

Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México

• Juan Gabriel Brigido* • Iouri Nikolskii • Liliana Terrazas •
• Sergio Santiago Herrera •
Colegio de Postgraduados, México

*Autor de correspondencia

Resumen

Brigido, J. B., Nikolskii, I., Terrazas, L., & Herrera, S. S. (julio-agosto, 2015). Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 101-116.

La estimación de la vulnerabilidad de los cultivos agrícolas al cambio climático se hace principalmente ignorando la alteración posible de la fertilidad del suelo atribuible al mismo cambio climático. El objetivo principal del presente trabajo fue estimar el papel de la alteración de la fertilidad del suelo en las predicciones sobre la productividad del cultivo de café (*Coffea Arabica* L.) al final del siglo XXI para seis de las regiones cafetaleras productoras más importantes del estado de Veracruz, México. Se han considerado tres modelos de circulación global bajo dos escenarios de forzamiento radiativo. Se ha aplicado un modelo de desarrollo del cultivo en función de sus características biológicas y las características climáticas propuesto por IIASA/FAO y utilizado ampliamente en el mundo. Los cálculos de la productividad de café cereza para las condiciones climáticas actuales y su comparación con los datos reportados por la SAGARPA señalan que los rendimientos calculados son confiables. El coeficiente de correlación entre los rendimientos calculados y observados es igual a 0.93 con error estándar de 0.08. Al final del siglo XXI se espera hasta un 34% de reducción en la productividad de café, variando entre regiones cafetaleras debido principalmente al cambio en la precipitación y, en menor grado, al incremento de la temperatura del aire. La ignorancia de la alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático puede causar errores en la estimación de la productividad de café de hasta un 40%, por lo que este factor no debe ser desestimado.

Palabras clave: vulnerabilidad, agricultura, índice hidrotérmico local, índice integral de fertilidad del suelo, escenarios de cambio climático, estado de Veracruz, México.

Abstract

Brigido, J. B., Nikolskii, I., Terrazas, L., & Herrera, S. S. (July-August, 2015). *Estimate of the Impact of Climate Change on Soil Fertility and Coffee Production in Veracruz, Mexico*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(4), 101-116.

Estimates of the vulnerability of crops to climate change typically ignore the possible alterations in the fertility of the soil caused by this phenomenon. The primary objective of the present work was to estimate the role of alterations in soil fertility in the predictions of coffee production (Coffea Arabica L.) for the end of the 21st century in 6 of the largest coffee producing regions in the state of Veracruz, Mexico. Three global circulation models were used with two radiative forcing scenarios. A crop development model was applied according to the biological and climate characteristics proposed by IIASA/FAO. The model is extensively used worldwide. The calculations of cherry coffee production based on current climate conditions and their comparison with data reported by SAGARPA indicate that the yields calculated are reliable. The correlation coefficient between the calculated and observed yields is 0.93 with a standard error of 0.08. By the end of 21st century, as much as a 34% reduction in coffee production is expected. This varies among coffee regions primarily due to changes in rainfall, and to a lesser extent to increases in air temperature. A lack of knowledge about alterations in soil fertility caused by climate change can create errors as high as 40% in the estimation of coffee production. This factor should therefore not be overlooked.

Keywords: Vulnerability, agriculture, local hydrothermal index, integral soil fertility index, climate change scenarios, state of Veracruz of Mexico.

Recibido: 27/01/2014
Aceptado: 06/03/2015

Introducción

Numerosos estudios recientes apuntan a que la variación del clima registrada en los últimos años es particularmente extraordinaria (Jacoby & D'Arrigo, 1997; Mann, Bradley, & Hughes, 1998, 1999; Rodney & Freddy, 2002; Caballero, Lozano-García, Vázquez-Selem, & Ortega, 2010). Se sabe de ciertos factores que pueden producir cambios en el clima, aunque no de manera precisa; mientras que algunos consideran que estamos ante un evento natural que es parte de un ciclo, para la mayoría el cambio climático tiene su origen total o parcialmente en las actividades humanas, en particular en las emisiones de carbono a la atmósfera por el uso de combustibles fósiles y deforestación (Gonzalez et al., 2003; Magaña, 2004).

