
ALTERACIÓN DE LA FERTILIDAD DEL SUELO POR EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU EFECTO EN LA PRODUCTIVIDAD AGRÍCOLA

MARCIAL CASTILLO-ÁLVAREZ, IOURII NIKOLSKII-GAVRILOV,
CARLOS ALBERTO ORTIZ-SOLORIO, HUMBERTO VAQUERA-HUERTA,
GUSTAVO CRUZ-BELLO, ENRIQUE MEJÍA-SÁENZ y ANTONIO GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ

RESUMEN

Los pronósticos de vulnerabilidad del rendimiento de cultivos en relación con los escenarios existentes del cambio climático durante el siglo XXI se realizan, generalmente, sin considerar la alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático. El objetivo del presente trabajo fue estimar el papel de ese factor en el pronóstico del cambio en la productividad del maíz (C_4) y trigo (C_3) de temporal en varias zonas de referencia de México, utilizando los pronósticos desarrollados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, para el escenario de duplicación del CO_2 en la atmósfera, al final del siglo XXI. Para estimar la alteración de la fertilidad del suelo se estableció una relación cuantitativa entre

el índice integral de fertilidad del suelo (F) para suelos con la misma génesis y un índice climático. Se pronosticaron cambios en las productividades real y potencial, en el índice F y en la disponibilidad hídrica para los cultivos. La alteración de la fertilidad del suelo puede causar cambio del rendimiento hasta en 20%, lo que indica su importancia en los pronósticos de rendimientos. Los resultados pronostican incrementos en el rendimiento hasta de $463\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en las zonas áridas y semiáridas, y disminuciones hasta de $392\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en las zonas húmedas y semi-húmedas, para el caso del maíz; y, en general, incrementos en la producción del trigo de hasta $1100\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

La concentración global de CO_2 en la atmósfera se ha incrementado desde un valor de 280ppm (valor preindustrial en el siglo XIX), hasta valores de 379ppm en 2005. Ahora es posible afirmar, con un nivel de confianza muy alto, que el calenta-

miento del sistema climático es inequívoco como resulta evidente de las observaciones de incremento en la temperatura media global del aire y del mar, el derretimiento generalizado del hielo y nieve y el incremento global del nivel medio del mar (Keeling y Whorf, 2005; IPCC, 2007).

Para el escenario de duplicación del contenido de CO_2 en la atmósfera al final del siglo XXI, el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México desarrolló los pronósticos del cambio climático en diferentes regio-

PALABRAS CLAVE / Cambio Climático / Índice Hídrico / Índice Hidrotérmico Local / Índice Integral de Fertilidad del Suelo / Rendimientos /

Recibido: 18/05/06. Modificado: 20/04/2007. Aceptado: 25/04/2007.

Marcial Castillo-Alvarez. Ingeniero Agrónomo, Universidad Autónoma Chapingo (UACH), México. Maestro en Ciencias en Agrometeorología y Candidato a Doctor en Ciencias, Colegio de Postgraduados (COLPOS), México. Profesor Investigador, UACH, México. marcial_castillo@correo.chapingo.mx

Iouri Nikolskii-Gavrilov. Ph.D. en Tecnología, Instituto Estatal Moscovita de Mejoramiento de Terrenos Agrícolas (IMMTA), URSS. D.Sci., IMMTA, URSS. Profesor Investigador, COLPOS, México. Dirección: Carr. México- Texcoco, Km. 36.5, C.P. 56230. Montecillo, Estado de México, México. e-mail: nikolski@colpos.mx

Carlos Alberto Ortiz-Solorio. Doctor en Ciencias en Edafología, COLPOS, México. Profesor Investigador, COLPOS, México. e-mail: ortiz@colpos.mx

Humberto Vaquera-Huerta. Doctor en Estadística, Universidad de Tulane, EEUU. Profesor Investigador, COLPOS, México. e-mail: hvaquera@colpos.mx

Gustavo Cruz-Bello. Licenciado en Biología y Maestro en Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Ph.D., Universidad de Arizona, EEUU. Investigador, Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias de México (INIFAP), México. e-mail: cruz.gustavo@inifap.gob.mx

Enrique Mejía-Sáenz. Ingeniero Agrónomo, UACH, México. Maestría y Doctorado en Hidrociencias, COLPOS, México. Profesor Investigador, COLPOS, México. e-mail: mejiasae@colpos.mx

Antonio González-Hernández. Ingeniero Agrónomo, UACH, México. Maestro en Ciencias en Agrometeorología, COLPOS, México. Investigador, INIFAP, México. e-mail: gonzalez.antonio@inifap.gob.mx

nes de México (Magaña *et al.*, 1997; Gay, 2003). Se pronosticaron cambios regionales en los valores mensuales de la temperatura del aire, precipitación y radiación global utilizando los modelos de Circulación General de la Atmósfera GFDL-R30 (del Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, Princeton, EEUU) y el CCC (del Centro Climático del Servicio Meteorológico de Canadá).

Para las condiciones de México hay pocas publicaciones relacionadas con la vulnerabilidad de los cultivos al cambio climático (Conde *et al.*, 1998; Gay, 2003). En esos trabajos se analiza la vulnerabilidad de los rendimientos de maíz de temporal en función de la concentración de CO₂ y el cambio climático, y no se considera el efecto de la alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático.

Los trabajos existentes señalan que en caso de duplicación de la concentración de CO₂, y los cambios correspondientes, se espera para cultivos de grano con mecanismo fotosintético C₃ un incremento promedio en el rendimiento de ~20-30% (Allen, 1990) y de -60 a -6% para plantas C₄ como el maíz (Liverman y O'Brien, 1994), dependiendo de la región.

Para pronosticar rendimientos de los cultivos en función de los escenarios de cambio se utilizan, por lo general, modelos matemáticos de diferentes grados de complejidad, que consideran el efecto de la concentración de CO₂ en la atmósfera, radiación fotosintéticamente activa (RFA), temperatura del aire (T) y precipitación (Pr). Los factores tales como CO₂, RFA y T definen el rendimiento máximo o potencial, entendido éste como el rendimiento de un cultivo cuando crece en ambientes a los cuales se ha adaptado, y crece sin limitaciones de nutrientes y agua, estando controlados de manera efectiva otros factores de estrés (Evans y Fischer, 1999; FAO-IIASA, 2000).

Frecuentemente, los modelos complejos de simulación de la productividad potencial tienen dificultades para su aplicación por la escasa disponibilidad de información confiable sobre sus parámetros. Por otra parte, los modelos relativamente sencillos basados en un mayor grado de empirismo tampoco tienen confiabilidad cuando se aplican a condiciones distintas a las de los sitios donde se han desarrollado (Boote *et al.*, 1996). Por esta razón, en este trabajo se ha utilizado una metodología relativamente simple, propuesta por la FAO-IIASA

(2000), basada en principios agroecológicos. Además, esta metodología utiliza un número reducido de variables y tiene amplia difusión en el mundo (FAO-IIASA, 2000).

Para cuantificar el efecto del déficit hídrico en la productividad de cultivos en condiciones de temporal se utilizan los índices de estrés hídrico, los cuales consideran la humedad del suelo durante el ciclo de cultivo o la relación entre precipitación y evapotranspiración (Doorenbos y Kassam, 1980; Frère y Popov, 1986).

