

USO DEL INDICADOR AGROCLIMÁTICO PSMD PARA LA REPRESENTACIÓN Y EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS NECESIDADES DE AGUA DE RIEGO EN ESPAÑA

Rodríguez Díaz, J.A.^{1,2}, Knox, J.W.² y Weatherhead, E. K.²

Resumen:

Con 3.3 Mha, España es el país europeo con mayor superficie de regadío, el cual es con diferencia el mayor consumidor de agua en el país. En los últimos años la superficie del mismo ha experimentado un considerable aumento, lo que ha ocasionado que la competencia por el agua sea la mayor que nunca ha existido.

No obstante, a medio plazo, el regadío en España se enfrenta al reto del cambio climático, el cual previsiblemente incrementará, aún más si cabe, las necesidades de agua de riego de los cultivos. En este trabajo se presenta una metodología de evaluación de los impactos del mismo en términos agroclimáticos mediante el uso del indicador "Potential Soil Moisture Deficit" (PSMD). El indicador PSMD es un balance acumulado de agua en el suelo que relaciona las dos variables que determinan las necesidades de agua de riego: precipitación y evapotranspiración.

En este trabajo el indicador PSMD se ha calculado para toda la superficie de España, importando los resultados dentro de un SIG. De esta forma se han obtenido mapas de impacto del cambio climático en términos agroclimáticos para todo el país.

El análisis de los mismos muestra incrementos de PSMD de más del 20 % para el horizonte temporal 2050 y aproximadamente del 50 % para 2080.

Palabras clave: Cambio climático, SIG, PSMD, España, agua de riego

INTRODUCCIÓN

Con 3.3 Mha, España es el país europeo con mayor superficie de regadío (del Campo, 2002). Durante generaciones, el riego ha permitido a los agricultores asegurar sus producciones y producir cultivos de mayor valor económico que serían prácticamente imposibles en condiciones de secano.

En la actualidad, la contribución del regadío al PIB de España asciende al 2 % y da empleo al 4 % de la mano de obra ocupada (Corominas, 2000). El regadío también es un claro generador de empleo: mientras que una hectárea de secano genera 0.037 UTA, una de secano genera 0.13 UTA de forma directa. Además, el regadío genera hasta 0.38 UTA en el resto de los sectores (Berbel y Gutierrez, 2004). Por estas razones, el regadío siempre ha estado ligado al aumento del nivel de

vida de los agricultores y ha sido un claro impulsor del desarrollo en zonas anteriormente deprimidas.

En la actualidad, el regadío es con gran diferencia el mayor consumidor de agua en España, usando el 77 % del agua consumida y seguido muy de lejos por otros sectores como el suministro urbano o la industria (15.5 % y 6.8 % respectivamente) (INE, 2001). En los últimos años el regadío ha aumentado considerablemente su superficie y esto ha motivado un aumento de la demanda que en muchas ocasiones se ha traducido en una reducción de las dotaciones de agua por unidad de superficie regada (Camacho, 2005). El crecimiento de la superficie puesta en riego y el aumento de la demanda de agua por parte de otros sectores como por ejemplo el recreativo (Rodríguez Díaz *et al.*, 2006) hacen que la competencia por el recurso sea la mayor que nunca ha existido en el país.

¹ IFAPA. Junta de Andalucía. CIFA "Alameda del Obispo". Avda. Menéndez Pidal sn. 14080 Córdoba. España.

² Institute of Water and Environment. Cranfield University. MK45 4DT. Bedfordshire. Reino Unido.

Artículo recibido el 23 de octubre de 2004, recibido en forma revisada el 26 de diciembre de 2005 y aceptado para su publicación el 17 de abril de 2006. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

No obstante, durante el presente siglo el regadío se enfrenta a un nuevo reto como es el caso del cambio climático. Debido a su situación geográfica, se prevé que España sea uno de los países más afectados por el mismo. Se espera un aumento de la temperatura de hasta 0.4 grados centígrados por década en invierno y 0.7 grados por década en verano para el escenario más desfavorable. Aunque las precipitaciones serán ligeramente menores a las existentes en la actualidad, el efecto más grave será el de una nueva distribución de las mismas con mayores precipitaciones en invierno y menores en verano. También será mayor el número de anomalías como días con temperaturas máximas extremas, sequías y avenidas.

Con motivo del cambio climático, los recursos hídricos sufrirán en España disminuciones importantes. Para el horizonte de 2030 se esperan disminuciones medias de aportaciones hídricas, en régimen natural, entre un 5 y un 14%, mientras que para el 2060 se prevé una reducción global de los recursos hídricos del 17% como media de la Península. Estas cifras pueden superar el 20 a 22% para los escenarios previstos para final de siglo. Junto la disminución de los recursos se prevé un aumento de la variabilidad interanual de los mismos. El impacto se manifestará más severamente en las cuencas del Guadiana, Canarias, Segura, Júcar, Guadalquivir, Sur y Baleares (Iglesias *et al.*, 2005).

