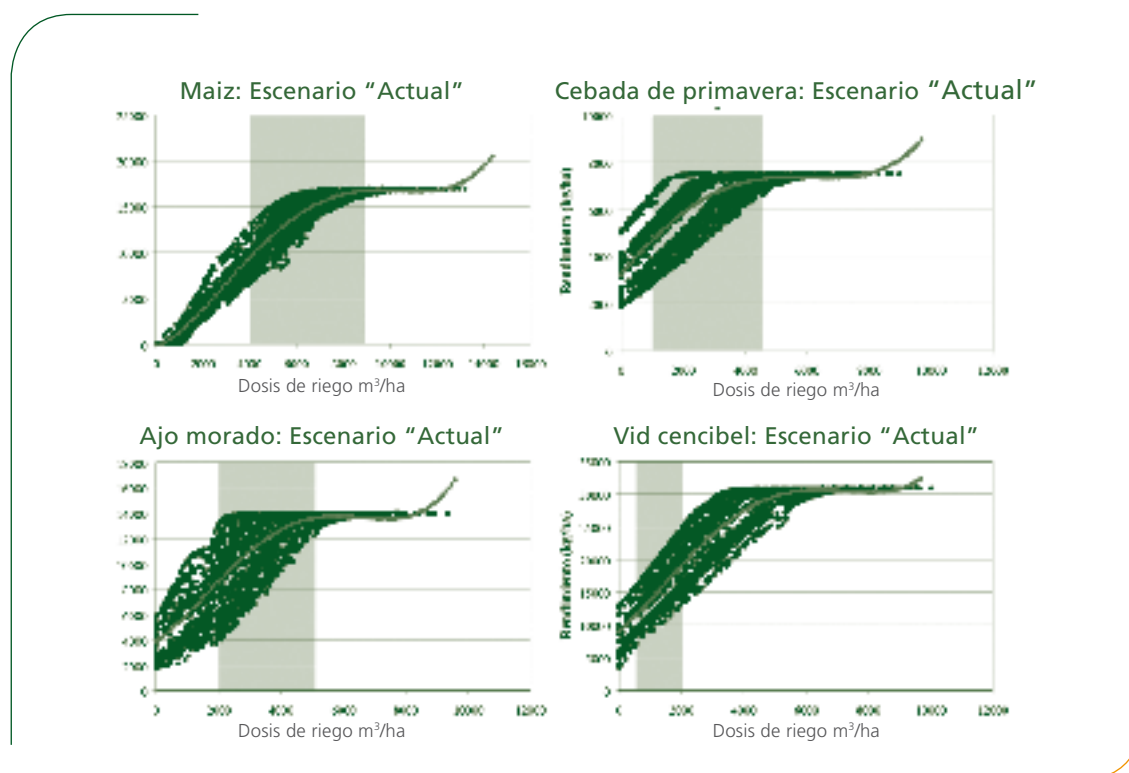


Figura 19: Ajuste de la nube de puntos para el Escenario "Actual".

De la Figura 19 se puede destacar la variabilidad en términos de rendimiento en función de la lámina de riego aplicada debido a las condiciones climáticas de cada año. Así, cultivos como el ajo y la cebada de primavera son más sensibles a las fluctuaciones climáticas. Esto es debido en parte, a que estos cultivos se desarrollan en épocas del año donde existe mayor variabilidad que en el caso del maíz.

A partir de las funciones de producción es posible conocer el rendimiento medio del cultivo para una dosis de riego determinada, así como la dosis de riego necesaria para conseguir un determinado rendimiento. Por supuesto, para el caso de los cultivos de regadío la función obtenida no

es coherente para cualquier dosis de riego, estando validada para el espacio sombreado de cada figura, que coincide con las dosis de riego más frecuentes que suelen aplicarse en la zona.

Como consecuencia de la situación, próxima a la sobreexplotación, del Acuífero 08.29 y de los episodios de sequía que repetidamente padece la zona, la JCRMO junto con la CHJ (Confederación Hidrográfica del Júcar) establecen la máxima dosis bruta de riego que puede ser aplicada a los cultivos. A este documento se le denomina Plan de Explotación (PE), el cual se publica cada año antes del inicio de la campaña de riegos y es de obligado cumplimiento por parte de todos los regantes de la zona. La Tabla 10 muestra el PE para la campaña 2007-2008 (JCRMO, 2007).