Se considera que dicho cambio climático observado en la actualidad afectará en el futuro los recursos naturales de manera inevitable y, por lo tanto, la productividad agrícola, incluyendo el cultivo de café. Las investigaciones realizadas hasta el presente en el mundo y en México sobre vulnerabilidad de café al cambio climático consideran sólo el efecto directo de cambio de la radiación solar, temperatura del aire y de precipitación, ignorando el efecto indirecto relacionado con la posible alteración de la fertilidad del suelo debido al mismo cambio climático.

El estado de Veracruz ocupa el segundo lugar nacional en producción de café, con una superficie de 153 mil hectáreas, que benefician de manera directa a unas 300 mil familias dedicadas a este cultivo (Contreras, 2010). Hasta el momento se han hecho varios estudios sobre vulnerabilidad del cultivo de café (principalmente para *Coffea arabica* L.) ante los escenarios de cambio climático esperado durante el siglo XXI. La mayor parte de ellos representan análisis cualitativos (Camargo, 2010; Villers, Arizpe, Orellana, Conde, & Hernández, 2009; Hagggar & Schepp, 2012), los cuales concluyen cómo se afectarán algunos procesos fisiológicos de desarrollo del cultivo, pero no permiten saber sobre el porcentaje del cambio en el rendimiento.

Otros estudios estiman de manera cuantitativa el impacto potencial del cambio climático sobre la productividad de café; estos estudios se basan en el uso de los modelos empíricos de tipo de regresión entre la productividad de café, en función de los factores climáticos y aún algunos factores económicos relacionados con el manejo de dicho cultivo (Fontagro, 2011; Hagggar & Schepp, 2012; Laderach et al., 2011; Lin, Perfecto, & Vandermeer, 2008; Paavola, 2008; Heakin, Gay, Estrada, & Conde, 2004; Jaramillo et al., 2011) o bien de los modelos teóricos (principalmente del IIASA-FAO, 2012) sobre el desarrollo del cultivo de café en función de sus características biológicas y las condiciones climáticas esperadas en transcurso del siglo XXI (Bunn et al., 2013; Davis, Gole, Baena, & Moat, 2012; Rivera-Silva et al., 2013), en los cuales han encontrado como resultado que se espera una pérdida en la cosecha de café (*Coffea arabica* L.) en el estado de Veracruz en el transcurso del siglo XXI de orden de 10 a 25%, en función de los escenarios de cambio climático y modelos utilizados para tal análisis.

No obstante, en dichos estudios se ignora el factor de la alteración potencial de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático a largo plazo. Durante los últimos años, se han hecho varios trabajos en México sobre la estimación cuantitativa de papel de cambio en la fertilidad del suelo y su efecto en el cambio de la productividad agrícola (Nikolskii, Bakhlaeva, Contreras, & Ordaz, 2001; Contreras et al., 2002; Castillo et al., 2007; Terrazas, Nikolskii, Heerera, Castillo, & García, 2010); sin embargo, estos trabajos se dedicaron a estimar la vulnerabilidad al cambio climático solamente de cultivos de trigo, maíz y frijol.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la vulnerabilidad de la producción del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en la zona centro del estado de Veracruz al final del siglo XXI, utilizando el modelo teórico de la IIASA/FAO (2012) y considerando no sólo el proceso fisiológico de desarrollo del cultivo en función de las condiciones climáticas; sino, además, el efecto del posible cambio en la fertilidad del suelo ocasionado por el cambio climático.

Materiales y métodos

El presente estudio se llevó a cabo en la zona centro del estado de Veracruz, en 20 municipios que se encuentran distribuidos en las seis principales regiones cafetaleras del estado de Veracruz: Atzalan, Coatepec, Córdoba, Huatusco, Misantla y Tezonapa. Dicha zona concentra 90% de los productores y 93% del total de la superficie cafetalera de la entidad (Moguel & Toledo, 1999; López, Díaz, & Martínez, 2007).