Para el futuro, debido a las emisiones, se prevé un aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera, lo que puede ocasionar un aumento en la productividad de los cultivos. No obstante, el efecto positivo del incremento de CO₂ sobre las tasas fotosintéticas puede verse contrarrestado por altas temperaturas o menores precipitaciones. Por otro lado, las temperaturas más suaves en invierno permitirán mayores tasas de crecimiento de los cultivos, si la disponibilidad de agua es adecuada, y una mayor productividad en determinadas zonas. Mayores temperaturas aumentarán la demanda evapotranspirativa, incrementándose las necesidades de riego (Mínguez *et al.*, 2005).

El cambio climático supondrá para el regadío la necesidad de enfrentarse a un nuevo escenario, en el que la gran demanda ya existente se verá incrementada con motivo de las mayores tasas de evapotranspiración de los cultivos y a la que habrá que hacer frente con unos recursos más limitados.

Actualmente existen varios modelos de cam-

bio climático que tratan de predecir el clima del siglo XXI para diversos posibles escenarios de emisiones futuros. Dichos modelos ofrecen grandes series de datos climáticos para varias variables y varios horizontes temporales. No obstante, toda esta información carece de utilidad si no puede ser sintetizada de manera que se facilite su interpretación. Por este motivo, en este trabajo se propone una metodología basada en el indicador agroclimático Potencial Soil Moisture Deficit (PSMD) para evaluar el impacto del cambio climático en términos agronómicos, detectando las zonas más afectadas y las que alcanzarán mayores niveles de aridez. Mediante el uso del indicador PSMD se muestra cómo las nuevas condiciones climáticas afectarán a las necesidades de agua de los cultivos.

METODOLOGÍA

Modelo HadCM3 y escenarios SRES

En este trabajo se ha empleado el modelo de cambio climático HadCM3, el cual es un Modelo de Circulación General Acoplado Océano-Atmósfera (MCGA-OA) desarrollado en el *Hadley Centre for Climate Prediction and Research* (Reino Unido) (Gordon *et al.*, 2000). Los modelos MCGA-OA simulan los procesos físicos que suceden en la atmósfera, los océanos y la superficie terrestre, pudiendo simular dichos procesos para diferentes grados de emisiones. Muestran como resultado las variaciones que se prevén en relación a un clima de referencia para las distintas variables climáticas.

HadCM3 tiene una resolución de 2.5° x 3.75° (latitud x longitud) para la superficie terrestre, lo que implica un tamaño de píxel para España de 280 km x 320 km. En el modelo, la atmósfera se divide en 19 capas con una resolución espacial de 2.5° x 3.75°, mientras que los océanos en 20 capas y una resolución de 1.25° x 1.25°. Durante su calibración, el modelo se testó con series climáticas del pasado y demostró su utilidad para la detección de anomalías (Pope *et al.*, 2000). HadCM3 predice el clima mundial a primeros (2020), mediados (2050) y finales (2080) del siglo XXI.

La principal incertidumbre a la que se enfrentan este tipo de modelos es que no es posible conocer con precisión cómo evolucionará la sociedad durante el siglo XXI y, por tanto, no se conoce a ciencia cierta cómo evolucionarán los

niveles de emisiones durante. Por este motivo, los modelos MCGA-OA deben considerar distintos posibles escenarios futuros. El modelo HadCM3 usa los escenarios desarrollados por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) y conocidos como SRES (Special Report on Emission Scenarios) (Nakicenovic *et al.*, 2000). Los cuatro escenarios SRES y sus consecuencias ambientales para el año 2100 se resumen en la Tabla 1.

Los cuatro escenarios SRES combinan dos diferentes tendencias: la primera varía entre fuertes valores de crecimiento económico y fuertes valores de protección ambiental, la segunda entre aumentar la globalización o incrementar la regionalización (IPCC-TGCIA, 1999). No obstante, todas muestran las mismas tendencias, con importantes aumentos de la temperatura media global y aumentos del nivel del mar. Quizás por ser los escenarios más factibles (en términos de crecimiento de la población, desarrollo económico y tecnológico), A2 y B2 son los más usados en este tipo de estudios y los que se han empleado en este trabajo. Ambos se describen brevemente a continuación:

- **A2** describe un mundo heterogéneo en el que se conservan las identidades locales. Los planes de control de la natalidad tienen un efecto muy lento, lo que ocasiona un aumento continuo de la población. El desarrollo económico tiene una clara componente regional y está orientado al crecimiento. El cambio hacia tecnologías respetuosas con el medio ambiente es lento.
- **B2** describe un mundo en el que se buscan soluciones locales a los problemas económicos, sociales y ambientales. Se produce un aumento continuo de la población aunque con una tasa de crecimiento menor a la existente en el escenario A2. Prevé niveles medios de crecimiento y el cambio tecnológico será inferior al existente en los escenarios B1 y A1.