Tabla 10: Plan de Explotación para los cultivos seleccionados de la UHMO en la campaña 2007-2008.

¹ Con el fin de adaptar las simulaciones a la situación más parecida a la realidad se ha considerado aplicar a la vid una dosis de riego de 1.500 m³/ha.

Cultivo	Dotación (m ³ /ha)
Maíz 700	6.550
Cebada de primavera	2.700
Ajo morado	3.350
Vid	1.500 ¹

La Figura 20 muestra los rendimientos medios de los cultivos de regadío para las dosis de riego recogidas en la Tabla 6.

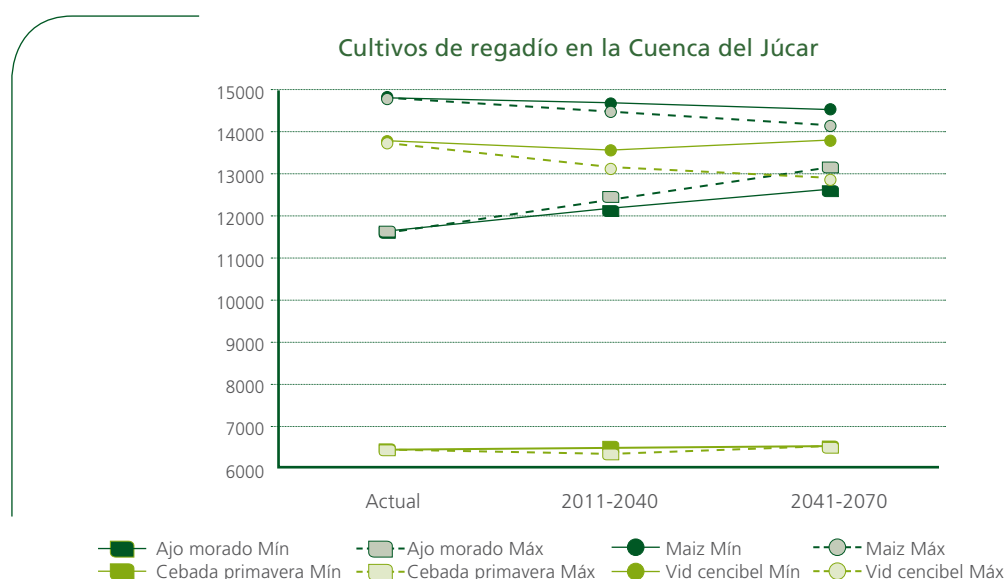


Figura 20: Rendimiento de los cultivos de regadío en la cuenca del Júcar manteniendo constante la dosis de riego.

La figura anterior pone de manifiesto que se producen dos tendencias diferentes en función de la época de desarrollo de los cultivos. Así, para los cultivos de primavera, como el ajo morado y la cebada de primavera, el rendimiento tiende a aumentar. Este efecto es mucho más notable en el caso del ajo, donde los incrementos de temperatura compensan ampliamente las escasas diferencias de precipitación por el adelanto que supone en el desarrollo del cultivo (Tabla 9).

En el caso de los cultivos de verano, como el maíz y la vid, la tendencia general es la reducción de rendimiento. Esto es debido a que el adelanto en el desarrollo del cultivo como consecuencia del aumento de la temperatura no compensa el incremento de la evapotranspiración y la reducción de precipitaciones. Sin embargo, para el caso de la vid los escenarios de mínimas variaciones pueden llegar incluso a producir un pequeño incremento del rendimiento. Efectivamente, el adelanto en el desarrollo del cultivo puede provocar que las máximas necesidades del cultivo (valor de Kc) comiencen a decrecer al principio del periodo en el que se produce la mayor demanda evaporativa de la atmósfera (entre el 15 de julio y el 15 de agosto), reduciendo de esta manera las necesidades hídricas totales del cultivo. Sin embargo, una pequeña reducción de las precipitaciones y/o un mayor aumento de la temperatura invertirán esta tendencia (Tabla 2).