En pocas publicaciones se ha intentado considerar otros factores limitantes tales como la fertilidad del suelo en función también de la concentración de CO₂ en la atmósfera y del cambio climático. El problema radica en que es difícil predecir la alteración de las propiedades químicas y físicas de los suelos en función del cambio climático a largo plazo. El uso de modelos matemáticos que simulan los procesos de formación del suelo en función de las condiciones climáticas y las prácticas agrícolas durante decenas de años tiene poca confiabilidad (Young, 1994). La confiabilidad de tales pronósticos disminuye cuando el período considerado aumenta (Ruelle, 1989). Para obtener pronósticos confiables es necesario utilizar métodos no basados en el modelado matemático, sino en otros principios. Uno de los enfoques que puede utilizarse es el método del IHT o índice de aridez. Este método está basado en los conceptos de la ley geográfica de zonificación de suelos y otros recursos naturales (Dokuchaev, 1898; Grigoriev, 1954; Buol *et al.*, 1989) y la teoría de formación de suelos en función de la energía solar y la precipitación (Budyko, 1974; Volobuyev, 1974). Según Volobuyev (1974) a nivel mundial algunas propiedades químicas y físicas de los suelos vírgenes en áreas grandes, con tamaño de al menos 10km² y geomorfológicamente similares, dependen del índice hidrotérmico local, IHT (adimensional), el cual se expresa como

$$IHT = Rn/(\lambda Pr) \quad (1)$$

donde $\lambda = 2,512 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$: calor latente de evaporación; Rn y Pr: radiación neta ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$) y precipitación ($\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$), respectivamente. Los valores de Rn y Pr son promedios anuales. El valor de Pr corresponde a la cantidad de agua que anualmente recibe el suelo y que utiliza para su formación. Una fracción de la radiación neta también se utiliza en los procesos biológicos, químicos y físicos de formación

del suelo (Volobuyev, 1974). Por lo general, Pr es la diferencia entre los valores de precipitación y escurrimiento superficial. Estudios preliminares realizados en México señalan que en terrenos planos con pendientes <3%, el escurrimiento superficial se puede ignorar en las zonas donde $Pr \leq 1000 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ e $IHT \geq 1,5$ (Nikolskii *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002).

Algunas propiedades químicas y biológicas de los suelos vírgenes, definidos como aquellos que conservan su cobertura de vegetación nativa al momento de realizarse el muestreo de suelos, al final del siglo XX (ϕ_{2000}) geomorfológicamente homogéneos y formados sobre subsuelos con textura y mineralogía similar, se correlacionan con el IHT^{2000} para finales del siglo XX (Nikolskii *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002). Si se considera que en el proceso relativamente lento del cambio climático las mismas propiedades llegan al equilibrio con las nuevas condiciones climáticas para finales del siglo XXI, y se pronostica el cambio del IHT durante el siglo XXI (IHT^{2100}), entonces se pueden estimar los nuevos valores ϕ_{2100} de las propiedades del suelo en cualquier sitio de referencia a través de las relaciones $\phi_{2000}(IHT^{2000})$ establecidas. La metodología para establecer las relaciones $\phi_{2000}(IHT^{2000})$ está descrita en los trabajos de Nikolskii *et al.* (2001), Tetumo *et al.* (2001) y Contreras *et al.* (2002). La metodología de pronóstico para el cambio de las propiedades del suelo se describe más adelante.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el efecto del cambio climático global en la fertilidad natural de los suelos agrícolas de México y la influencia de estos cambios en la estimación de la productividad de dos cultivos de importancia agrícola: maíz (C₄) y trigo (C₃) en algunos sitios de referencia del país.

Materiales y Métodos

Según la metodología de la FAO-IIASA (2000), y Pegov y Jomyakov (1991), los rendimientos de maíz y trigo de temporal se calculan con la ecuación

$$Y^j = Y_{\text{máx}}^j \cdot K_{\text{hidr}}^j \cdot F_a^j \quad (2)$$

donde Y^j : productividad agrícola en un sitio de referencia para los escenarios climáticos en el principio del siglo XXI ($j=2000$) o en su final ($j=2100$), para el cual se considera el caso de la concentración duplicada de CO₂; $Y_{\text{máx}}^j$: rendimiento potencial máximo dependiente de los

valores mensuales de la temperatura del aire, radiación global (o mas bien, radiación fotosintéticamente activa) y características propias del cultivo (en kg·ha⁻¹); K_{hidr}^j: índice hídrico (adimensional), que depende de la relación entre los valores mensuales de precipitación y la evapotranspiración potencial o IHT, y varía de 0 a 1; y F_a^j: índice integral de fertilidad del suelo agrícola (adimensional), el cual también depende del cambio del IHT y varía de 0 a 1.

Para pronosticar los rendimientos Y²¹⁰⁰ para finales del siglo XXI se utilizaron las salidas interpoladas de dos modelos de circulación general de la atmósfera GFDL-R30 y CCC, con los cuales en México se realizaron los pronósticos en el caso de duplicación de la concentración de CO₂ (2×CO₂) en la atmósfera (Gay, 2003). Para calcular los rendimientos Y²⁰⁰⁰ en los mismos sitios de referencia para las condiciones climáticas existentes (1×CO₂) al final del siglo XX se utilizaron las normales climatológicas obtenidas de la información publicada (ERIC II, 1999).

Con la Ec. 2 se calcularon los rendimientos de cada cultivo para el inicio (Y²⁰⁰⁰) y el final (Y²¹⁰⁰) del siglo XXI, considerando que el objetivo del trabajo fue la estimación del cambio relativo de rendimiento de los cultivos en algunos sitios geográficos de referencia durante este siglo. La estimación de los incrementos o decrementos relativos de rendimientos de los cultivos agrícolas ΔY (%) se ha hecho con

$$\Delta Y = \left(\frac{Y^{2100} - Y^{2000}}{Y^{2000}} \right) 100 = \left(\frac{Y_{\max}^{2100} K_{\text{hidr}}^{2100} F_a^{2100}}{Y_{\max}^{2000} K_{\text{hidr}}^{2000} F_a^{2000}} - 1 \right) 100 \quad (3)$$

donde Y_{max}²¹⁰⁰ y Y_{max}²⁰⁰⁰: rendimientos de los cultivos calculados para las condiciones climáticas pronosticadas para finales del siglo XXI (2×CO₂) y existentes en el inicio del siglo XXI (1×CO₂), respectivamente; (Y_{max}²¹⁰⁰)/(Y_{max}²⁰⁰⁰): relación entre los rendimientos potenciales máximos Y_{max}²¹⁰⁰ y Y_{max}²⁰⁰⁰ calculados para los finales y el principio del siglo XXI, respectivamente; (K_{hidr}²¹⁰⁰)/(K_{hidr}²⁰⁰⁰): relación entre los índices hídricos K_{hidr}²¹⁰⁰ y K_{hidr}²⁰⁰⁰ calculados para los ciclos de los cultivos en el fin y el principio del siglo XXI, respectivamente. Los valores de K_{hidr}^j son adimensionales, varían de 0 a 1 y dependen de la relación entre los valores mensuales de precipitación y la evapotranspiración

potencial ó del IHT; (F_a²¹⁰⁰)/(F_a²⁰⁰⁰): relación entre los índices integrales de fertilidad del suelo agrícola F_a²¹⁰⁰ y F_a²⁰⁰⁰ estimados para el fin y el principio del siglo XXI, respectivamente. Esta relación se estima en función únicamente del escenario del cambio climático. Es decir, se ignora el impacto del posible cambio de la tecnología agrícola en cada sitio de referencia.

Los rendimientos máximos de los cultivos Y_{max}^j (kg·ha⁻¹) se han calculado con la siguiente ecuación (FAO-IIASA, 2000):

$$Y_{\max}^j = B_n IC \quad (4)$$

donde Y_{max}^j: rendimiento potencial máximo o agroclimático de la materia seca económicamente aprovechable que pueden producir las plantas sanas con un suministro adecuado de agua y nutrientes (kg·ha⁻¹) en las condiciones del escenario climático actual (j= 2000) y para el escenario de duplicación de CO₂ (j= 2100); B_n: biomasa neta de la materia seca total (kg·ha⁻¹); e IC: índice de cosecha o la fracción de la biomasa B_n correspondiente al producto agrícola (adimensional). Según Anthony y Ziska (2000) IC no depende del contenido de CO₂ en la atmósfera en caso de duplicación de CO₂, por lo que en este trabajo no considera el cambio del IC en función del cambio de concentración de CO₂ en la atmósfera.