Pese a que el escenario se orienta a la protección ambiental y a la equidad social, se centra en soluciones regionales en lugar de globales.

Aplicación del modelo HadCM3 en España

Como se ha comentado anteriormente, el modelo HadCM3 predice cambios con respecto a un clima de referencia. En este caso las predicciones se han aplicado al clima de referencia mundial desarrollado por International Water Management Institute (IWMI). Tiene una resolución de 10' latitud/longitud y consiste en una media mensual entre los años 1961 y 1990 de toda la superficie terrestre (New *et al.*, 2002).

Para reducir la escala del modelo inicial HadCM3 a la escala del clima de referencia (10' x 10' ó 50 x 50 km) se ha empleado el método generalmente usado por la comunidad internacional relacionada con la evaluación de los impactos del cambio climático (Droogers, 2004). Mediante técnicas de kriging, se interpolan los porcentajes mensuales de variación de cada una de las variables climáticas (temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar) que el modelo predice a todos los píxeles del clima de referencia (Figura 1). Aplicando dichos porcentajes de variación al clima de referencia, se obtienen los valores futuros para cada uno de los píxeles, para los escenarios A2 y B2, horizontes temporales 2050 y 2080.

A partir de dicho conjunto de variables tanto presentes como futuras, se estima la evapotranspiración mediante el método FAO Penman-Monteith para cada uno de los píxeles. Se ha calculado para cada píxel del clima de referencia y de los escenarios futuros, usando datos de temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento (Hess y Knox, 2003).

Tabla 1. Resumen de los escenarios SRES y sus consecuencias ambientales (IPCC-TGCIA, 1999)

Estimaciones	Escenarios SRES en 2100				
	1990	A1	A2	B1	B2
Población (1000 millones)	5.2	7.1	15.1	7.2	10.4
Concentración CO ₂ (ppmv)	354	680	834	547	601
Cambio medio en temperatura (°C)	-	2.52	3.09	2.04	2.16
Rango (°C)	-	1.7-3.7	2.1-4.4	1.4-3	1.4-3.1
Aumento del nivel del mar (cm)	-	58	62	50	52
Rango (cm)	-	23-101	27-107	19-90	20-93

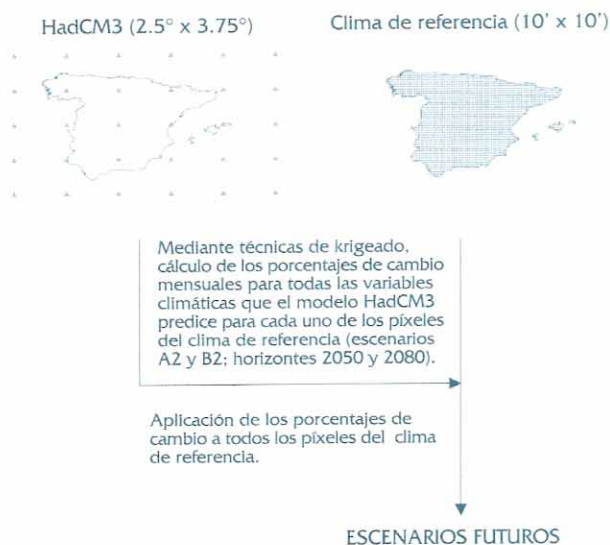


Figura 1. Metodología para la interpolación de los valores del modelo HadCM3 al clima de referencia

Usando esta metodología, se estiman los principales factores que determinan la demanda de agua de riego, precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ET_0), con una escala mensual.

Indicador PSMD

Mediante el proceso anterior, se generan series climáticas tanto para el clima presente como para los futuros. De esta forma tenemos valores mensuales de temperatura, precipitación, radiación solar, velocidad del viento y evapotranspiración. No obstante, esta gran cantidad de información carece de demasiado sentido por sí misma si no es posible interpretarla de una forma adecuada. Los indicadores de gestión son una importante herramienta que permite sintetizar grandes cantidades de información en únicamente un número, el cual es mucho más fácil de analizar e interpretar (Rodríguez Díaz *et al.*, 2005).

Para ilustrar las implicaciones del cambio climático y su relación con el aumento de las necesidades de agua de los cultivos en este trabajo se ha usado el indicador agroclimático PSMD (Potential Soil Moisture Deficit o Déficit Potencial de Agua en el Suelo). El indicador PSMD relaciona directamente las dos variables que determinan las necesidades de riego de los cultivos: precipitación y evapotranspiración.

