

ESTIMACION DEL POSIBLE EFECTO DEL CAMBIO CLIMATICO EN EL BALANCE HIDRICO DEL MAIZ CULTIVADO EN UNA LLANURA MEDITERRANEA

A. Utset¹ y A. Martínez-Cob²

1. Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León, Apdo. 172, 47080 Valladolid. utssuaan@jcyl.es.

2. Dpto. Genética y Producción Vegetal (EEAD), Lab. Asociado Agronomía y Medio Ambiente (DGA-CSIC), Apdo. 202, 50080 Zaragoza

RESUMEN. Se estima el efecto del cambio climático en los componentes del balance hídrico de maíz bajo riego, cultivado en Zaragoza, durante el período 2001-2010. Las estimaciones se realizaron a través de la combinación de un generador de tiempo y un modelo agrohidrológico. Se consideraron series climáticas históricas, el manejo de riego tradicional y las propiedades hidráulicas del suelo del lugar, así como las previsiones del aumento de la temperatura y disminución de las precipitaciones para el Noreste de España. El generador de tiempo LARS-WG y el modelo agrohidrológico de base física SWAP fueron utilizados en el estudio. Las simulaciones señalan que el riego tradicional será suficiente para enfrentar el aumento de las necesidades hídricas del maíz en el período 2001-2010 y que la variabilidad de la transpiración no estará muy influida por la variabilidad de las lluvias, debido a la disponibilidad de riego. De acuerdo a las simulaciones, las lluvias intensas podrían ocasionar pérdidas de agua por drenaje y una ligera reducción en la transpiración y por ende en los rendimientos, lo cual constituiría el principal impacto del climático en la producción de maíz en las condiciones para las que las simulaciones fueron realizadas. Se pone de relieve la utilidad de las técnicas empleadas para la toma de decisiones en cultivos bajo riego, teniendo en cuenta los futuros cambios climáticos.

ABSTRACT. The climate change effects on the water balance components of irrigated maize, as cropped in Zaragoza from 2001 to 2010 are estimated. The estimations were made through the combination of a weather generator and an agrohydrological model. Historical climate series, the traditional irrigation management and the soil hydraulic properties of the site were considered, as well as the temperature increments and precipitation reductions, as estimated for Northeast Spain. The LARS-WG weather generator and the agrohydrological physically based model SWAP were used in the assessment. According to the simulations, the traditional irrigation management will be enough for keeping satisfied the maize water-requirements in the 2001-2010 period. Maize transpiration variability would not be strongly influenced by rainfall variability, due to the available irrigation. According to simulation results, intense rainfall could give raise to drainage water-loose, as

well as to a small reduction in crop transpiration and yields. This yield reduction, however small, could be the most relevant climate-change impact on maize production in the zone, just for the conditions considered in simulations. The relevance of the applied techniques for irrigation decision-making under global change conditions is remarked.

1. Introducción

El período entre siembra y cosecha del maíz coincide con las menores disponibilidades de agua en las llanuras semiáridas españolas, por lo que el riego es una imperiosa necesidad para obtener rendimientos de aceptables. Un manejo de agua adecuado debe garantizar que la evapotranspiración real del cultivo se aproxime lo más posible a la evapotranspiración máxima, determinada por la demanda evaporativa de la atmósfera. El regante debe conocer los componentes del balance hídrico (entradas/salidas de agua en la zona de raíces activas) y suministrar el riego que asegure la satisfacción de las necesidades hídricas del cultivo. Sin embargo, los cambios climáticos que muy probablemente se avecinan para el futuro inmediato pueden alterar la utilidad del manejo del agua actual en ese cultivo.

Según numerosos estudios, el crecimiento continuo de la concentración atmosférica de los gases de efecto invernadero durante los últimos 150 años, debido a la acción del hombre, producirá en el futuro inmediato un aumento paulatino de la temperatura del planeta, así como cambios climáticos en todas las regiones (IPCC, 2000). Particularmente, para las llanuras mediterráneas europeas se prevé menos disponibilidad de agua y un incremento de las necesidades hídricas de las plantas (Olesen y Bindin, 2002).

Según los datos publicados por el Ministerio de Agricultura, aunque España posee sólo el 18% del área agrícola de la Unión Europea, el sector bajo riego constituye el 30% del total de la Unión. Los tomadores de decisión españoles deberán posiblemente determinar si el riego es rentable o no, cambiar el uso de la tierra, fechas de

siembra, técnicas de riego y tomar cualquier otra medida que garantice la eficiencia de los sistemas de riego, teniendo en cuenta los posibles cambios climáticos que se prevén para España y otros países del Mediterráneo.

Para la estimación de las condiciones climáticas futuras, actualmente se dispone de los Modelos Generales de Circulación Atmosférica (MGCA), los cuales ofrecen estimados mensuales de la temperatura y las precipitaciones futuras en cuadrículas de alrededor de 3° de lado y para todo el planeta, teniendo en cuenta distintos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (IPCC, 2000).