El valor de B_n (kg·ha⁻¹) se calcula con la ecuación (FAO-IIASA, 2000)

$$B_n = \frac{0,36 b_{gm} L}{(1/n) + 0,25 C_t} \quad (5)$$

donde b_{gm}: tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia con el índice de área foliar (IAF) = 5kg·ha⁻¹·día⁻¹; b_{gm} depende principalmente de la concentración de CO₂ en la atmósfera y de la radiación global (o más bien de la radiación fotosintéticamente activa); n: duración del ciclo normal del cultivo (en días); C_t: fracción de la tasa de producción de biomasa bruta (como CH₂O) que se pierde por la respiración de mantenimiento, la cual depende del tipo de cultivo (leguminosa o no leguminosa) y de la temperatura media del aire (kg·kg⁻¹·día⁻¹); y L: fracción de la tasa máxima de crecimiento del cultivo, por cobertura incompleta del terreno cuando IAF < 5 (adimensional).

Los valores de C_t se pueden calcular con la función

$$C_t = C_{30}(0,044 + 0,0019 T + 0,001 T^2) \quad (6)$$

donde T: temperatura media mensual del aire durante el ciclo del cultivo; y C₃₀:

tasa de pérdida de producción de biomasa bruta por la respiración de mantenimiento a 30°C (de 0,0108 para plantas no leguminosas). La diferencia se debe a la composición química de la biomasa.

El factor de corrección por cobertura incompleta del terreno (L) se calcula como

$$L = 0,3424 + 0,9051 \text{Log}_{10}(\text{IAF}) \text{ si } \text{IAF} < 5, \quad (7a)$$

$$\text{y } L = 1 \text{ si } \text{IAF} \geq 5 \quad (7b)$$

Para calcular los valores de b_{gm} se estimó la tasa máxima de producción de biomasa, P_m (kg de CH₂O por ha⁻¹·h⁻¹). Los valores de P_m para maíz y trigo para el escenario de duplicación de CO₂ se obtuvieron de la literatura (Acock, 1990; Allen, 1990). Los valores de b_{gm} se calcularon con las expresiones

$$b_{gm} = N(0,8 + 0,01 P_m) b_o + (1-N)(0,5 + 0,025 P_m) b_c$$

$$\text{si } P_m \geq 20 \text{kgCH}_2\text{O por ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \quad (8)$$

$$b_{gm} = N(0,5 + 0,025 P_m) b_o + (1-N)(0,05 P_m) b_c$$

$$\text{si } P_m < 20 \text{kgCH}_2\text{O por ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \quad (9)$$

donde b_o o b_c: tasas brutas de producción de materia seca para un cultivo de referencia hipotético (kgCH₂O por ha⁻¹·h⁻¹) en días completamente nublados y días completamente despejados, respectivamente, con dosel cubriendo completamente el terreno y una tasa máxima de producción de biomasa de 20kg·ha⁻¹·h⁻¹; y N: parámetro adimensional dependiente de la radiación fotosintéticamente activa teórica o potencial diaria con el cielo totalmente despejado Ac (MJ·m⁻²·día⁻¹) y de la radiación global de onda corta Rg (MJ·m⁻²·día⁻¹), calculado como:

$$N = \frac{Ac - 0,5 Rg}{0,8 Ac} \quad (10)$$

En la Ec. 10 se asume que la radiación fotosintéticamente activa real (RFA) es la mitad de la radiación global y que en un día nublado la RFA es el 20% de la teórica (Ac).

Se utilizó información bibliográfica sobre IC, n, IAF, ruta fotosintética, P_m, b_o, b_c e inicio del ciclo vegetativo de los cultivos de maíz y trigo a nivel regional (FAO-IIASA, 2000).

El índice hídrico K_{hidr}^j (adimensional) de la Ec (2) se calcula como

$$K_{\text{hidr}}^j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\text{IHT}_i^j} \quad (11a)$$

y cuando $K_{\text{hidr}}^j > 1$ se considera $K_{\text{hidr}}^j = 1$ (11b)

donde IHT_j^j : valores mensuales del índice hidrotérmico durante los ciclos vegetativos de cada cultivo con duración de $i=m$ meses en el principio ($j=2000$) y final ($j=2100$) del siglo XXI. Estos valores se calculan con la Ec. 1 para cada mes correspondiente al ciclo de cada cultivo dentro del año promedio. En estos cálculos en la Ec. 1, Pr se expresa en $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$ y Rn en $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mes}^{-1}$. Considerando una proporción lineal aceptable entre la tasa de evapotranspiración potencial y la Rn para calcular los valores de K_{hidr}^j con las Ecs. 11a y b.

Las láminas mensuales de precipitación $Pr_r^{j=2000}$ y $Pr_r^{j=2100}$, respectivamente en el principio y final del siglo XXI se obtuvieron a partir de la estadística climatológica ERIC II (1999) y de los resultados de pronósticos climáticos (Gay, 2003). La radiación neta ($Rn_i^{j=2000}$ y $Rn_i^{j=2100}$) se calculó a través de datos mensuales de la radiación solar global ($Rg_i^{j=2000}$ y $Rg_i^{j=2100}$) con la ecuación

$$Rn_i^j = (1 - \alpha_i^j) Rg_i^j - Rb_i^j \quad (12)$$

donde los valores de $Rg_i^{j=2000}$ y $Rg_i^{j=2100}$ ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mes}^{-1}$) se han tomado de las mismas fuentes (ERIC II, 1999; Gay, 2003); α : albedo de las superficies con los cultivos agrícolas (adimensional) entre 0,16 y 0,32 durante el ciclo vegetativo para el maíz (Burman y Pochop, 1994) y entre 0,15 y 0,25 para el trigo (Torres, 1995), y se supuso que los valores de α para el mismo cultivo son iguales al inicio y final del siglo XXI, de modo que $\alpha_i^{j=2000} = \alpha_i^{j=2100}$; Rb_i^j ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mes}^{-1}$): balance de radiación de onda larga y se calcula a través de las normales mensuales de la temperatura del aire, las cuales se obtienen de fuentes bibliográficas (ERIC II, 1999; Gay, 2003). La metodología de cálculo de Rb_i^j está descrita por Nikolskii *et al.* (2001) y Contreras *et al.* (2002).

Para estimar el efecto del cambio climático sobre la fertilidad del suelo agrícola, es decir, ignorando el efecto de las prácticas agrícolas, se asumió que la proporción entre los índices integrales de fertilidad del suelo virgen no usado en agricultura F_v^j al final e inicio del siglo XXI (la que depende exclusivamente de los escenarios del cambio climático) correspondía a la proporción entre los índices integrales de fertilidad del suelo agrícola F_a^j :

$$\frac{F_a^{2100}}{F_a^{2000}} \approx \frac{F_v^{2100}}{F_v^{2000}} \quad (13)$$

Según los datos bibliográficos el efecto directo del aumento de la concentración creciente de CO_2 en la atmósfera al final del siglo XXI sobre el cambio de fertilidad (principalmente a través del aumento de contenido de materia orgánica) es insignificante y puede ignorarse (Bazzaz y Sombroek, 1996; Knorr *et al.*, 2005; Reichstein *et al.*, 2005).

Para pronosticar la alteración en la fertilidad del suelo virgen en relación con el cambio climático, se utilizó la siguiente metodología: Primero se actualizan los valores modales de las propiedades del suelo tales como cantidad de materia orgánica, fósforo y potasio, así como de pH en los suelos vírgenes no usados en la agricultura en función del IHT para inicio del siglo XXI. Tales relaciones son representativas para grupos de suelos ubicados en terrenos geomorfológicamente homogéneos en altitudes de 0-2500msnm, con pendientes $< 3\%$, a fin de ignorar el posible efecto de la erosión hídrica, y formados sobre subsuelos con textura y mineralogía semejantes. En el presente trabajo se analizaron suelos automorfos, cuya formación no depende de la profundidad del manto freático, y los formados *in situ*.