Las regiones se encuentran ubicadas entre latitudes de 18° 36' a 20° 4', y altitudes que van desde los 600 a 1 500 msnm; la precipitación media anual es de 1 717.3 mm; la temperatura media anual es de 20.2 °C; los tipos de suelo predominantes son andosoles, cambisoles, lito-soles y luvisoles, y las pendientes de los terrenos varían entre 0 y 30% (SMN, 2013; INIFAP, 2012).

Las condiciones climáticas típicas para inicio del siglo XXI se obtuvieron utilizando las normales climatológicas para cada una de las estaciones climatológicas seleccionadas, mismas que se encuentran publicadas en la página web del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2013). Las condiciones climáticas para final del siglo se obtuvieron de las estimaciones desarrolladas por la Unidad Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), hechas a partir de tres modelos de los 15 modelos de circulación global disponibles en el proyecto de interoperación de modelos fase 5: MPI-ESM-LR (Max-Planck Institute), GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) y HADGEM2-ES (Met Office Hadley) (Fernández, Zavala, & Romero, 2014).

Se han considerado dos escenarios de forzamiento radiativo: RCP 4.5 (650 ppm de CO₂) y RCP 8.5 (1370 ppm); el forzamiento RCP 6.0 (720 ppm) no se ha analizado por considerarse un valor intermedio entre los seleccionados.

Los tres modelos mencionados fueron utilizados tomando en cuenta las siguientes razones:

- Aunque no existe gran diferencia entre los valores mensuales de temperatura y precipitación simulados por los diferentes modelos, los tres modelos utilizados se encuentran dentro del grupo de mejor resultado de desempeño, de acuerdo con la evaluación realizada por Cavazos *et al.* (2013).
- La resolución espacial de los 15 modelos presentados en el informe final de la actualización de escenarios de cambio climático para México, como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional es de 0.5° x 0.5° (55 x 55 km, aproximadamente) (Cavazos *et al.*, 2013). Sin embargo, los modelos utilizados fueron reestructurados mediante un proceso de reducción de escala hasta 30" x 30" (926 x 926 m, aproximadamente), tomando como referencia la climatología base 1950-2000 desarrollada por Hijmans, Cameron, Parra, Jones y Jarvis (2005), quienes incorporan el efecto topográfico y, por lo tanto, se obtiene una mejor alternativa de distribución espacial de las variables de cambio climático consideradas. Usar modelos con estas características resulta de gran importancia para calcular rendimientos de café en regiones montañosas del estado de Veracruz, donde existe una gran variación climática entre zonas cafetaleras.
- El propósito del presente trabajo fue estimar el posible grado de alteración de la fertilidad de suelo y el cambio en la productividad de café, en función de los cambios esperados de temperatura y precipitación en el estado de Veracruz al final del siglo XXI. Para ello partimos del supuesto de que si los rendimientos calculados no van a cambiar de manera importante, esto significaría que puede ignorarse la vulnerabilidad de la producción de café al cambio climático; pero si los rendimientos dependen significativamente de los cambios en la temperatura y precipitación simuladas por los modelos seleccionados, esto significaría que posteriormente será necesario profundizar y detallar este tipo de investigación.

Cuadro 1. Valores promedio anuales de temperatura de aire (T^{2000}), precipitación (Pr^{2000}), radiación neta (Rn^{2000}) e índice climático (IHT^{2000}) para inicios del siglo XXI en los sitios de referencia de producción de café (*Coffea Arabica L.*) del estado de Veracruz.