Estos estimados podrían utilizarse para la toma de decisiones en la agricultura, uno de los sectores más afectados por el cambio climático. Ese ha sido el propósito de un esfuerzo internacional, liderado por Naciones Unidas, (Sivakumar, 2000) en el proyecto CLIMAG (*Climate Prediction and Agriculture*), combinando estos pronósticos con modelos de simulación del crecimiento de los cultivos, los cuales permiten estimar el uso del agua y el rendimiento de los cultivos ante estas nuevas condiciones climáticas.

No obstante, las predicciones de los MGCA son para un área demasiado grande. En particular, Guereña et al. (2001) demostraron que las predicciones del MGCA no son útiles para la toma de decisiones agrícolas en la Península Ibérica, donde se observan cambios notables del relieve a pocos kilómetros de distancia.

Es por eso que se requieren técnicas para cambiar la escala de estas predicciones. Entre estas técnicas se encuentran los llamados generadores de tiempo (Wilby y Wigley, 2001); los cuales ofrecen valores diarios de las variables meteorológicas, estadísticamente equivalentes a las series históricas del lugar, pero alteradas de acuerdo a los pronósticos del cambio climático predicho por el MGCA (Semenov and Jamieson, 2001). El empleo conjunto de generadores de tiempo y modelos de cultivo es una de las vías recomendadas en CLIMAG.

El objetivo del presente trabajo es estimar el impacto climático en los componentes del balance hídrico de maíz bajo riego en una llanura mediterránea, a través del uso combinado de un generador de tiempo y un modelo de simulación del crecimiento del maíz, destacando las ventajas y desventajas de las técnicas empleadas y particularmente la utilidad de las mismas para la toma de decisiones en riego agrícola.

2. Material y Métodos

El estudio se realizó en Zaragoza, Comunidad Autónoma de Aragón (41° 43' N, 0° 48' O; 225 m de altitud). El clima de la zona es Mediterráneo semiárido, con medias anuales de las temperaturas diarias máxima y mínima de 21° y 8° respectivamente, precipitación media anual de 353 mm, humedad relativa promedio del aire del 74% y velocidad promedio del viento de 2.4 m.s⁻¹ (Faci et al., 1994). Se dispuso de series diarias de precipitación, temperaturas máximas y mínimas y de radiación solar de 1985 al 2000 para el sitio. Las propiedades hidráulicas del suelo (curva pF y conductividad hidráulica) se estimaron a partir de

funciones de pedotransferencia (Rawls et al. 1982; 1998), teniendo en cuenta la textura, densidad y contenidos de materia orgánica de un perfil del suelo de la región, considerado como representativo (Cavero et al., 2000).

Se emplearon los pronósticos del MGCA perteneciente al Centro Canadiense para la Modelación y Análisis Climático (CCCMA) para la cuadrícula correspondiente al Noreste de España (la Península Ibérica queda cubierta por cuatro cuadrículas, aproximadamente). Para los pronósticos del CCCMA se consideró el escenario de emisión de gases de efecto invernadero IS92a, conocido como “negocios como siempre” (*Business as usual*), que implica un aumento en la concentración del CO₂ atmosférico del 1% anual durante el siglo XXI.

La Fig. 1 muestra el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones medias anuales normalizadas en el período 2000-2100 para la región estudiada, según los cálculos del CCCMA. También puede notarse la notable variabilidad pronosticada, en particular para las precipitaciones, lo cual es otra de las consecuencias del cambio climático (IPCC, 2000).

Por otra parte, en la Tabla 1 se ofrecen las regresiones entre las temperaturas medias y las precipitaciones anuales y el año en cuestión. De acuerdo a las pendientes obtenidas, la temperatura aumenta anualmente aproximadamente 0,04° y las precipitaciones decrecen 0,65 mm por año; ambas regresiones anuales son significativas. En la Tabla 1 se muestran también las regresiones entre temperatura media y precipitaciones mensuales, para el período 2001-2100.

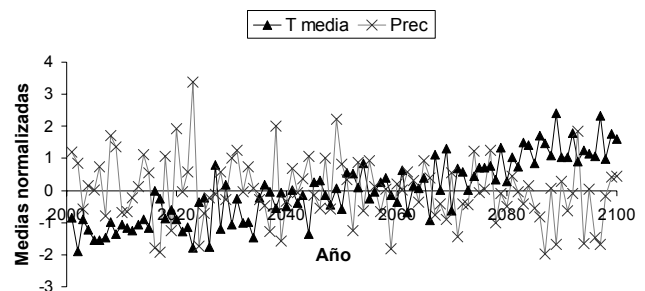


Fig. 1. Temperaturas y precipitaciones anuales medias normalizadas pronosticadas por el CCCMA para el Noreste de España.

Mientras el aumento de la temperatura será significativo en todos los meses, la reducción de la precipitación sólo será destacada en los meses de Mayo y Julio, aunque esta reducción a la larga provocará una reducción significativa de las lluvias anuales, según los resultados del CCCMA. Por lo tanto, el aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones serán más acusados en meses del período de crecimiento del maíz, cuando la demanda hídrica del cultivo crece.