Las variaciones porcentuales en el rendimiento de los cultivos son inferiores al 6% en todos los casos salvo para el ajo que pueden llegar al 13% (Tabla 11).

Tabla 11: Variaciones porcentuales en el rendimiento de los cultivos de regadío.

Cultivo	2011-2040 Mín	2041-2070 Mín	2011-2040 Máx	2041-2070 Máx
Maíz	-0,7	-1,9	-1,8	-4,3
Cebada de primavera	0,9	1,5	-0,5	0,9
Ajo morado	4,8	9,1	7,2	13,1
Vid "Cencibel"	-1,4	0,5	-4,2	-6,0

La Figura 21 muestra las dosis de riego necesarias para mantener los rendimientos conseguidos por los cultivos en la situación actual con las dotaciones de la Tabla 6.

Como era de esperar en función de los resultados de la Figura 4, los cultivos de primavera tienden a reducir sus necesidades de riego, mientras que los cultivos de verano tienden a aumentarlas.

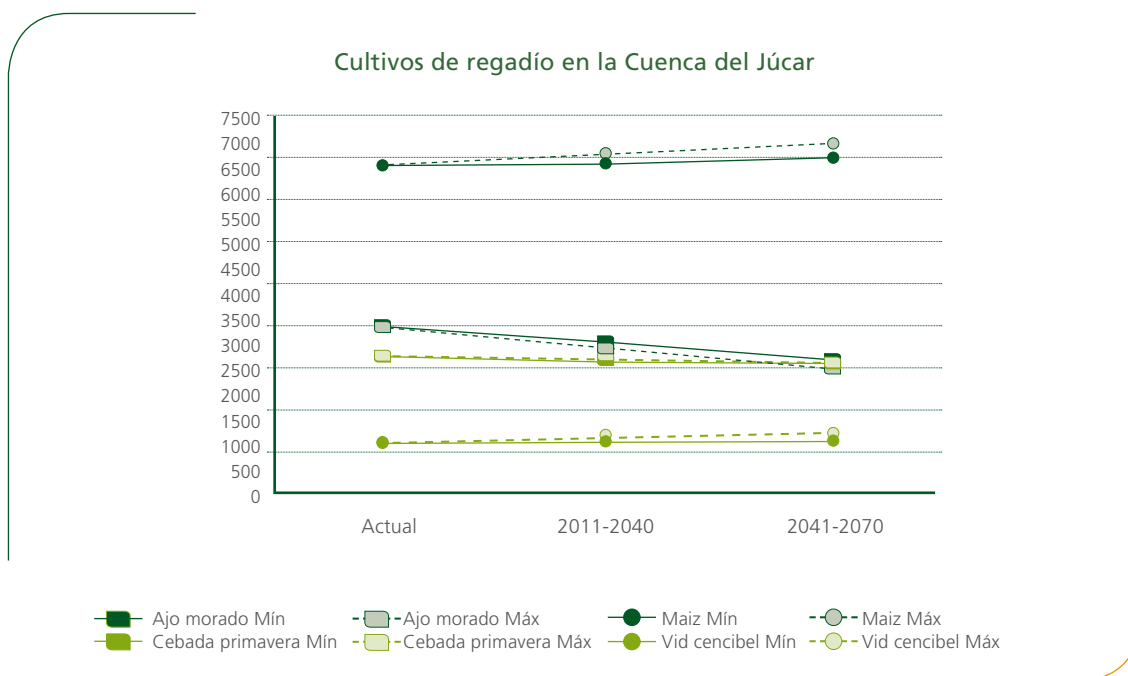


Figura 21: Dosis de riego de los cultivos de regadío en la cuenca del Júcar manteniendo constante el rendimiento.

Las mayores variaciones porcentuales en las dosis de riego corresponden al ajo y la vid, suponiendo un ahorro considerable en el primer caso. Sin embargo, el incremento en el caso de la vid no es demasiado relevante por el escaso impacto en la dosis total final. Por otro lado, aunque las variaciones en el caso del maíz no son altas, dadas las elevadas necesidades de riego de este cultivo, un aumento por encima del 6% implica un significativo incremento de las necesidades totales de riego (Tabla 12).