PSMD es un balance acumulado de agua en el suelo y se calcula mediante la formula:

$$PSMD_i = PSMD_{i-1} + ET_i - P_i \quad (1)$$

Donde:

$PSMD_i$ = valor del indicador en el mes i , mm

$PSMD_{i-1}$ = valor del indicador en el mes $i-1$, mm

ET_i = Evapotranspiración potencial en el mes i , mm

P_i = precipitación en el mes i , mm

Cuando $P_i > PSMD_{i-1} + ET_i$ no existirá déficit de agua en el suelo y $PSMD_i$ será igual a cero. Se considera que el año comienza en enero y se asume que al inicio PSMD es cero. El máximo valor de los $PSMD_i$ mensuales será el valor absoluto de PSMD.

Como PSMD relaciona las dos principales variables que determinan las necesidades de agua de riego de los cultivos, se puede considerar un descriptor del clima en relación a las necesidades de agua. Diversos autores han demostrado que existe una relación directa entre los valores de PSMD y los de las demandas de agua de riego, de forma que cuanto mayor sea el valor de PSMD también serán mayores las demandas (Downing *et al.*, 2003; Knox *et al.*, 1997).

RESULTADOS

Impacto del cambio climático en la evapotranspiración y precipitaciones

Como se ha citado anteriormente, dos son las variables que determinan las necesidades de agua de riego. Estas son la evapotranspiración y la cantidad de agua de lluvia. Usando la metodología descrita en la Figura 1, los valores totales anuales de ambas variables fueron calculados tanto para el clima de referencia como para los escenarios futuros. Los resultados obtenidos fueron representados en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y se muestran en las Figuras 2 y 3.

Como muestran las Figuras 2 y 3, se espera un considerable incremento de la evapotranspiración de referencia y una considerable reducción de las precipitaciones. A modo de resumen, en la Tabla 2 se muestran los valores promedio de P y ET_0 de todos los píxeles en que se divide el país. En el caso de la ET_0 para mediados del siglo XXI se esperan incrementos de más del 8 % y para finales de siglo, los incrementos serán de más del 20 %. Para las precipitaciones, se prevé una pequeña disminución para mediados de siglo de aproximadamente el 5 % y una más acusada para finales, especialmente en el escenario A2.

Tabla 2. Valores promedio de P y ETo para todos los escenarios

	ETo (mm/año)			P (mm/año)		
	Media	Desv. típica	% Incr.	Media	Desv. típica	% Incr.
Referencia	1117	171	-	654	277	-
A2 2050	1216	200	8.9	619	284	-5.4
B2 2050	1211	197	8.4	620	263	-5.2
A2 2080	1357	210	21.5	497	240	-24.0
B2 2080	1345	231	20.4	607	279	-7.2

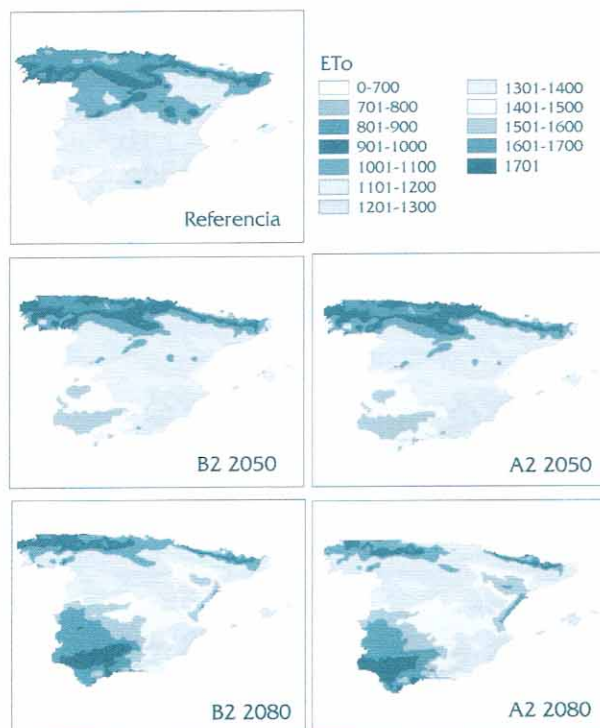


Figura 2. Impacto del cambio climático en la evapotranspiración de referencia anual (mm/año)