El generador de tiempo LARS-WG (Semenov y Barrow, 2002) fue utilizado para obtener 30 series anuales de datos diarios de precipitación, temperaturas máximas y mínimas y radiación solar para cada año entre 2001 y 2010; teniendo en cuenta el aumento de la temperatura y la disminución de

las precipitaciones estimadas por el CCCMA y una serie histórica de precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas y radiación solar, medida en Zaragoza entre los años 1982-1999. De esta manera, se contó para cada año del período 2001-2010 con 30 “realizaciones” estadísticamente equivalentes al comportamiento climático de cada año del período, de acuerdo a las estimaciones del cambio climático.

Según Wilby y Wigley (2001), LARS-WG es uno de los dos más importantes generadores de tiempo actualmente disponibles.

Tabla 1. Pendiente (P), intercepto (I) y coeficiente de correlación (CC) de las regresiones entre las temperaturas medias anuales y mensuales y el año correspondiente.

	Temperatura			Precipitación		
	P	I	CC	P	I	CC
Enero	0,021	-34,4	0,47*	0,003	54,5	0,00
Febrero	0,022	-36,1	0,61*	0,003	54,5	0,00
Marzo	0,019	-30,0	0,44*	0,002	50,1	0,00
Abril	0,029	-47,7	0,54*	-0,035	120,3	0,04
Mayo	0,032	-49,9	0,51*	-0,332	721,6	0,33*
Junio	0,056	-94,9	0,64*	-0,102	248,0	0,09
Julio	0,078	-133,7	0,66*	-0,135	298,2	0,23*
Agosto	0,045	-64,2	0,56*	-0,026	65,9	0,07
Septiembre	0,046	-72,1	0,58*	-0,002	24,9	0,00
Octubre	0,034	-52,2	0,61*	0,049	-55,7	0,06
Noviembre	0,028	-45,1	0,58*	-0,141	359,7	0,11
Diciembre	0,028	-47,0	0,59*	0,060	-41,2	0,06
Año	0,036	-58,9	0,85*	-0,646	1901,4	0,21*

* Significativa al 95%

Se consideró fecha de siembra y cosecha 15 de Mayo y 15 de Octubre en cada año, así como 11 riegos por superficie de alrededor de 55 mm cada uno y cada 15 días aproximadamente, lo cual se corresponde con la práctica tradicional del riego del maíz en la zona y se ha considerado como suficiente para cubrir las necesidades hídricas de este cultivo (Farré, 1998). De esta manera el objeto de las simulaciones fue evaluar la evapotranspiración del maíz, bajo riego tradicional, frente a las nuevas condiciones climáticas.

Se empleó el modelo agrohidrológico holandés SWAP (Van Dam et al., 1997) para estimar la transpiración del maíz, la evaporación desde el suelo, el drenaje y los demás componentes del balance hídrico a una profundidad de 1m. SWAP es un modelo de base física que estima los componentes del balance hídrico resolviendo la ecuación de Richards para el movimiento vertical del agua en el suelo, a través de un método de diferencias finitas. Aunque existen varios modelos capaces de estimar el uso del agua y el rendimiento del maíz, los modelos de base física o mecanicistas resultan particularmente ventajosos, ya que al estar basado en leyes de amplia validez resultan, al menos teóricamente, independientes de los cambios climáticos. Es por esa razón que este tipo de modelos son especialmente recomendados en estudios de impacto climático (Eatherall, 1997).

En particular se hizo énfasis en la estimación de la transpiración relativa (Tr), resultante del cociente entre la Transpiración real estimada y la Transpiración máxima o Potencial. La Tr está directamente relacionada con la

satisfacción de las necesidades hídricas del cultivo y por lo tanto con su rendimiento (Smith, 1992). En el modelo SWAP se estima la Transpiración real del cultivo, empleando una función empírica de absorción de agua por las raíces. La absorción máxima depende de la demanda evaporativa de la atmósfera y la real se calcula multiplicando la máxima por un coeficiente entre cero y uno que depende del contenido de agua en el suelo (Van Dam et al., 1997).

Se consideró como condición de frontera superior la evapotranspiración, calculada por el método de Priestly y Taylor (1972) y como condición de frontera inferior un acuífero a 2 m de profundidad, ya que la mayor parte de la siembra de maíz en la zona se realiza cerca de los ríos y por lo tanto con un acuífero cercano. Se debe destacar que los resultados de las simulaciones con SWAP y cualquier otro modelo de este tipo dependen fuertemente de las propiedades hidráulicas del suelo y de las condiciones de frontera adoptadas (Van Dam et al., 1997). Por lo tanto, los resultados a obtener sólo podrán ser válidos para las condiciones asumidas.

3. Resultados y discusión

La Fig. 2 muestra las temperaturas medias mensuales medidas en 2001 en Zaragoza, así como el promedio y las desviaciones típicas de las temperaturas medias mensuales obtenidas de las 30 realizaciones producidas por LARS-WG para ese año.

Las temperaturas medias mensuales registradas en el 2001 se corresponden con el promedio de las medias mensuales de las 30 “realizaciones” generadas para el 2001, si se tiene en cuenta las desviaciones típicas. Sólo en Diciembre que fue un mes inusualmente frío (evento extremo), la temperatura media mensual resultó significativamente menor que el promedio de las medias mensuales de los 30 Diciembres generados.