Tabla 12: Variaciones porcentuales en la dosis de riego de los cultivos de regadío.

Cultivo	2011-2040 Mín	2041-2070 Mín	2011-2040 Máx	2041-2070 Máx
Maíz	1,1	2,8	2,7	6,3
Cebada de primavera	-3,0	-4,8	1,5	-2,6
Ajo morado	-9,6	-20,1	-13,6	-25,4
Vid "Cencibel"	3,7	-1,3	11,3	16,3

4.2 Los cultivos de secano en la cuenca del Júcar

Al igual que con los cultivos de regadío se ha calculado la variación en las fechas de desarrollo de los cultivos de secano para la cuenca del Júcar (Tabla 13).

Tabla 13: Duración de las etapas de desarrollo de los cultivos de secano.

	Cebada invierno	Vid "Airén"
Actual Fecha Inicio Fecha Fin Duración (días)	20 de noviembre 12 de julio 234	15 de abril 15 de septiembre 153
2011-2040 Mín. Fecha Inicio Fecha Fin Duración (días)	11 de noviembre 6 de julio 237	11 de abril 9 de septiembre 151
2011-2040 Máx. Fecha Inicio Fecha Fin Duración (días)	11 de noviembre 4 de julio 235	8 de abril 4 de septiembre 149
2041-2070 Mín. Fecha Inicio Fecha Fin Duración (días)	11 de noviembre 28 de junio 229	7 de abril 1 de septiembre 147
2041-2070 Máx. Fecha Inicio Fecha Fin Duración (días)	11 de noviembre 23 de junio 224	31 de marzo 23 de agosto 145

En general, más que hablar de una reducción en el tiempo de desarrollo, en ambos cultivos se produce un adelanto en el inicio y finalización de actividad de los mismos. Es necesario indicar que se han considerado los mismos periodos de desarrollo de la vid tanto en secano como en regadío.

En este caso, al tratarse de cultivos de secano la dosis de riego aplicada es 0. En consecuencia, para cada simulación se ha obtenido un solo resultado. Los rendimientos que aparecen en la Figura 22 son la media de los 30 puntos obtenidos por cultivo y por cada escenario de la serie climática de 30 años considerada.

El efecto combinado de un incremento de las precipitaciones y de la temperatura en invierno, favorece al rendimiento de la cebada en el escenario de mínimas variaciones. Aún así, el descenso de las precipitaciones del escenario de máximas variaciones es contrarrestado por el efecto que sobre el desarrollo del cultivo tiene el incremento de las temperaturas.