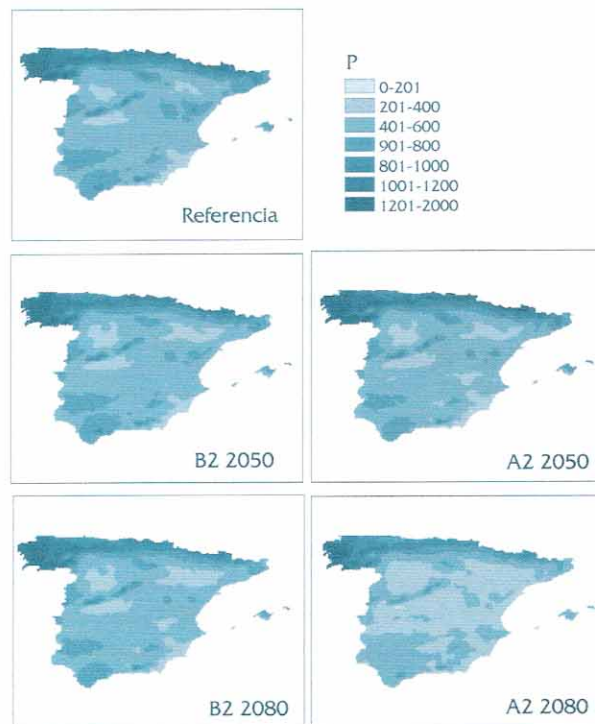
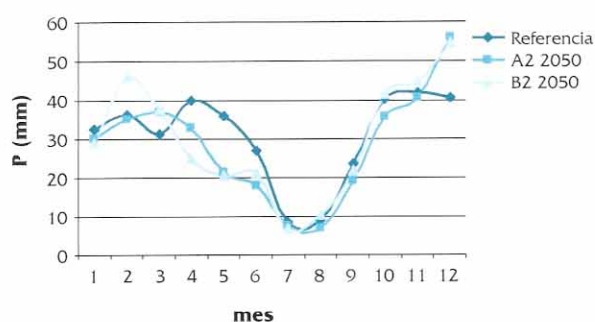


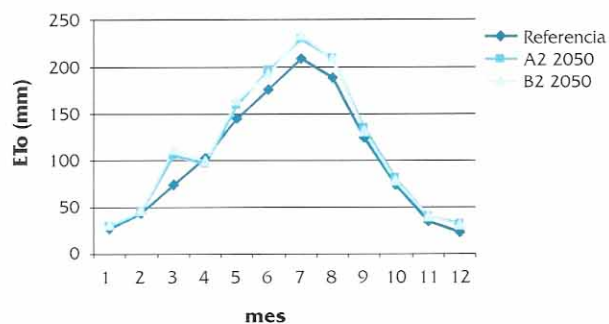
Figura 3. Impacto del cambio climático en las precipitaciones anuales (mm/año)

a) Precipitación



b) Precipitación

b) Evapotranspiración



b) Evapotranspiración

Figura 4. Evolución de las precipitaciones y la evapotranspiración en un punto intermedio de la cuenca del Guadalquivir (mm/mes)

En las Figuras 1 y 2 se ha mostrado la evolución de las variables P y ETo para valores totales anuales, comprobándose que el modelo prevé un considerable aumento de la evapotranspiración y una reducción de las precipitaciones. No obstante los cambios no serán uniformes a lo largo del año. En la Figura 4 se muestra la evolución de ambas variables tanto para el clima actual como para el que se prevé para mediados de siglo para un punto intermedio de la cuenca del Guadalquivir. En la misma se puede observar que en el caso de las precipitaciones más que una gran reducción se producirá una nueva distribución, con un notable descenso de las mismas en primavera y un aumento en invierno. Para la evapotranspiración, los mayores incrementos se producirán en los meses centrales. Por ambas razones, durante los meses centrales del año se prevé un considerable aumento de la aridez con mayores demandas evapotranspirativas y menores precipitaciones.

Mapas de PSMD

Usando la ecuación 1, los datos derivados del modelo de cambio climático y del clima de referencia desarrollado por IWMI fueron procesados para obtener un conjunto de valores máximos anuales de PSMD para toda la superficie del país con una resolución de 50 x 50 km. Posteriormente los valores de PSMD fueron importados dentro de un SIG. Los mapas obtenidos se muestran en la Figura 5. Los mapas de PSMD muestran las variaciones espaciales existentes en España en la actualidad en términos agroclimáticos. Los mapas de valores futuros de PSMD muestran cómo evolucionará el indicador en todo el país para los horizontes 2050 y 2080.

Como se observa en la Figura 5 existe una gran diferencia entre los escenarios presentes y futuros. En el clima de referencia los valores máximos del indicador son siempre menores a 1050 mm. Las zonas con mayores valores de PSMD (entre 900 y 1050 mm) se concentran en la cuenca del Guadalquivir, otras partes del suroeste y sudeste. Existe una clara diferencia entre la España seca (sur) y húmeda (norte). La mayor parte del norte del país posee valores de PSMD menores de 300 mm.

Las mismas zonas agroclimáticas existentes en el clima de referencia se mantienen en el año 2050 aunque con un importante aumento de la aridez en todas ellas sin excepción. Como ejemplo, la mayor parte de la cuenca del Guadalquivir

pasarán del rango 900 – 1050 al inmediatamente superior (1050 – 1300), condiciones mucho más áridas a las existentes en la actualidad. El noreste y diversas áreas del centro del país también adquirirán altos valores de PSMD. La España húmeda también experimentará un considerable aumento.