Mavromatis y Jones (1998) obtuvieron resultados similares con LARS-WG, concluyendo que el generador puede simular adecuadamente las medias mensuales, pero es incapaz de reproducir la ocurrencia de eventos extremos.

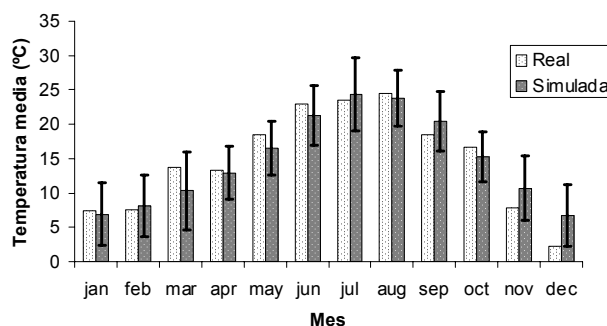


Fig. 2. Temperaturas medias mensuales medidas en Zaragoza en 2001 y medias mensuales de las 30 realizaciones de 2001 obtenidas con LARS-WG.

Asimismo, la Fig. 3 ofrece las temperaturas medias anuales y sus desviaciones típicas, calculadas por LARS-WG para Zaragoza; así como las predicciones de temperatura y su variabilidad, estimadas por el CCCMA.

De la Fig. 3 puede notarse que las temperaturas medias anuales obtenidas para Zaragoza a través del generador de tiempo son ligeramente superiores a las pronosticadas por el CCCMA para todo el Noreste de España. Este resultado puede explicarse por las diferencias climáticas entre las regiones cubiertas por un solo pronóstico del CCCMA, como ya señalaron Guereña et al. (2000), entre otros.

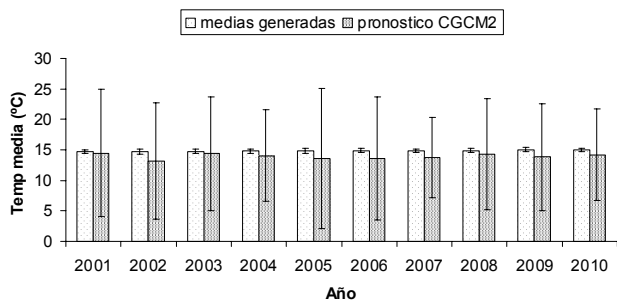


Fig. 3. Temperaturas medias mensuales y sus desviaciones típicas, calculadas de las 30 realizaciones de 2001 obtenidas con LARS-WG y pronosticadas por el CCCMA para el Noreste de España.

Sin embargo, debe destacarse la notable diferencia entre la variabilidad en la temperatura pronosticada por el CCCMA y la desviación típica obtenida de las realizaciones producidas por LARS-WG. Wilby y Wigley (2001), entre otros, destacan que los generadores de tiempo generalmente reproducen correctamente las medias mensuales, pero subestiman la variabilidad. Por otra parte, es precisamente esta variabilidad una de las consecuencias inmediatas del cambio climático (IPCC, 2000) y que tendrán posiblemente mayores consecuencias en la agricultura (Mearns et al., 1996). De esta manera, la gran desventaja de los generadores de tiempo es su ineficacia en predecir situaciones extremas. No obstante, resultan aún útiles para estimar las tendencias del clima futuro.

Las comparaciones entre las precipitaciones y particularmente entre las radiaciones medidas en Zaragoza y estimadas por LARS-WG resultan similares a la mostrada para la temperatura en la Fig. 2. De la misma manera las comparaciones entre los pronósticos de precipitación y radiación por CCCMA y LARS-WG se corresponden con las mostradas para la temperatura en la Fig. 3.

La Fig. 4 muestra las evapotranspiraciones medias anuales y sus desviaciones típicas entre el 2001 y el 2010, calculadas a partir de las 30 realizaciones anuales obtenidas del generador de tiempo.

Según la regresión efectuada, se prevé que las necesidades hídricas del maíz aumentarán de año en año de

una manera significativa, pero hay una notable variabilidad, mayor aún que el aumento previsto en todo el período. A pesar que LARS-WG subestima la variabilidad respecto a la pronosticada por el CCCMA, estas variaciones resultan tan importantes o quizás más importantes que los cambios en las medias.

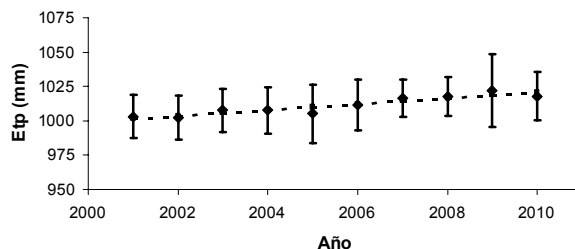


Fig. 4. Evapotranspiraciones medias anuales y sus desviaciones típicas, calculadas a partir de las 30 realizaciones del generador de tiempo para cada año.

La Fig. 5 muestra el promedio de los componentes del balance hídrico en cada año, así como la desviación típica obtenida de las 30 simulaciones para cada año.