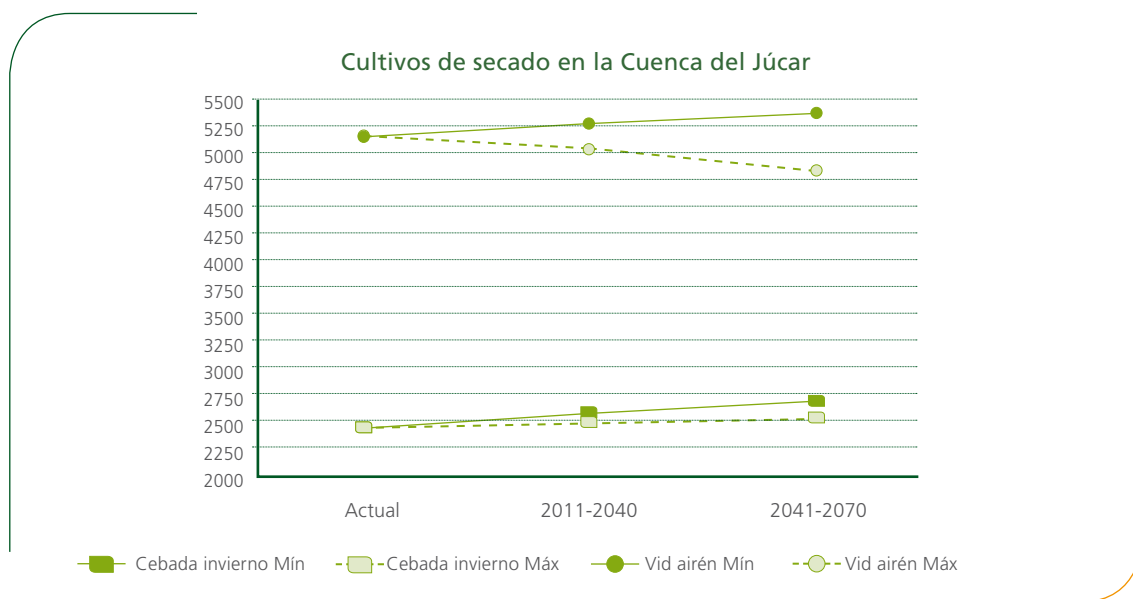


Figura 22: Rendimiento de los cultivos de secano en la cuenca del Júcar.

En el caso de la vid se observan dos tendencias contrapuestas, tal y como sucedía en el regadío. El escenario de mínimas variaciones es favorable a este cultivo por el poco impacto que la reducción de las precipitaciones en primavera tiene sobre el desarrollo del cultivo en comparación con el pequeño incremento de las temperaturas. Sin embargo, una mayor reducción de las precipitaciones en primavera y verano, acompañado de unos mayores incrementos de temperatura, como sucede en el escenario de máximas variaciones, reducen el rendimiento final del cultivo.

Las variaciones porcentuales en el rendimiento de los cultivos son inferiores al 10% (Tabla 14).

Tabla 14: Variaciones porcentuales en el rendimiento de los cultivos de secano.

Cultivo	2011-2040 Mín	2041-2070 Mín	2011-2040 Máx	2041-2070 Máx
Cebada de invierno	4,6	9,7	1,6	2,9
Vid "Airén"	2,3	4,1	-2,6	-6,2

5. Conclusiones

En todas las cuencas analizadas se produce un incremento de la temperatura media y, dependiendo de los escenarios, un ligero aumento o una disminución de las precipitaciones.

Como consecuencia de ambos factores se estima un posible descenso en la aportación de recursos hídricos en régimen natural en la Región. El rango de recursos disponibles es variable, pero en la mayoría de los casos se prevé una disminución de los mismos en Castilla-La Mancha. Por cuencas, la del Tajo será la que puede perder una mayor cantidad de recursos, mientras que porcentualmente las del Guadiana y Segura serán las más perjudicadas. Estas conclusiones ponen de manifiesto que en el futuro será necesaria una nueva redistribución de los recursos hídricos disponibles.

En líneas generales, las variaciones totales de precipitación no son demasiado elevadas. Sin embargo, la combinación de este efecto con el incremento de la temperatura reducirá el periodo húmedo de todas las cuencas, siendo de especial importancia en las cuencas del Segura y del Júcar. Asimismo, todas las cuencas, salvo la del Segura que ya se encuentra en esa situación, presentan un cierto riesgo de atravesar el umbral del denominado clima semiárido y pasar a ser clasificadas de clima árido, lo que implicaría unas mayores restricciones para la agricultura en términos de disponibilidad hídrica y temperatura.

El incremento de temperaturas aumentará las necesidades hídricas de los cultivos, especialmente en la época estival. Sin embargo, como efectos positivos reducirá el periodo de heladas y permitirá un desarrollo más rápido de los mismos.

La reducción de la precipitación en la mayoría de escenarios perjudicará especialmente a los cultivos que se desarrollen en primavera y verano, normalmente de regadío. Sin embargo, el posible aumento de las precipitaciones en invierno favorecerá a los cultivos de secano. De todos modos, las variaciones de precipitación en términos absolutos no son elevadas, por lo que el impacto sobre los cultivos será bajo aunque en la mayoría de los casos de signo negativo.

Analizando ambos factores de forma conjunta, será posible reajustar los periodos de siembra para que los cultivos se desarrollen durante las épocas más favorables en términos de temperatura y precipitación. Este hecho puede ayudar a paliar en parte las mayores tasas de evapotranspiración y el descenso de precipitaciones. Además, los incrementos de temperatura podrían permitir la introducción en la zona de cultivos sensibles a las heladas.