Para 2080 la península alcanzará valores extremos desconocidos en la actualidad. Zonas de la cuenca del Guadalquivir, suroeste, cuenca del Ebro y litoral Mediterráneo alcanzarán valores extremos (1300 – 1450) mucho más altos a los que se pueden registrar actualmente incluso en los años más áridos. La mayor parte de la mitad sur se encontrará en el intervalo 1050 – 1300, valores aún mayores a los de las zonas más áridas existentes en el clima de referencia. La España húmeda quedará reducida a una pequeña franja en el norte del país, con valores de PSMD muy superiores a los que posee en la actualidad.

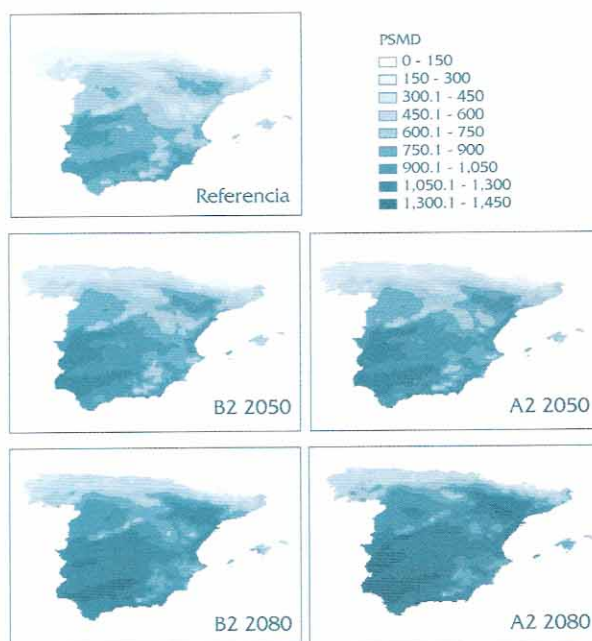


Figura 5. Mapas de PSMD actuales y futuros (mm)

Tabla 3. Incremento de los valores del indicador PSMD

	PSMD (mm)		
	Media	Desv. típica	% Incr.
Referencia	637	242	-
A2 2050	780	252	22.4
B2 2050	770	242	20.9
A2 2080	990	260	55.4
B2 2080	930	276	46.0

En la Tabla 3 se muestran los valores promedio del indicador PSMD para toda España, así como los incrementos del mismo para los horizontes temporales 2050 y 2080. Para mediados de siglo el incremento del indicador es de algo más del 20 %. Para finales, los incrementos llegarán a ser incluso de más del 55 % para el escenario más desfavorable.

Los incrementos del indicador PSMD serán muy superiores a los que experimentarán las variables P y ETo. Esto es debido a la nueva distribución de las precipitaciones, menores en primavera y verano, y el aumento de la ETo en ese mismo período. Todo esto implicará condiciones extremas en los meses centrales del año.

Uso del indicador PSMD para la estimación del aumento de las necesidades de agua de riego

En el apartado anterior se ha mostrado el indicador PSMD como una herramienta para representar el impacto del cambio climático en términos agroclimáticos, principalmente porque relaciona las principales variables que determinan la cantidad de agua de riego a aportar a los cultivos. Mediante el mismo han podido ser representadas las variaciones que experimentará el clima. En este apartado se muestra el potencial del indicador para cuantificar el aumento de las necesidades de agua de riego para un punto concreto del país.

Para ello se ha seleccionado una serie histórica de datos climáticos de Málaga (sur de España) y se ha calculado el indicador PSMD para cada uno de los años. Los valores de PSMD obtenidos oscilan entre los 700 mm en años húmedos hasta los cerca de 1100 mm que se registran en los años secos y cálidos. En la Figura 6 se muestra un gráfico con la evolución del indicador en la serie histórica. En dicha figura también se han añadido los valores del indicador que predice el modelo HadCM3 en ese mismo punto para los años 2050 y 2080, escenarios A2 y B2.

Como se puede observar en la Figura 6, las predicciones para los años 2050 y 2080 llevan el indicador PSMD a valores extremos. Para el año 2050, el indicador adquiere valores comparables a los años más secos que se han registrado en los últimos años (como es el caso de 1995 y 2005). Las predicciones en el escenario A2 son aún peores que las del escenario B2 e incluso superan los valores más altos de los últimos veinticinco años.

Pero si graves son las predicciones para 2050 (comparables a los peores años que hemos tenido recientemente), mucho más alarmantes son las mismas para el año 2080. Para dicho horizonte temporal el modelo prevé valores de PSMD mayores de 1300 mm, superiores en incluso más de 250 mm a los registros pasados extremos.