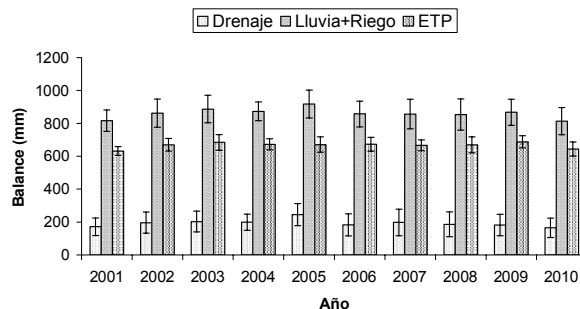


Fig. 5. Promedio y desviaciones típicas de los componentes del balance hídrico final para el maíz en cada año.

Como puede verse, la lluvia y particularmente el riego suministrado resultan suficientes para cubrir las necesidades hídricas del cultivo en el período señalado, significadas por la Evapotranspiración (ETP), a pesar del aumento de la evapotranspiración máxima provocada por el calentamiento de la atmósfera. Esto se cumple para todos los años, aún teniendo en cuenta la variabilidad de las lluvias y de las evapotranspiraciones. Sin embargo, para todos los años también existe una pérdida de agua importante por drenaje o percolación, cuya variabilidad es considerablemente mayor que la variabilidad de la ETP.

Las transpiraciones relativas promedio y su desviación típica se ofrecen en la Fig. 6.

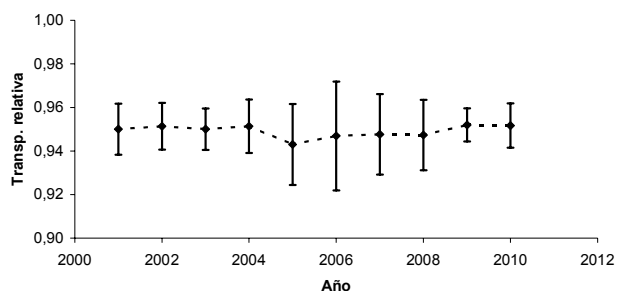


Fig. 6. Transpiraciones relativas medias y sus desviaciones típicas para el maíz en cada año.

De nuevo puede concluirse que las necesidades hídricas del cultivo, como promedio, quedan cubiertas por el manejo de riego considerado, ya que la Tr media está en todos los casos por encima de 0,95. Esto implica que, según las simulaciones, a pesar del aumento de las necesidades hídricas el riego tradicionalmente empleado es suficiente para cubrir estas necesidades en el periodo 2001-2010.

Debe destacarse, no obstante, la variabilidad encontrada al considerar las 30 realizaciones para cada año. Esta variación puede significar dos y hasta seis centésimas de diferencia; lo cual se traduce en la correspondiente diferencia en rendimiento del cultivo. Por otra parte, la variabilidad no se mantiene de la misma manera en todos los años, pudiendo ser en algunas ocasiones hasta más del doble de la pronosticada en otras. No se observa tampoco una regularidad en el aumento/disminución de la variabilidad, ya que el período estudiado (10 años) no es lo suficientemente grande como para mostrar efectos significativos del calentamiento global entre el primer y último año analizados.

La Tabla 2 muestra las correlaciones entre los distintos componentes del balance hídrico final del maíz. Todas las correlaciones resultaron significativas.

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre las medias de los componentes del balance hídrico del maíz entre 2001-2010. Se incluyen lluvia y riego (LL), Drenaje (DG), Transpiración (TP) y Evaporación desde el suelo (EV).

	LL	DG	TP	EV
LL	1,00			
DG	1,00	1,00		
TP	-0,86	-0,88	1,00	
EV	0,82	0,79	-0,61	1,00

Debe destacarse que los componentes del balance hídrico están correlacionados dentro de cada simulación, pero las correlaciones que se muestran en la Tabla 2 están calculadas entre los resultados de las simulaciones y no entre los componentes dentro de cada simulación. Las simulaciones son independientes entre sí, al haberse obtenido cada una con “realizaciones” climáticas diferentes, generadas de una distribución probabilística (Semenov y Barrow, 2002). Esto implica que se cumplen los supuestos estadísticos exigidos para los análisis de correlación y de varianza.

La correlación entre la entrada de agua (lluvia más riego) y las pérdidas de agua por drenaje es positiva y muy alta. La correlación entre la evaporación del suelo y la lluvia más riego es también positiva y alta. Asimismo, la correlación entre la evaporación y la transpiración del cultivo es negativa, lo cual resulta lógico ya que la evaporación disminuye a medida que aumenta el área foliar (y por ende la transpiración), durante el crecimiento del maíz.

Sin embargo, resulta sorprendente la correlación negativa entre la lluvia más riego y la transpiración. En principio debería haber una alta correlación positiva, ya que a medida que disponga el cultivo de mayor abastecimiento de agua, mayor será su transpiración y por lo tanto su rendimiento.

Esta situación puede explicarse a partir de lo mostrado en la Fig. 7, donde se ofrece la transpiración total del cultivo en función de la lluvia recibida durante el período vegetativo.