Los efectos del cambio climático a corto y medio plazo sobre los cultivos más representativos de Castilla-La Mancha se encuentran dentro de unos límites razonables, siempre que se cumplan

las previsiones de variación de temperaturas y precipitaciones consideradas en este estudio. Además, el incremento de CO₂ en la atmósfera puede suponer una ligera atenuación de estos efectos sobre el rendimiento.

Los cultivos herbáceos de regadío que se desarrollen durante el verano verán incrementadas sus necesidades de riego, mientras que los de primavera se mantendrán como en la actualidad o incluso pueden reducirlas.

Los cultivos herbáceos de secano mejorarán los rendimientos debido a unas temperaturas más favorables durante el invierno y a un nivel de precipitaciones adecuado para su desarrollo.

Los cultivos leñosos, tanto de secano como de regadío, son muy sensibles a las variaciones de temperatura y precipitación propuestas, ofreciendo resultados contrapuestos. De todos modos, las repercusiones sobre el rendimiento y las necesidades de riego respecto a la situación actual son de escasa importancia.

Teniendo en cuenta que la mayoría de los escenarios implican una reducción de las precipitaciones, con la consiguiente disminución de agua disponible para riego, se puede prever que la tendencia en los próximos años será la siguiente:

- Una reducción de la superficie de riego dedicada a cultivos herbáceos de verano, en especial de cereales. Los cultivos hortícolas no se verán tan afectados gracias al mayor margen bruto que generan.
- Un aumento de la superficie de riego dedicada a cultivos herbáceos de primavera, tanto de cereales como de hortícolas.
- En el secano, un incremento de la superficie dedicada a cereales de invierno por una mejora de los rendimientos.
- En el caso de la vid, existen otros condicionantes más influyentes sobre su futuro que los efectos del cambio climático como son las oscilaciones en los precios de mercado y la política agraria comunitaria. Las variaciones de temperatura y precipitación previstas no serán la causa de una modificación sustancial de la superficie que actualmente se dedica a este cultivo.

6. Agradecimientos

A todos los compañeros del CREA que han participado en la elaboración de este capítulo, en especial a Patricia Tapiador Polo y a María Teresa Gómez Cerdán.

Bibliografía

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., AND SMITH, M., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy.
- AYALA-CARCEDO, F.J., 1996. Reducción de los recursos hídricos en España por el posible Cambio Climático. *Tecnoambiente*, Madrid, España.
- CEDEX, 1998. Estudio sobre el impacto potencial del cambio climático en los recursos hídricos. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, España.
- CHRISTENSEN, J.H., CARTER, T.R., RUMMUKAINEN, M., AMANATIDIS, G., 2007. Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change*, 81, 1-6.
- DE CASTRO, M., 2008. Clima y Cambio Climático en Castilla-La Mancha. En: Informe sobre el Cambio Climático en Castilla-La Mancha. Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, España.
- DE MARTONNE, E., 1926. Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. *La Meteorologie*, 449-458.
- DOMÍNGUEZ, A., DE JUAN, J.A., ARTIGAO, A., TARJUELO, J.M., 2007. Vulnerability to desertification process in Eastern Mancha agrarian system (Spain). 10th Inter-Regional Conference on Water and Environment (ENVIROWAT 2007). Actas del Congreso. Nueva Delhi, India.
- FAO, 1997. La agricultura y los cambio climáticos: la función de la FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. [En línea] www.fao.org. Consulta: 11 de Noviembre de 2008.
- GARROTE, L., DE LAMA, B., MARTÍN, F., 2008. Previsiones para España según los últimos estudios de cambio climático. En: El cambio climático en España y sus consecuencias en el sector del agua. Ed. Universidad Rey Juan Carlos y Aqualia gestión integral del agua S.A., Madrid, España.
- GAUSSEN, H., 1955. Détermination des climats par la méthode des courbes ombrothermiques, *C. R. Acad. Sci.* 240 : 642-644.
- HARGREAVES, G.H., SAMANI, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.
- IPCC, 2001. CLIMATIC CHANGE 2001. Intergovernmental panel on climatic change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- JACOB, D., BÄRRING, L., CHRISTENSEN, O.B., CHRISTENSEN, J.H., CASTRO, M. DEQUE, M., GIORGI, F., HAGEMANN, S., HIRSCHI, M., JONES, R., KJELLSTRÖM, E., LENDERINK, G., ROCKEL, B., SANCHEZ, E., SCHÄR, C.H., SENEVIRATNE, S.I., SOMOT, S., VAN ULDEN A., VAN DEN HURK B., 2007. An intercomparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. *Climatic Change*, 81, 31- 52.