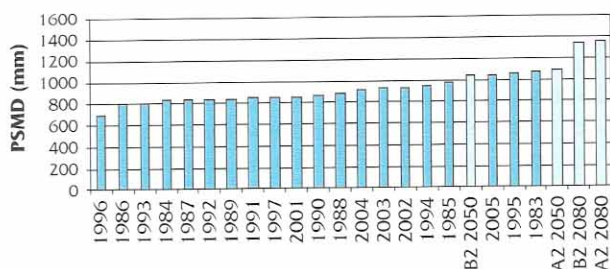


Figura 6. Serie histórica de valores de PSMD (en orden creciente)

La comparación de los valores que predice el modelo con los existentes en el pasado indica que se espera un importante aumento de la aridez. No obstante, aún no se ha mostrado cómo dicho indicador puede ser relacionado con el aumento de la demanda de agua de riego.

Como ejemplo, en este trabajo se calculó el incremento en las necesidades de agua de riego que conllevaría un aumento de PSMD. Para ello se ha analizado la relación entre las necesidades de agua de riego para un hipotético césped de referencia en Málaga y los valores de PSMD.

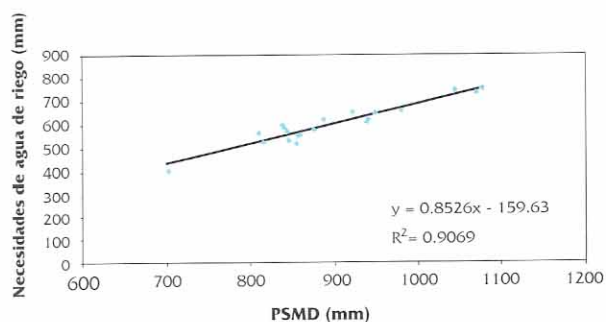


Figura 7. Relación entre PSMD y necesidades de riego

Las necesidades de agua de riego se calcularon mediante la aplicación informática CROPWAT (Clarke et al., 1998) para cada uno de los años de la serie histórica mostrada en la Figura 6. Posteriormente dichas necesidades fueron relacionadas con los valores de PSMD que se obtienen para cada uno de los años. En la Figura 7 se muestra la relación entre las necesidades teóricas de agua de riego y los valores máximos anuales de PSMD.

Como se puede observar, la correlación existente entre ambas variables es bastante elevada, con un coeficiente de determinación superior a 0.9. Esto confirma que el indicador puede ser usado para estimar el aumento de las necesidades de agua.

En la Tabla 4 se muestra el resultado de extrapolar la relación obtenida en la Figura 7 ($\text{Necesidades} = 0.8526 \text{ PSMD} - 159.63$) a los escenarios futuros. Como resultado se muestran las necesidades teóricas de agua de ese mismo césped para los nuevos valores de PSMD y se comparan con los existentes en un hipotético año medio obtenido como la media aritmética de los valores de PSMD de la serie histórica.

Tabla 4. Aumento de las necesidades de agua de riego para césped

Escenario	PSMD (mm)	Necesidades de agua (mm)	% Incr.
Año medio	896.5	604.8	
B2 2050	1042.3	729.0	20.5
A2 2050	1086.4	766.7	26.8
B2 2080	1339.5	982.4	62.5
A2 2080	1354.6	995.3	64.6

Para el año 2050 las necesidades de riego aumentarían, para esa zona y ese cultivo, entre el 20.5 % y el 26.8 % (escenarios B2 y A2) con respecto al año medio. Para 2080 las necesidades se incrementarían hasta valores superiores en más del 60 % a las necesidades actuales.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado que el indicador PSMD es una herramienta útil tanto para analizar las distintas regiones agroclimáticas como para representar los efectos del cambio climático. Mediante el uso del mismo ha sido posible combinar las variables climáticas que determinan las necesidades de agua de riego y analizar de una forma sencilla los posibles escenarios futuros, mediante su integración en un SIG.

Los espectaculares aumentos de los valores de PSMD que el modelo HadCM3 prevé para este siglo indican que las necesidades de agua de riego se incrementarán considerablemente. Debido al aumento de las necesidades de agua de riego y a la menor disponibilidad de recursos, la gestión eficiente de los recursos hídricos será más necesaria que nunca.

Al no ser posible conocer a ciencia cierta cómo evolucionará el mundo durante este siglo, este tipo de estudios deben asumir distintos hipotéticos escenarios (en este trabajo B2 y A2). Sin duda esto afecta a los resultados de los modelos debido a que los mismos pueden ser afectados por muchos factores que implicarían una variación con respecto a los escenarios inicialmente contemplados. No obstante, se ha podido comprobar cómo tanto en un escenario como en otro los impactos del cambio climático serán importantes, por lo que medidas que permitan afrontar el mismo y minimizar dentro de lo posible sus efectos deberán ser tomadas en consideración.