La lluvia anual promedio en Zaragoza es de 312 mm, pero la suma de las medias históricas en el período de Mayo-Octubre es de 130 mm. Como puede verse en la figura, la transpiración y el agua suministrada mantienen una relación altamente positiva para lluvias de hasta 200 mm, mientras que esta relación es negativa cuando la lluvia excede los 400 mm, lo cual se corresponde con un evento extremo.

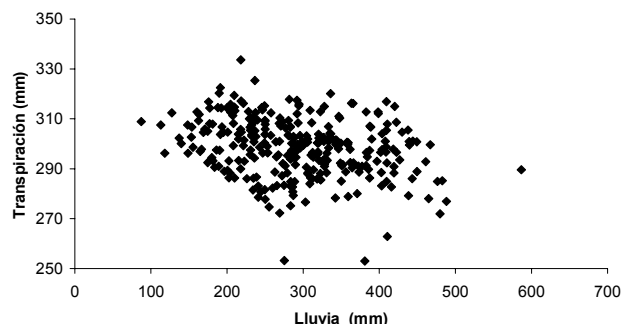


Fig. 7. Transpiraciones del maíz para las 30 simulaciones anuales durante el período vegetativo del maíz del 2001 al 2010, respecto a la lluvia correspondiente en cada caso.

Una de las ventajas del modelo SWAP y otros modelos de base física, es que no sólo simula los efectos que el déficit hídrico podría traer en la transpiración del cultivo y su rendimiento, sino también las consecuencias que ocasionaría el exceso de humedad (Leenhardt et al., 1995; Van Dam et al., 1997). En este estudio se consideró un acuífero a 2 m de profundidad como condición de frontera inferior, lo cual implica condiciones excesivas de humedad en el suelo para el caso de eventos extremos lluviosos, ya que en todos los casos se contaba además con un riego por inundación relativamente frecuente y abundante. Esto a su vez se traduce en una disminución de la transpiración, por bajar la actividad de las raíces. La regresión entre transpiración relativa y lluvia tiene una pendiente negativa

de 0,001 mm⁻¹, lo cual explica la correlación negativa mostrada en la Tabla 2.

De la misma manera, la correlación negativa entre el agua drenada y la transpiración, mostrada en la Tabla 2, refuerza el planteamiento de que el exceso de agua provoca stress en el cultivo. La conductividad hidráulica del suelo es relativamente alta, a partir de lo reportado por Cavero et al. (2000), por lo tanto el exceso de lluvias por lo general provoca drenaje y no escorrentía. La presencia de un acuífero permanente y cercano, considerado como condición de frontera inferior, junto a la entrada de agua por drenaje provoca un exceso de humedad en el suelo intolerable para el crecimiento del maíz.

Debe destacarse que estos resultados se obtienen sólo considerando como condición de frontera inferior un acuífero permanente y cercano, lo cual se corresponde con los campos de maíz cercanos a las márgenes de ríos, práctica tradicional en Aragón y otras regiones de España. Si se considera drenaje libre como condición de frontera inferior, en las simulaciones con SWAP se obtienen resultados diferentes (Utset, 2003) y el rendimiento del maíz queda menos afectado por el exceso de lluvias. Esta situación podría corresponderse con el maíz cultivado en tierras de cotas más altas y regado por aspersores o técnicas similares.

Rozenzweig et al. (2002) destacan la importancia de los efectos de las lluvias extremas y las disminuciones de rendimiento en cereales de los EEUU. Ellos modificaron el modelo CERES para poder simular el efecto del exceso de humedad en la disminución de los rendimientos, ya que las simulaciones efectuadas anteriormente para estudios nacionales encargados por el Departamento de Agricultura de los EEUU, diferían de los resultados observados para lluvias excesivas. Teniendo en cuenta el posible aumento de la frecuencia de eventos extremos provocada por el cambio climático, la probabilidad de pérdidas en rendimiento debidas a exceso de humedad en los suelos podrían incrementarse en el 90% en el 2030 y en el 150% en el 2090, lo cual significaría pérdidas totales de 3 billones de dólares anuales, frente al billón y medio de estimado actual. Los resultados mostrados en nuestras simulaciones se corresponden con los obtenidos por Rozenzweig et al. (2002) y el exceso de lluvias asociado a eventos extremos, cada vez más frecuentes, podría constituir el mayor riesgo climático para el cultivo del maíz bajo riego en el periodo 2001-2010 en Aragón, particularmente para los campos cercanos a ríos y regados por inundación.

De la misma forma, en la Tabla 3 se muestran los Coeficientes de correlación entre las desviaciones típicas de los componentes del balance.

Tabla 3. Coeficientes de correlación entre las desviaciones típicas de los componentes del balance hídrico del maíz entre 2001-2010. Se incluyen lluvia y riego (LL), Drenaje (DG), Transpiración (TP) y Evaporación desde el suelo (EV).