Los datos de las propiedades de los suelos fueron tomados de una base de datos construida a partir de la información cuantitativa de pozos edafológicos registrada en las cartas edafológicas de México con escala 1:50000 y 1:250000 (INEGI, 2004). Los principios de la metodología de selección y tratamiento de los datos sobre propiedades de suelos vírgenes fue publicada anteriormente (Nikolskii *et al.*, 2001; Tetumo *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002). En el presente estudio el procesamiento de la información edafológica fue automatizado aplicando el sistema ArcInfo 9.0 para el análisis del modelo digital de elevación del terreno escala 1:250000, con un tamaño de malla de $200 \times 200\text{m}$ y utilizando las bases de datos sobre propiedades de suelos con ubicación georeferenciada de los pozos edafológicos. Como resultado se establecieron dependencias cuantitativas, en forma de gráficas, entre los valores modales de las propiedades de suelos ubicados en diferentes zonas climáticas y el IHT para inicio del siglo XXI. Para construir estas gráficas se aplicaron análisis estadísticos a los valores de propiedades de suelos, para eliminar datos no representativos (por varias razones) y, además, se determinó el tipo de distribución estadística para cada propiedad y se obtuvieron finalmente los valores modales típicos para las zonas climáticas con diferentes índices promedio anuales IHT. Para estos valores modales se buscaron las curvas de mejor ajuste,

utilizando el método de regresión por mínimos cuadrados, mediante el programa de cómputo Curve Expert, versión 1.34 (Hyams, 1997).

El índice integral de fertilidad F_v^{2000} se calculó con la ecuación de Pegov y Jomyakov (1991) que en comparación con otras (Sys *et al.*, 1991; Vergara y Etchevers, 2004) considera las propiedades del suelo más importantes para los cultivos y diferentes grados de su aporte al rendimiento y no depende de la ubicación del sitio. La ecuación es

$$F_v^{2000} = 0,46 \frac{MO}{MO_{\text{máx}}} + 0,28 \sqrt{\frac{P}{P_{\text{máx}}} \frac{K}{K_{\text{máx}}}} + 0,26 e^{\left(\frac{\text{pH}-6}{2}\right)^2} \quad (14)$$

donde MO, P, K y pH: valores modales de contenido de materia orgánica, fósforo, potasio y de pH, respectivamente, típicos para suelos vírgenes formados sobre subsuelos con textura y mineralogía similar en terrenos geomorfológicamente homogéneos, con los mismos grados de pendientes; $MO_{\text{máx}}$, $P_{\text{máx}}$ y $K_{\text{máx}}$: valores modales máximos observados en toda el área de estudio (México). Los valores modales de estas propiedades son típicos para áreas grandes y para las condiciones climáticas del inicio del siglo XXI. La gráfica $F_v^{2000}(\text{IHT}^{2000})$ fue utilizada para pronosticar el valor F_v^{2100} correspondiente al final del siglo XXI. Con este objetivo y con base en los pronósticos existentes del cambio climático en diferentes partes de México al final del siglo XXI (Gay, 2003) se calcularon los valores promedio anuales de IHT^{2100} , utilizando las Ecs. 1 y 2 con las dimensiones de Rn^{2100} , Rg^{2100} y Rb^{2100} en $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ y de Pr^{2100} en $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$. Considerando que la gráfica $F_v^{2000}(\text{IHT}^{2000})$ refleja la ley geográfica de zonificación de suelos, se supone que esta relación debe conservarse independiente de los cambios climáticos, porque con los cambios climáticos relativamente lentos las propiedades de suelos responsables por el índice F_v deben llegar al equilibrio con las nuevas condiciones climáticas conservando la relación $F_v^{2000}(\text{IHT}^{2000})$.

Si se tiene los valores IHT^{2000} e IHT^{2100} calculados para cualquier sitio de referencia (dentro del grupo homogéneo de los terrenos seleccionados), entonces con la gráfica $F_v^{2000}(\text{IHT}^{2000})$ se puede obtener los valores modales del índice de fertilidad F_v^{2000} y F_v^{2100} representativos para la zona climática donde se ubica este sitio en el inicio y final del siglo XXI. La metodología de tal determinación es similar a la descrita en las publicaciones anteriores (Nikolskii *et al.*, 2001; Tetumo *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002). Utilizando los valores de F_v^{2000} y F_v^{2100} se

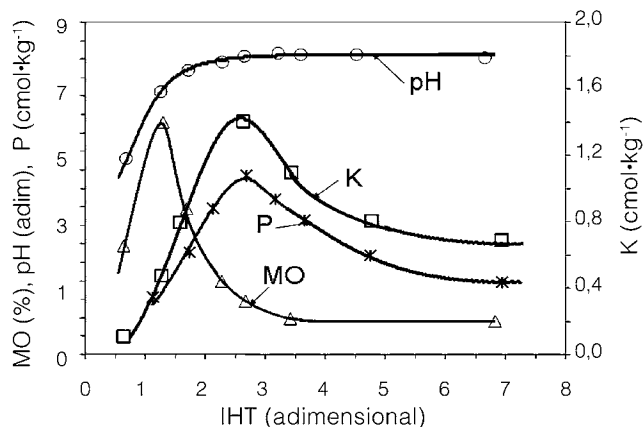


Figura 1. Dependencia de valores modales de contenido de materia orgánica (MO), fósforo (P), potasio (K) y pH en las propiedades de suelos vírgenes no usados en agricultura y ubicados en los terrenos con pendientes <3% en altitudes de 0-2500m en función del IHT²⁰⁰⁰ en el principio del siglo XXI

TABLA I
CONSTANTES DE LAS FUNCIONES ANALÍTICAS QUE RELACIONAN LAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LOS SUELOS Y EL IHT

Propiedad	a	b	c	d	r ²
pH	5,00	2,5	8,0	5,90	0,96
MO	0,10	1,4	-1,5	0,80	0,98
P	-0,20	1,0	-0,5	0,12	0,86
K	0,04	9,3			0,92

puede estimar la proporción F_a^{2100} / F_a^{2000} con la Ec. 13.

Resultados y Discusión

Los cálculos del IHT²⁰⁰⁰ a nivel promedio anual señalan que en México este índice varía dentro del intervalo de 0,5 a 8. Los valores <1 corresponden a la zona húmeda tropical con precipitación promedio anual Pr >1500mm, de 1 a 2 a la zona semihúmeda con 1000 <Pr ≤1500mm, de 2 a 3,5 en la zona semiárida con 300 <Pr ≤1000mm, y los >3,5 a la zona árida con Pr ≤300mm (Contreras *et al.*, 2002). En la Figura 1 se presentan gráficas que relacionan IHT²⁰⁰⁰ con valores modales de cantidad de MO, P, K y pH. Estas curvas son más representativas para México en comparación con las publicadas anteriormente (Nikolski *et al.*, 2001; Tetumo *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002) porque para su establecimiento se utilizó la información edáfica con mayor cobertura en el territorio nacional (80% en lugar de 40%) y mejores métodos de tratamiento de la información. La dependencia de las propiedades de suelos vírgenes no usados en agricultura en función del IHT en la Figura 1

corresponde a los suelos minerales automorfos, formados *in situ* y geomorfológicamente homogéneos.

Las funciones analíticas y(x), donde y es la propiedad del suelo y x el IHT²⁰⁰⁰, que describen la relación entre los valores modales regionales de las propiedades en función del IHT²⁰⁰⁰ son: Para el pH, $y = (ab+cx^d)/(b+cx^d)$; para contenido de MO y P, $y = (a+bx)/(1+cx+bx^2)$; y para K, $y = ax^{b/x}$. Las constantes a, b, c y d de estas funciones y el coeficiente de determinación r² para cada una de las propiedades se presentan en la Tabla I.

Según la Figura 1, los suelos más fértiles en México se encuentran en las zonas con el clima semihúmedo donde la precipitación promedio anual es alrededor de 1300mm y el IHT de 1,0-1,5 (regiones de los estados de Guanajuato, Michoacán, Chiapas, Veracruz, Campeche y Colima). En estas zonas los suelos con vegetación natural tienen los mayores contenidos de MO (4,5-6,5% y en algunos lugares alcanza 10%) y pH neutro (6-7). Los suelos con mayor contenido de P (4-5cmol·kg⁻¹) y de K (1,2-1,5cmol·kg⁻¹) corresponden a las zonas áridas y semiáridas del país, donde el IHT varía de 2,3 a 3,5. Según Contreras *et al.* (2002), este grupo de suelos tiene los valores máximos de contenido de arcilla (30-35%) y capacidad de intercambio catiónico (20-25cmol·kg⁻¹) en las zonas con precipitación anual <1300mm e IHT entre 1,5 y 2,5. El valor máximo de saturación de bases (100%) de los suelos se tiene en la zona árida del país con IHT >3.