- JCRMO, 2007. Plan de explotación de la zona regable de la Mancha Oriental para la campaña 2007-2008. [En línea] www.jcrmo.org. Consulta: 10 de Junio de 2008. Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental, Albacete, España.
- LÓPEZ-MATA, E., DOMÍNGUEZ, A., TARJUELO, J.M., DE JUAN, J.A., ARTIGAO, A., 2008. Sistema de ayuda a la toma de decisiones via on-line aplicado a los servicios de asesoramiento de riego. XXIV Congreso Nacional de Riegos AERYD. Actas del Congreso. Asociación Española de Riegos y Drenajes. Huesca, España.
- LÓPEZ-URREA, R., 2004. Evapotranspiración de referencia: métodos de cálculo y de medición directa en una estación lisimétrica en ambientes semiáridos. Tesis Doctoral. Departamento de producción Vegetal y Tecnología Agraria, Universidad de castilla-La Mancha, Albacete, España.
- MIMAM, 2000. El Libro Blanco del Agua. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España.
- MOMAC, 1994. Modelo de pronóstico a mesoescala para su aplicación en investigaciones del clima y del cambio climático (PROMES). Modelización numérica para el medio ambiente, Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, España.
- MORENO, J.M., AGUILÓ, E., ALONSO, S., ÁLVAREZ COBELAS, M., ANADÓN, R., BALLESTER, F., BENITO, G., CATALÁN, J., DE CASTRO, M., CENDRERO, A., COROMINAS, J., DÍAZ, J., DÍAZ-FIERROS, F., DUARTE, C.M., ESTEBAN TALAYA, A., ESTRADA PEÑA, A., ESTRELA, T., FARIÑA, A.C., FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, F., GALANTE, E., GALLART, F., GARCÍA DE JALÓN, L.D., GIL, L., GRACIA, C., IGLESIAS, A., LAPIEZA, R., LOIDI, J., LÓPEZ PALOMEQUE, F., LÓPEZ-VÉLEZ, R., LÓPEZ ZAFRA, J.M., DE LUIS CALABUIG, E., MARTÍN-VIDE, J., MENEU, V., MÍNGUEZ TUDELA, M.I., MONTERO, G., MORENO, J., MORENO SAIZ, J.C., NÁJERA, A., PEÑUELAS, J., PISERRA, M.T., RAMOS, M.A., DE LA ROSA, D., RUIZ MANTECÓN, A., SÁNCHEZ-ARCILLA, A., SÁNCHEZ DE TEMBLEQUE, L.J., VALLADARES, F., VALLEJO, V.R., ZAZO, C., 2005. Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Ed. Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Castilla-La Mancha. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España.
- ORTEGA J.F., DE JUAN, J.A., MARTÍN-BENITO, J.M., LÓPEZ-MATA, E., 2004. MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management. *Irrigation Science*, 23, 2, 61-75.
- STATISTICAL GRAPHICS CORPORATION, 2001. STATGRAPHICS Plus Versión 5.1. Statistical graphics system. User's guide. Ed. STSC, Inc.
- SUTTON, L.M., STUCKER, R.E., 1974. Growing degree days to black layer compared to Minnesota relative maturity rating of corn hybrids. *Crop Sci.* 14:408-412.
- TARJUELO, J.M., ORTEGA, J.F., DOMÍNGUEZ, A., 2006. Recursos hídricos. Aspectos cuantitativos. En: *La gestión del agua en Castilla-La Mancha*. Ed. Consejo Económico y Social de Castilla-La Mancha, Toledo, España.