	LL	DG	TP	EV
LL	1,00			
DG	0,86*	1,00		
TP	0,35	0,52	1,00	
EV	0,62*	0,37	0,01	1,00

* Significativos al 95%

Como puede verse en la Tabla, sólo resultan estadísticamente significativas las correlaciones entre las desviaciones típicas del Drenaje y la Evaporación del suelo con la correspondiente a la entrada de agua por lluvia y riego. La variabilidad de la transpiración tiene una menor correlación debido a que se consideró un riego uniforme y constante, que hace que la transpiración del cultivo tenga una relativa independencia de la variabilidad de las lluvias. Sin embargo, el agua perdida por drenaje es mayor durante tormentas o lluvias intensas, por lo que la correlación de la variabilidad de esta componente del balance con la variabilidad de las lluvias es mayor. Por otra parte, la correlación de la variabilidad de la transpiración con la variabilidad del drenaje, aunque no significativa, es mucho mayor que la correlación de la variabilidad de la transpiración con la correspondiente a la evaporación del suelo. Esto pudiera deberse a la disminución de la transpiración para condiciones de excesiva humedad, lo cual se corresponde con momentos de considerable drenaje.

Queremos de nuevo señalar que los resultados de las simulaciones mostradas dependen de las propiedades hidráulicas y de las condiciones de frontera suministradas como entrada a SWAP. Para otras condiciones los resultados de la simulación serían otros.

Tubiello y Ewert (2002) citan más de 40 estudios de impacto climático en la agricultura publicados en los últimos años. Según ellos, los modelos utilizados han sido convenientemente validados y por lo tanto los resultados de los estudios pueden considerarse efectivos. Sin embargo, los modelos no siempre ofrecen resultados fiables. Por ejemplo, Landau et al. (1998) encontraron serias discrepancias entre los rendimientos de trigo simulados y los medidos en un conjunto numeroso de experimentos efectuados en Gran Bretaña. No obstante, Jamieson et al. (1999) señalan que las discrepancias encontradas por Landau et al. (1998) se deben fundamentalmente a no tener en cuenta las condiciones para bajo las cuales se realizan las simulaciones.

4. Conclusiones

De acuerdo a los estimados para el Noreste de España por el MGCA, el calentamiento global producirá un aumento significativo de la temperatura y una disminución de las precipitaciones, particularmente en Mayo y Julio. Esto deberá ocasionar un incremento de la Evapotranspiración máxima en el periodo 2001-2010 para Zaragoza, aunque la variabilidad en las evapotranspiraciones estimadas es mayor que el aumento de la media.

El generador de tiempo resulta una herramienta adecuada para obtener las tendencias medias de los valores diarios de las variables meteorológicas para un sitio específico, condicionadas por el cambio climático. El generador de tiempo LARS-WG parece estimar convenientemente las medias mensuales de la Temperatura y otras variables meteorológicas, pero subestima significativamente su variabilidad. Esto se corresponde con

lo reflejado en trabajos anteriores y podría constituir una seria limitación para el empleo de los generadores en estudios del impacto agrícola de eventos climáticos extremos.

Las simulaciones realizadas con SWAP indican que el riego tradicionalmente considerado como óptimo para el maíz en la zona de Zaragoza es suficiente para cubrir las demandas hídricas de este cultivo, a pesar del incremento en la evapotranspiración. En general, la variabilidad de las lluvias no parece tener mucha influencia en la transpiración del cultivo, debido a la disponibilidad de riego. Esta variabilidad pudiera influir de manera significativa en el drenaje profundo. No obstante, es posible encontrar una notable variación en los rendimientos, debida a la incidencia de eventos extremos que podrían ocurrir sin una regularidad aparente.

En particular, puede concluirse de las simulaciones que la ocurrencia de lluvias relativamente intensas podría ocasionar una pérdida considerable de agua por drenaje, lo cual podría también acarrear contaminaciones en los acuíferos, en dependencia del uso de los fertilizantes. De la misma forma, en esos casos la lluvia no sólo no será beneficiosa, sino que provocaría una ligera disminución de los rendimientos, debido al exceso de humedad en los campos. Esto último podría ser incluso la razón de las mayores pérdidas de rendimientos, para el cultivo del maíz en parcelas próximas a los ríos y regadas por inundación.

Todas estas conclusiones se basan en las condiciones de frontera y en las propiedades hidráulicas consideradas para el modelo y no deben utilizarse para la toma de decisiones sin una validación exhaustiva. Pese a ello, este trabajo demuestra como los modelos, utilizados junto a un generador de tiempo, pueden ayudar en gran medida a conocer los efectos que el cambio climático produce en el balance hídrico de un cultivo en regadío y a adoptar las medidas pertinentes. En particular, estas técnicas pueden ser empleadas para decidir en que medida el cultivo de maíz es rentable o no en el futuro, teniendo en cuenta el aumento en el precio del agua y la variabilidad en los rendimientos.

Agradecimientos. Los autores quieren agradecer a la Fundación Ecología y Desarrollo de Aragón por su apoyo decisivo para este trabajo.