Las gráficas en la Figura 1 fueron utilizadas para calcular el índice integral de fertilidad de suelos F_v²⁰⁰⁰ (adimensional) con la Ec. 14. En la Figura 2 se presenta la curva de cambio del F_v²⁰⁰⁰ en función del IHT²⁰⁰⁰.

La función analítica y(x), donde y = F_v²⁰⁰⁰ y x = IHT²⁰⁰⁰, obtenida

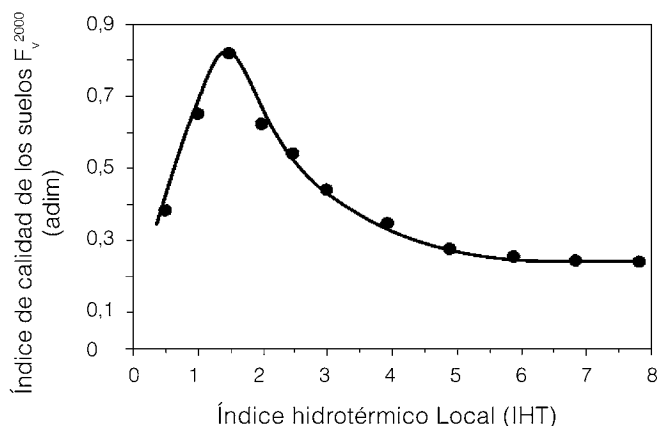


Figura 2. Dependencia del índice integral de fertilidad F_v²⁰⁰⁰ (ver Ec. 14) de suelos vírgenes no usados en agricultura y ubicados en los terrenos con pendientes <3% en altitudes de 0-2500m en función del IHT²⁰⁰⁰ en el principio del siglo XXI

con el programa Curve Expert 1,3 (Hyams, 1997) es $y = 4,9 x^{3,72} e^{2,488x} + 0,23$. El coeficiente de determinación de esta función es r² = 0,99.

Como se aprecia, la relación F_v²⁰⁰⁰ (IHT²⁰⁰⁰) refleja una regularidad en la distribución del índice integral del suelo virgen en función del IHT²⁰⁰⁰ en los terrenos con poca pendiente. Los valores del índice adimensional de fertilidad varían de 0,23 a 0,33 en las zonas áridas donde IHT²⁰⁰⁰ >4 hasta 0,79 en las zonas subhúmedas donde IHT²⁰⁰⁰ ~1,5. En las zonas tropicales húmedas donde IHT²⁰⁰⁰ <1 el índice de fertilidad se reduce hasta 0,36-0,6.

Analizando la gráfica F_v²⁰⁰⁰ (IHT²⁰⁰⁰) de la Figura 2 se puede concluir que en el intervalo 0 < IHT²⁰⁰⁰ < 3 el índice integral de fertilidad F_v²⁰⁰⁰ tiene una fuerte dependencia con IHT²⁰⁰⁰ comparando con las regiones donde IHT²⁰⁰⁰ > 3. Esto significa que los suelos más susceptibles al cambio climático se encuentran en las zonas donde 0 < IHT²⁰⁰⁰ < 3, es decir en las zonas del clima tropical húmedo (IHT²⁰⁰⁰ < 1), zonas con clima templado y humedecimiento moderado (1 < IHT²⁰⁰⁰ ≤ 2) y las zonas con clima semiárido (2 < IHT²⁰⁰⁰ ≤ 3). La vulnerabilidad de la fertilidad del suelo al cambio de clima se puede expresar matemáticamente como el valor absoluto de la derivada parcial $|\partial F / \partial IHT|$. Obviamente, el intervalo de máximos valores de $|\partial F_v^{2000} / \partial IHT^{2000}|$ corresponde al intervalo 0 < IHT²⁰⁰⁰ < 3.

La gráfica F_v²⁰⁰⁰(IHT²⁰⁰⁰), en la Figura 2, se utiliza para pronosticar el cambio del índice integral de fertilidad de suelos para un escenario futuro de cambio climático global en caso de duplicación de la concentración de CO₂ en la atmósfera. Con esta gráfica se estimó la relación F_v²¹⁰⁰ / F_v²⁰⁰⁰ para algunas áreas de referencia del país y con la Ec. 13 se estimó el coeficiente

TABLA II
UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ÁREAS DE REFERENCIA
SELECCIONADAS PARA EL PRONÓSTICO DEL CAMBIO EN EL
RENDIMIENTO DEL MAÍZ Y TRIGO DE TEMPORAL Y LAS CONDICIONES
CLIMÁTICAS AL PRINCIPIO DEL SIGLO XXI

Sitio	Estado	Latitud (N)	Longitud (O)	Altitud (m)	R _g ²⁰⁰⁰ (MJ·m ⁻² ·año ⁻¹)	T ²⁰⁰⁰ (°C)	Pr ²⁰⁰⁰ (mm·año ⁻¹)	IHT ²⁰⁰⁰ (adim)
Áreas de producción de maíz								
Coatepec	Veracruz	19°27'	96°57'	1252	6449	19,3	1800,4	0,64
Tuxpan	Veracruz	20°57'	97°24'	2	6205	25,3	1493,0	1,03
Atacomulco	México	19°48'	96°57'	2524	6158	14,6	815,4	1,11
Jerécuaro	Guanajuato	20°08'	100°31'	1931	6588	17,6	809,4	1,30
La Huerta	Jalisco	19°28'	104°38'	500	6358	24,5	1026,3	1,32
Magdalena	Jalisco	20°55'	103°58'	1359	7366	21,0	1004,7	1,35
Zapopan	Jalisco	20°43'	103°22'	1575	7366	21,7	866,6	1,36
Arcelia	Guerrero	18°17'	100°16'	530	7442	27,7	1135,4	1,62
Chapingo	México	19°30'	98°53'	2250	6829	15,6	610,2	1,76
Azúcar	Puebla	18°37'	98°28'	1285	7504	22,4	828,6	1,78
Ixcamilpa	Puebla	18°02'	98°42'	806	7150	25,8	803,9	1,96
Navjoa	Sonora	27°05'	109°26'	54	6388	27,4	365,3	3,90
Áreas de producción de trigo								
Apizaco	Tlaxcala	19°24'	98°08'	2408	6282	13,4	825,9	1,11
Tepatitlan	Jalisco	20°48'	102°44'	1746	6877	20,0	923,2	1,37
Sombrerete	Zacatecas	23°38'	103°38'	2351	6588	16,7	623,1	1,69
San Felipe	Guanajuato	21°28'	101°12'	2102	6756	16,1	499,4	2,13
Charcas	S.L.P.	23°08'	101°07'	2057	7074	17,5	405,6	2,97
El Rosario	B.C.N.	30°02'	115°43'	15	6172	18,7	242,0	4,24

Los datos climáticos corresponden a los valores promedio anuales al principio del siglo XXI. R_g²⁰⁰⁰: radiación global, T²⁰⁰⁰: temperatura del aire, Pr²⁰⁰⁰: lámina de precipitación, e IHT²⁰⁰⁰: índice hidrotérmico local.

F_a^{2100} / F_a^{2000} , para así calcular el cambio de rendimientos de los cultivos agrícolas ΔY con la Ec. 3, en la cual se utilizan los valores regionales de F_a^{2100} / F_a^{2000} .