Son necesarios más trabajos de investigación especialmente para determinar con mayor certeza las posibles nuevas distribuciones de las variables climáticas durante el año. Es necesario un mejor conocimiento de las mismas para adecuar las rotaciones de cultivos actuales a las condiciones que existirán en el futuro.

AGRADECIMIENTOS

A Tim Hess (Cranfield University) por su ayuda en el cálculo de la evapotranspiración potencial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berbel, J. y C. Gutiérrez. 2004. *I Estudio de Sostenibilidad del regadío del Guadalquivir*. FERAGUA. España.
- Camacho, E. 2005. *Análisis de la eficiencia y el ahorro del agua en el regadío de la cuenca del Guadalquivir*. Inversiones en la modernización de regadíos. FERA-GUA. España.
- Clarke, D.; M. Smith and K. El-Askari. 1998. *CropWat for Windows: User Guide*. FAO.
- Corominas, J. 2000. *Más allá de la modernización de regadíos. Conferencia Inaugural del XVII Congreso Nacional de Riegos*. Huelva. España.
- Del Campo, A. 2002. *El futuro de los regadíos españoles en el contexto de la directiva europea del agua*. Seminario internacional "El agua de riego a debate". Córdoba. España.
- Downing, T.; Butterfield, B.; Edmonds, D.; Knox, J.W.; Moss, S.; Piper, B. y E.K. Weatherhead. 2003. *CC-DeW: Climate change and demand for water revisited. Final Research Report to DEFRA*. Stockholm Environment Institute Oxford Office. Reino Unido.
- Droogers, P. 2004. *Adaptation to climate change to enhance food security and preserve environmental quality*.

- example for southern Sri Lanka*. Agricultural Water Management. 66: 15-33
- Gordon, C.; Cooper, C.; Senior, C.A.; Banks, H.; Gregory, J.M.; Johns, T.C.; J.F.B. Mitchell y R.A. Wood. 2000. *The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments*. Climate Dynamics 16: 147-168.
- Hess, T.M. y J.W. Knox. 2003. *Deriving evapotranspiration datasets for the UK for use in the climate change modelling*. Internal Report. Cranfield University, Silsoe. Reino Unido.
- Iglesias, A.; Estrela, T. y F. Gallart. 2005. *Impactos sobre los recursos hídricos. Evaluación preliminar de los impactos en España por Efecto del Cambio Climático*. Director/Coordinador J.M. Moreno. Ministerio de Medio Ambiente. España.
- INE (Instituto Nacional de Estadística). 2001. Estadística del agua 1999. España.
- IPCC-TGCI. 1999. *Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation assessment. Version 1*. Prepared by Carter, T.R.; Hulme, M. and M. Lal. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, 69pp.
- Knox, J.W.; Weatherhead, E.K. y R.I. Bradley. 1997. *Mapping the total volumetric irrigation water requirements in England and Wales*. Agricultural Water Management 33(1): 1-18.
- Mínguez, I.; Ruiz, A. y A. Estrada. 2005. *Impactos sobre el sector agrario. Evaluación preliminar de los impactos en España por Efecto del Cambio Climático*. Director/Coordinador J.M. Moreno. Ministerio de Medio Ambiente. España.
- Nakicenovic, N.; Alcamo, J.; Davis, G.; de Vries B.; Fenhann, J.; Gaffin, S.; Gregory, K.; Grübler, A.; Jung, T.Y.; Kram, T.; La Rovere, E.L.; Michaelis, L.; Mori, S.; Morita, T.; Pepper, W.; Pitcher, H.; Price, L.; Raihi, K.; Roehrl, A.; Rogner, H.; Sankovski, A.; Schlesinger, M.; Shukla, P.; Smith, S.; Swart, R.; van Rooijen, S.; N. Victor and Z. Dadi. 2000. *IPCC Special Report on Emissions Scenarios* Cambridge University Press 599 pgs.
- New, M.; Lister, D.; M. Hulme and I. Makin. 2002. *A high resolution data set of surface climate over global land areas*. Climate Research. 21: 1-25
- Pope, V. D.; Gallani, M. L.; P. R. Rowntree and R. A. Stratton. 2000. *The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model -- HadAM3*. Climate Dynamics, 16: 123-146.
- Rodríguez Díaz, J. A.; Camacho Poyato, E.; López Luque, R.; Pérez Urrestarazu, L. 2005. *Los indicadores de gestión y las técnicas de benchmarking aplicados a la mejora de las Comunidades de Regantes*. Ingeniería del Agua, 12(1): 63-76
- Rodríguez Díaz, J. A.; Knox, J. W. y E. K. Weatherhead. 2006. *Demanda de agua de riego para campos de golf*. XXIV Congreso Nacional de Riegos. Lugo. España.