Referencias

- Cavero, J., Farré, I., Debaeke, P. y Faci, J.M., 2000. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agron. J.* 92:679-690.
- Cavero, J., Farré, I., Debaeke, P., Faci, J.M., 2000. Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agron. J.* 92:679-690.
- Eatherall, A. 1997. Modelling climate impacts on ecosystems using linked models and a GIS. *Climatic change* 35: 17-34.
- Faci, J. M. y Martínez-Cob, A., Cabezas A., 1994. Agroclimatología de los regadíos del bajo Gállego. Doce años de observaciones diarias en Montañana (Zaragoza). DGA Consejería de Agricultura, Ganadería y Montes, Zaragoza, 231 pp.
- Farre, I. 1998. Maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) response to deficit irrigation. Agronomy and modelling. PhD. diss. University of Lleida, Spain. 150 pp.
- Guereña, A., Ruiz-Ramos, M., Díaz-Ambrona, C.H., Conde, J.R. & M.I. Minués. 2001. Assessment of climate change and agriculture in Spain using climate models. *Agron. J.* 93:237-249.
- Hoogenboom, G. 2000 Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. *Agric. For. Met.* 103:137-157.
- IPCC. 2000. Impacts, Adaptations and mitigation of climate change: Scientific-Technical analysis. Cambridge University Press.,879.
- Jamieson, P.D., Porter, J.R., Semenov, M.A., Brooks, R.J., Ewert, F. y J.T. Ritchie. 1999. Comments on "Testing winter wheat simulation models predictions against observed UK grain yields" by Landau et al. (1998). *Agric. Forest. Meteorol.* 96:157-161.
- Landau, S., Mitchell, R.A.C., Barnett, V., Colls, J.J., Craigon, J., Moore y K.L., Payne, R.W., 1998. Testing winter wheat simulation models' predictions against observed UK grain yields. *Agric. For. Meteorol.* 89:85-99.
- Leenhardt, D., M. Voltz y S. Rambal, 1995. A survey of several agroclimatic soil water balance models with reference to their spatial application. *Eur. J. Agron.* 4 (1), 1-14.
- Mavromatis, T. y P.D. Jones. 1998. Comparison of climate scenario construction methodologies for impact assessment studies. *Agric. For. Meteorol.* 91:51-67.
- Mearns, L.O., C. Rosenzweig y R. Goldberg. 1996. The effect of changes in daily and interannual climatic variability on CERES-Wheat: A sensitivity study. *Climatol. Change* 32:257-292.
- Olesen, J.E. & B. Hindi. 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European J. Agronomy.* 16:239-262.
- Priestly, C.H.B.y R.J. Taylor. 1972. On the assessment of the surface heat flux and evapotranspiration using large-scale parameters. *Mon Weather Rev* 100: 81-92.
- Rawls, D., Gimenez y D., Grossman, R., 1998. Use of soil texture, bulk density and slope of the water retention curve to predict saturated hydraulic conductivity. *Trans ASAE*, 41: 983-988.
- Rawls, W., D. Brakensiek y K. Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE.* 25:51-66
- Semenov, M.A. & E.M. Barrow. 2002. LARS-WG. A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User Manual. Rothamstead Research, Hertfordshire, 27 pp.
- Semenov, M.A. & P.D. Jamieson. Using weather generators in crop modelling. In Sivakumar, M.V.K. (Ed.) Climate Prediction and Agriculture, Proceedings of the START/WMO International Workshop held in Geneva, Switzerland, 27-29 September 1999, Washington d.C. USA, International START Secretariat. p 119-142.
- Semenov, M.A. y E.M. Barrow. 2002. LARS-WG. A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User Manual. Rothamstead Research, Hertfordshire, 27 pp.
- Semenov, M.A. y P.D. Jamieson, 2000. Using weather generators in crop modeling. In Sivakumar, M.V.K. (Ed.) Climate Prediction and Agriculture, Proceedings of the START/WMO International Workshop held in Geneva, Switzerland, 27-29 September 1999, Washington d.C. USA, International START Secretariat. p 119-142.
- Sivakumar, M.V.K. (ed) 2000. Climate Prediction and Agriculture. Proceedings of the START/WMO International Workshop held in Geneva, Switzerland, 27-29 September 1999. Washington D.C., USA. International START Secretariat.
- Smith, M., 1992. CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper 46, Rome, 60 pp.
- Tubiello, F.N. & F. Ewert. 2002. Simulating the effects of elevated CO2 on crops: approaches and applications for climate change. *European J. Agron.* 16:1-18.
- Utset, A. 2003. Estimación del efecto del calentamiento global y la variabilidad climática en las necesidades hídricas y el rendimiento de cultivos de interés para la Comunidad de Aragón. Reporte de investigación. Fundación Ecología y Desarrollo, 13 pp.
- Van Dam, J. C., Huygen, J., Wesseling, J. G., Feddes, R. A., Kabat, P., van Walsum, P. E. V., Groenendijk, P. Y C.A. van Diepen. 1997. Theory of SWAP version 2.0. Report 71. Technical Document 45, Wageningen, 167 pp.
- Wilby, R.L. & T.M.L. Wigley. Down-scaling general circulation issues in climate prediction. In Sivakumar, M.V.K. (Ed.) Climate Prediction and Agriculture, Proceedings of the START/WMO International Workshop held in Geneva, Switzerland, 27-29 September 1999, Washington d.C. USA, International START Secretariat. p 39-68.