Considerando que los pronósticos climáticos existentes en México se tienen solamente para 18 regiones homogéneas (Magaña *et al.*, 1997; Gay, 2003), las estimaciones de los cambios en la productividad agrícola se realizaron para las áreas donde los cultivos seleccionados tienen cierta importancia y donde está disponible la información sobre los pronósticos de radiación global, precipitación y temperatura. En la Tabla II se presenta la información sobre la ubicación de las áreas de referencia y de las características climáticas promedio anuales de estas áreas en el inicio del siglo XXI. Se aprecia gran variabilidad espacial en el clima entre las diferentes áreas de referencia al fin del siglo XX. Los valores promedio anuales del índice climático varían de 0,64, que corresponde a la zona tropical húmeda con una precipitación de 1800mm·año⁻¹ hasta 4,24, que se ubica en la zona árida con una precipitación de 242mm·año⁻¹. Las altitudes de estas áreas varían de 2 a 2525msnm.

En la Tabla III se presentan los datos principales de los escenarios climáticos (Magaña *et al.*, 1997; Gay, 2003) y de los pronósticos de cambio de rendimientos ΔY de los

cultivos de tipo C₄ (maíz) y C₃ (trigo) de temporal en el transcurso del siglo XXI en las áreas seleccionadas. Los resultados de los pronósticos de ΔY , realizados con la Ec. 3 también consideran la contribución directa del CO₂ sobre el rendimiento. Para el maíz, la fotosíntesis neta se incrementa en 10%; para el trigo se consideró un incremento del 39% (Acock, 1990; Allen, 1990).

Según la Tabla III, existe gran diferencia (hasta en el signo, incremento o decremento) e incertidumbre en los escenarios de cambio de precipitación calculados con los modelos GFDL-R30 y CCC. Esta incertidumbre sugiere realizar los pronósticos de rendimientos considerando la probabilidad de diferentes escenarios climáticos. Los pronósticos de los escenarios climáticos con diferentes grados de probabilidad todavía no están disponibles, por lo que el presente trabajo refleja una aproximación al problema de los pronósticos de cambio de rendimientos debidos al cambio climático, considerando no solamente el efecto directo del cambio sino también la alteración indirecta de la fertilidad del suelo en relación al mismo. Los escenarios climáticos presentados en la Tabla III muestran, además, que durante la estación de crecimiento del cultivo se esperan pequeños cambios negativos en la radiación global en casi todos los sitios de referencia e incrementos sig-

nificativos en la temperatura del aire. Por lo general, el modelo GFDL-R30 pronostica mayores incrementos en la temperatura que el modelo CCC. Como respuesta al incremento de la temperatura los cambios en los rendimientos tienden a ser positivos, principalmente en los sitios ubicados en valles altos, donde los incrementos en las temperaturas mejoran los regímenes térmicos durante el desarrollo de los cultivos y disminuyen el riesgo de pérdida de cosecha por bajas temperaturas.

Los pronósticos contradictorios en la precipitación tienen influencia directa sobre la estimación del índice integral de fertilidad del suelo (F) y el índice de disponibilidad de agua, K_{hidr}, provocando frecuentemente diferencias en el signo del cambio de estos índices. Ello trae como consecuencia cambios totales en la productividad (ΔY) de efecto contrario, lo que puede interpretarse como un margen de incertidumbre inducido por un pronóstico deficiente de la precipitación por uno o ambos modelos climáticos.

El índice hídrico K_{hidr} mostró no ser sensible a ninguno de los modelos climáticos para las regiones de La Huerta, Magdalena, Zapopan, Tuxpan, Coatepec, Arcelia, Apizaco y Tepatitlan, como se muestra en la Tabla III. Este índice se define como el inverso del IHT, o sea K_{hidr} = 1/IHT. El IHT se conoce como el índice de aridez (Budyko, 1974) porque se expresa como la relación entre la radiación neta y precipitación. La radiación neta es proporcional y prácticamente lineal a la evapotranspiración potencial (Martin *et al.*, 1993). Entonces, el valor K_{hidr} = 1/IHT se puede considerar como un índice de disponibilidad de agua en el suelo.

La capacidad del suelo para almacenar agua es un valor limitado por su porosidad y particularidades en la retención del agua. Esto significa que los valores de K_{hidr} >1,0 deben ser considerados como =1,0 ya que no pueden ser >1,0. Es decir, para los sitios geográficos de referencia donde en el principio del siglo XXI el valor del IHT es ≤1,0 y disminuye al final de ese siglo según los pronósticos existentes, es necesario considerar que los valores del K_{hidr} se conservan a un nivel de 1,0 y por esto el cambio del K_{hidr} es 0. Esta situación se observa por lo regular en las zonas tropicales húmedas de México, donde el balance hídrico mensual indica que los cultivos satisfacen sus necesidades de agua durante la estación de crecimiento (IHT <1,0 o K_{hidr} = 1,0). Entonces, cualquier

TABLA III
CAMBIO EN LAS VARIABLES CLIMÁTICAS (ΔR_g , ΔT Y ΔPr) DURANTE LA ESTACIÓN DE CRECIMIENTO DE MAÍZ Y TRIGO DE TEMPORAL, Y DE LOS COMPONENTES DE LA PRODUCTIVIDAD

Sitio	Modelo Climático	Cambio climático (Gay, 2003)			ΔY_{\max} (%)	ΔF_a (%)	ΔK_{hidr} (%)	ΔY (%)
		ΔR_g (%)	ΔT (%)	ΔPr (%)				
Áreas de producción de maíz								
Coatepec	GFDL-R30	-1,7	13,0	27,2	-1,2	-14,0	0,0	-15,0
	CCC	1,4	9,6	-13,6	2,6	16,3	0,0	19,3
La Huerta	GFDL-R30	-4,0	9,7	30,0	-2,2	-8,1	0,0	-10,1
	CCC	-3,8	8,5	-5,7	-1,3	1,4	0,0	0,0
Atlacomulco	GFDL-R30	-4,1	15,4	30,0	5,1	-13,4	0,0	-9,0
	CCC	-2,3	13,6	-10,5	6,5	7,5	0,0	14,5
Tuxpan	GFDL-R30	1,5	10,4	21,1	0,6	-8,1	0,0	-7,5
	CCC	-1,8	8,3	-13,9	-0,3	16,1	0,0	15,8
Magdalena	GFDL-R30	-4,3	10,5	29,0	5,0	-9,2	0,0	-4,7
	CCC	-5,9	10,1	-3,3	3,7	1,3	0,0	5,1
Jerécuaro	GFDL-R30	-5,3	12,9	30,0	6,0	-9,5	0,0	-4,1
	CCC	0,0	11,3	-15,4	8,5	6,8	10,0	15,9
Arcelia	GFDL-R30	-2,2	9,2	30,6	-1,0	-1,3	0,0	-2,2
	CCC	0,4	7,3	-23,5	1,9	-26,0	-10,0	-32,1
Zapopan	GFDL-R30	-4,4	11,5	27,8	8,8	-6,6	0,0	1,7
	CCC	-1,9	10,2	-12,1	10,7	0,0	0,0	10,7
Izúcar de Matamoros	GFDL-R30	-1,9	10,6	30,1	4,2	-7,0	10,0	6,6
	CCC	0,0	8,5	-22,5	6,4	-22,5	-26,7	-39,5
Ixcamilpa	GFDL-R30	-2,1	9,3	29,2	-0,5	19,4	12,0	33,0
	CCC	-0,2	7,5	-24,3	1,8	-21,0	-28,7	-42,6
Chapingo	GFDL-R30	-2,0	14,6	27,1	4,2	8,3	21,0	36,5
	CCC	-0,2	12,3	-18,4	6,0	-15,3	-21,9	-29,9
Navojoa	GFDL-R30	-2,0	7,9	37,2	-0,8	20,6	42,5	70,3
	CCC	-4,4	9,1	7,2	-3,7	-20,6	14,4	-12,5
Áreas de producción de trigo								
El Rosario	GFDL-R30	0,0	25,3	-16,1	26,0	-16,1	-1,0	4,6
	CCC	0,0	23,4	-24,9	26,7	-19,4	-8,3	-6,3
Tepatitlan	GFDL-R30	-4,2	11,6	28,9	13,3	-6,7	0,0	5,8
	CCC	-1,9	10,2	-14,6	16,3	-1,3	0,0	14,8
Apizaco	GFDL-R30	-2,0	8,8	27,4	25,7	-15,2	0,0	6,6
	CCC	-0,2	14,2	-17,0	27,3	7,6	0,0	37,0
Sombrerete	GFDL-R30	-2,7	14,1	26,7	19,8	5,4	4,0	31,3
	CCC	-0,4	12,6	-13,2	21,1	-10,8	-20,0	-13,6
Charcas	GFDL-R30	-2,2	13,3	27,0	19,0	13,6	17,5	58,9
	CCC	0,6	10,7	-16,9	22,6	-15,9	-21,8	-19,4
San Felipe	GFDL-R30	-2,5	14,4	28,0	21,0	15,3	19,4	66,5
	CCC	2,7	11,1	-24,9	26,2	-20,3	-28,9	-28,6

R_g: radiación global; T: temperatura de aire; Pr: precipitación; Y_{máx}: rendimiento potencial dependiente de la radiación solar, cantidad de CO₂ en la atmósfera y la temperatura T; F_a: índice integral de fertilidad del suelo; K_{hidr}: coeficiente de reducción del rendimiento potencial por deficiencia de agua en el suelo; Y: rendimiento real en función del cambio climático y de la fertilidad del suelo sin considerar problemas de plagas y enfermedades. Los símbolos 2000 y 2100 corresponden al inicio y final del siglo XXI, respectivamente. $\Delta R_g = (R_g^{2100} - R_g^{2000})/R_g^{2000}$; $\Delta T = (T^{2100} - T^{2000})/T^{2000}$; $\Delta Pr = (Pr^{2100} - Pr^{2000})/Pr^{2000}$; $\Delta Y_{\max} = (Y_{\max}^{2100} - Y_{\max}^{2000})/Y_{\max}^{2000}$; $\Delta F_a = (F_a^{2100} - F_a^{2000})/F_a^{2000}$; $\Delta K_{\text{hidr}} = (K_{\text{hidr}}^{2100} - K_{\text{hidr}}^{2000})/K_{\text{hidr}}^{2000}$; $\Delta Y = (Y^{2100} - Y^{2000})/Y^{2000}$; GFDL-R30: Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, Princeton, EEUU; CCC: Centro Climático del Servicio Meteorológico de Canadá.

incremento en la precipitación no produce cambio en el K_{hidr} al no contribuir a satisfacer las necesidades de agua de los cultivos, y es esta agua la que debe ser retirada de los terrenos agrícolas mediante drenaje natural o artificial.

Según Gay (2003), el modelo GFDL-R30 tiene mayor grado de confiabilidad porque reproduce mejor la climatología regional de México, considerando la concentración actual de CO₂ atmosférico. Posiblemente esto

significaría mayor confiabilidad de los resultados de pronósticos de cambio de rendimientos ΔY realizados con el escenario climático desarrollado con el modelo GFDL-R30. Los pronósticos de rendimientos correspondientes al escenario climático modelado con GFDL-R30 indican aumentos en los rendimientos de maíz y trigo (>30%) en las zonas semiáridas y áridas de México, donde IHT >2 y la precipitación es <1000mm·año⁻¹. En las zonas semihúmedas y húmedas tropicales con IHT <2 y precipitación >1000mm·año⁻¹ se espera una pérdida relativamente pequeña de productividad de maíz de grano (5-10%) y un aumento en la productividad del trigo (~5%).

La comparación de la vulnerabilidad de los cultivos de maíz y trigo al cambio climático señala mayor crecimiento de rendimiento del trigo que del maíz, lo que se debe a la mayor respuesta de fotosíntesis del trigo a las altas concentraciones de CO₂ en la atmósfera (Cure y Acock, 1986). Por lo general, los resultados de los pronósticos sobre el cambio en los rendimientos del maíz y trigo son congruentes con lo reportado en la literatura (Conde *et al.*, 1998; Gay, 2003). Acock (1990) supone que se puede esperar una respuesta positiva promedio para plantas C₄ en el mundo como respuesta a las mayores concentraciones de CO₂ en la atmósfera. Para maíz y trigo se espera un crecimiento en su productividad del 5% y 30%, respectivamente.

Del análisis de la Tabla III se aprecia que el índice de fertilidad del suelo F_a, como factor influyente en el rendimiento de cultivos, es susceptible al cambio climático.

Según el IPCC (2007) un escenario factible de ocurrir en las zonas tropicales e intertropicales, sin conducir necesariamente a cambios en los valores anuales de las precipitaciones, son las sequías mas largas e intensas durante la estación de crecimiento de los cultivos y la intensificación de los eventos de precipitación. Esto podría influir de manera importante en el balance hidrotérmico de los suelos, y si bien en este trabajo se calcula el índice climático durante la estación de crecimiento, a partir del promedio de sus valores mensuales, la consideración plena en este modelo del escenario, el que posiblemente pronto va a desarrollarse, implicaría la modificación de la Ec. 1 para considerar el escurrimiento superficial (S) y así considerar la lámina de agua precipitada que realmente penetra en el perfil del suelo (IHT = Rn/(λ (Pr-S))). Otras consideraciones

relevantes consisten en usar el valor de precipitación a un nivel de probabilidad determinado (p.ej. 80%) y la disminución de los intervalos de tiempo utilizados en el cálculo del IHT.

Conclusiones

La duplicación de la concentración del CO₂ actual estimulará en mayor medida la asimilación de carbono en las plantas C₃ (como el trigo) en comparación con las plantas C₄ (como el maíz). Esto traerá como consecuencia un incremento en los rendimientos potenciales (relacionados con la concentración de CO₂, la radiación solar y temperatura del aire) del orden del 13 al 27%; los incrementos más bajos se asocian a los casos cuando la temperatura del aire rebasa los límites térmicos óptimos para los cultivos.

El análisis de vulnerabilidad de los componentes del rendimiento final de los cultivos agrícolas, tales como rendimiento potencial, índice de disponibilidad de agua en el suelo e índice de fertilidad, señalan que es importante considerar la alteración de la fertilidad del suelo agrícola atribuible al cambio climático. Ignorar este factor puede causar errores significativos, de hasta 20%, en las estimaciones de los rendimientos.

En caso de realización de los escenarios climáticos relacionados con incrementos en la temperatura del aire y aumentos en la precipitación, se esperan incrementos significativos en el rendimiento del trigo y maíz de temporal. Sin embargo, en zonas semihúmedas y húmedas tropicales el aumento en la precipitación puede contribuir al lavado de los suelos y consecuentemente a una disminución de su fertilidad natural, lo que puede causar una disminución en los rendimientos.

REFERENCIAS

- Acock B (1990) Effects of carbon dioxide on photosynthesis, plant growth, and other processes. En Kimball BA, Rosenberg N, Allen LH (Eds.) *Impact of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture*. ASA Special Publ. N° 53. pp. 45-60.
- Allen LH (1990) Plant responses to rising carbon dioxide and potential interactions with air pollutants. *J. Envir. Qual.* 19: 15-34.
- Anthony EH, Ziska LH (2000) Crop breeding strategies for the 21st century. En Reddy KR, Hodges HF (Eds.) *Climate change and global crop productivity*. CABI. Nueva York, EEUU. pp. 407-423.
- Bazzaz F, Sombroek W (Eds.) (1996) *Global climate change and agricultural production. Direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes*. FAO. Roma, Italia. 146 pp.
- Boote KJ, Jones JW, Pickering NB (1996) Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.* 88: 704-716.
- Budyko MI (1974) *Climate and Life*. Academic Press. Nueva York, EEUU. 508 pp.
- Buol SW, Hole FD, McCracken RJ (1989) *Génesis y clasificación de suelos*. Trillas. México. 287 pp.
- Burman R, Pochop LO (1994) *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data*. Developments in Atmospheric Science 22. Elsevier. Nueva York, EEUU. 278 pp.
- Conde CAC, Liverman D, Flores M, Ferrer R, Araújo R (1998) Vulnerability of rainfed maize in Mexico to climate change. *Climate Res.* 9: 17-23.
- Contreras BA, Nikolskii GI, Aceves NL, Arteaga RR, Escalona MM, Fernández RD (2002) Pronóstico del cambio en algunas propiedades de los suelos agrícolas al modificarse las condiciones microclimáticas. *Agrociencia* 36: 267-277.
- Cure JD, Acock B (1986) Crop responses to carbon dioxide doubling: a literature survey. *Agric. Forest Meteorol.* 38: 127-145.
- Dokuchaev VV (1898) *Estudio de zonas naturales. Las zonas horizontales y verticales*. Sociedad Rusa de Naturalistas. Rusia (en ruso). 210 pp.
- Doorenbos J, Kassam AH (1980) Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Publ. No.33. FAO. Roma, Italia. 212 pp.
- ERIC II (1999) *Extractor rápido de información climatológica de México*. Vol. 2.0. CNA-IMTA (CD).
- Evans LT, Fischer RA (1999) Yield potential: Its definitions, measurement, and significance. *Crop Sci.*, 39: 1544-1551.
- FAO-IIASA (2000) *Global agroecological zones*. Methodology and results of the Global Agro-Ecological Zones Model. CD-ROM. Versión 1.0. www.fao.org
- Frère M, Popov GF (1986) *Pronóstico agrometeorológico del rendimiento de los cultivos*. FAO. Roma, Italia. 194 pp.
- Gay C (Ed.) (2003) *Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. UNAM, México. 220 pp.
- Grigoriev AA (1954) Zonificación geográfica de los recursos naturales y su aplicación. *Izvestia AN SSSR, ser. Geogr.* 5: 5-17 (en ruso)
- Hyams D (1997) *A curve fitting system for Windows* (computer program). Versión 1.3.4. Microsoft. San Francisco, EEUU. 71 pp.
- INEGI (2004) *Información Nacional sobre Perfiles de Suelo*. Ver. 1.2. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. 24 pp.
- IPCC (2007) *Climate change 2007: The physical science basis*. Fourth assessment report. WMO-UNEP. 18 pp. www.ipcc.ch
- Keeling CD, Whorf TP (2005) Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. En *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, TE. EEUU. <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/contents.htm>
- Knorr W, Prentice IC, Holland EA (2005) Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature* 433: 298-301.
- Liverman DM, O'Brien KL (1991) Global warming and climate change in Mexico. *Global Env. Change* 1: 351-364.
- Magaña V, Conde C, Sánchez O, Gay C (1997) Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico. *Climate Res.* 9: 107-114.
- Martin DL, Gilley JR, Baumer OW (1993) Water requirements for irrigation. En *National Engineering Handbook*. Chapter 2, part 623 (section 15). USDA. Washington, EEUU. 405 pp.
- Nikolskii GI, Bakhlaeva EO, Contreras BA, Ordaz CV (2001) Assessment of changes in soil properties as dependent on hydrothermic conditions of plowlands (by the example of Mexico). *Eurasian Soil Sci.* 35: 1031-1036.
- Pegov CA, Jomyakov PM (1991) *Modelación del desarrollo de los sistemas ecológicos*. Gidrometeoizdat. San Petersburgo, Rusia. 223 pp. (en ruso).
- Reichstein M, Kätterer T, Andrén O, Ciais P, Schuize ED, Cramer W, Papale D, Valentini R (2005) Does the temperature sensitivity of decomposition vary with soil organic matter quality? *Biogeosci. Disc.* 2: 738-747.
- Ruelle D (1989) *Chaotic evolution and strange attractors. The statistical analysis of time series for deterministic nonlinear systems*. Cambridge University Press. Cambridge, RU. 96 pp.
- Sys C, Van Ranst E, Debaveye J (1991) *Land evaluation. Part II. Methods in land evaluation*. General Administration for Development Cooperation. Brussels, Bélgica. 247 pp.
- Tetumo GJ, Nikolskii GI, Ortiz SC, Tijerina CL, Arteaga RR (2001) Evaluación del impacto del riego sobre algunas propiedades de suelos a través del índice hidrotérmico. *Agrociencia* 35: 137-147.
- Torres RE (1995) *Agrometeorología*. Trillas. DF, México. 154 p.
- Vergara SMA, Etchevers BJ (2004) Indicadores de calidad del suelo en laderas de la sierra norte de Oaxaca. En García-Mendoza AJ, Ordóñez MJ, Briones-Salas YM (Eds.). *Biodiversidad en Oaxaca*. Instituto de Biología, UNAM. México. pp. 585-602.
- Volobuyev VR (1974) *Introducción a la energía de formación de suelos*. Nauta. Moscú, URSS. 127 pp. (en ruso).
- Young A (1994) Modelling changes in soil properties. En *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. CABI. Bristol, RU. pp. 423-447.

SOIL FERTILITY ALTERATION DUE TO THE CLIMATE CHANGE AND ITS EFFECT ON AGRICULTURAL CROP PRODUCTIVITY

Marcial Castillo-Álvarez, Iourii Nikolskii-Gavrilov, Carlos Alberto Ortiz-Solorio, Humberto Vaquera-Huerta, Gustavo Cruz-Bello, Enrique Mejía-Sáenz and Antonio González-Hernández

SUMMARY

The predictions of vulnerability of agricultural crops productivity in relation with existing scenarios of climate change during the 21st century are usually carried out without taking into account the alteration in soil fertility due to climate change. The goal of the present work is to assess the role of such factor in the rainfed maize (C₄) and wheat (C₃) productivities in different reference sites of Mexico, using the climate change scenarios developed by the Center for Atmospheric Sciences, Universidad Nacional Autónoma de México, for the case of atmospheric CO₂ doubling by the end of 21st century. The relationship between the

integral soil fertility index F (for genetically homogeneous soils) and climatic index was established in order to assess the soil fertility alteration. The real and potential productivities of the crops, F index and water availability change were predicted. The soil fertility alteration can cause crop yield changes of up to 20%, which indicates its importance for crop productivity predictions. The results predict the growth of maize yield up to 463kg·ha⁻¹ in arid and semiarid zones, and its reduction in up to 392kg·ha⁻¹ in humid and semihumid zones. In the case of wheat it is expected, in general, a crop yield growth of up to 1100kg·ha⁻¹.

ALTERAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO PELA MUDANÇA CLIMÁTICA E SEU EFEITO NA PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA

Marcial Castillo-Álvarez, Iourii Nikolskii-Gavrilov, Carlos Alberto Ortiz-Solorio, Humberto Vaquera-Huerta, Gustavo Cruz-Bello, Enrique Mejía-Sáenz e Antonio González-Hernández

RESUMO

Os prognósticos de vulnerabilidade do rendimento de cultivos em relação com os cenários existentes da mudança climática durante o século XXI se realizam, como regra, sem considerar a alteração da fertilidade do solo atribuível à mudança climática. O objetivo do presente trabalho foi estimar o papel desse fator no prognóstico da mudança na produtividade do milho (C₄) e trigo (C₃) de temporal em várias zonas de referência do México, utilizando os prognósticos desenvolvidos pelo Centro de Ciências da Atmosfera, Universidade Nacional Autónoma do México, para o cenário de duplicação do CO₂ na atmosfera, ao final do século XXI. Para estimar a alteração da fertilidade do solo se

estabeleceu uma relação quantitativa entre o índice integral de fertilidade do solo (F) para solos com o mesmo gênese e um índice climático. Prognosticaram-se mudanças na produtividade real e potencial, no índice F e na disponibilidade hídrica para os cultivos. A alteração da fertilidade do solo pode causar mudança do rendimento em até 20%, o que indica sua importância nos prognósticos de rendimentos. Os resultados prognosticam incrementos no rendimento em até 463 kg·ha⁻¹ nas zonas áridas e semi-áridas, e diminuições em até 392 kg·ha⁻¹ nas zonas úmidas e semi-úmidas, para o caso do milho; e, em geral, incrementos na produção do trigo em até 1100 kg·ha⁻¹.