Región cafetalera	Municipio	T^{2000} (°C)	Pr^{2000} (mm año ⁻¹)	Rn^{2000} (MJ m ⁻² año ⁻¹)	IHT^{2000} (adim.)
Atzalán	Atzalán	16.1	1 947.32	3 900.42	0.8
	Jalacingo	15.7	1 678.52	4 116.88	0.98
	Las Minas	17.9	1 492.89	2 886.38	0.77
	Martínez de la Torre	23.6	1 986.44	3 958.62	0.79
Coatepec	Naolinco	22.6	1 046.63	5 056.40	1.92
	Coatepec	19.6	1 746.85	4 917.40	1.12
	Jalcomulco	24.5	1 090.12	5 334.82	1.95
	Teocelo	20.6	2 026.2	4 191.41	0.82
	Jilotepec	19.4	1 663.32	3 191.18	0.76
	Cosautlán de Carvajal	19.8	2 111.96	3 880.33	0.73
	Emiliano Zapata	23.2	935.6	4 102.23	1.75
Cordoba	Ixhuatlán del café	20.2	1 900.15	4 820.26	1.01
	Atoyac	24.5	2 116.74	4 039.01	0.76
Huatusco	Comapa	23.1	1 078.74	4 373.95	1.61
	Tenampa	19.8	1 681.69	3 457.04	0.82
	Huatusco	17.2	1 960.59	3 870.28	0.79
Misantla	Vega de Alatorre	24.2	1 578.69	3 967.41	1
	Misantla	24.7	1 715.56	4 407.86	1.02
	Acatlán	15.3	1 442.24	3 171.50	0.88
Tezonapa	Tezonapa	24.1	2 755.07	5 292.12	0.76

Nota: el índice climático IHT se describe por la ecuación (1).

Las características climáticas actuales de las regiones cafetaleras del estado de Veracruz se hicieron con estimaciones del impacto del cambio climático sobre la productividad de cereza de café (*Coffea Arabica L.*) al final del siglo XXI y se presentan en el cuadro 1.

Como puede observarse, las precipitaciones varían desde una lámina de 935.6 mm año⁻¹ hasta 2 755.07 mm; la temperatura media anual del aire se encuentra en un intervalo de 15 a 25°C.

Según Budyko (1974), Volobuev (1974), Aydarov (1985), Nikolskii et al. (2001), Contreras et al. (2002), Castillo et al. (2007), y Terrazas et al. (2010), las condiciones climáticas anuales para un año j pueden caracterizarse por el índice hidrotérmico local IHT :

$$IHT^j = \frac{Rn^j}{\lambda Pr^j} \quad (1)$$

Donde Rn^j es la radiación neta promedio anual (MJ m⁻² año⁻¹); λ es el calor latente de evaporación del agua (2.512 MJ m⁻² mm⁻¹), y Pr^j es la precipitación media anual (mm año⁻¹).

Los valores de IHT^j son adimensionales y para México varían de 0.4 a 1 en las zonas tropicales húmedas; de 1 a 3 en las zonas semi-húmedas y semi-áridas; y de 3 a 8 en las zonas áridas del norte del país. Como se ve en el cuadro 1, los valores del IHT^{2000} para las regiones de referencia de producción de café en el estado de Veracruz varían entre 0.73 y 1.95, lo que corresponde a un clima semi-húmedo.

Estimación de la productividad agrícola del café (*Coffea arabica* L.)

Los rendimientos del cultivo de café cereza se calcularon para los escenarios climáticos mencionados anteriormente y para las condiciones climáticas de inicio de este siglo, utilizando una ecuación propuesta por la IIASA / FAO (2012):

$$Y_{\text{cal}}^j = Y_{\text{máx}}^j * INSH^j * F_a^j \quad (2)$$

Donde Y_{cal}^j es la productividad agrícola del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) (en kg ha⁻¹ año⁻¹ de café cereza) en los sitios de referencia para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2\ 000$), y para el final del siglo XXI ($j = 2\ 075-2\ 099$); $Y_{\text{máx}}^j$ es el rendimiento potencial máximo o agroclimático de la materia seca económicamente aprovechable que pueden producir plantas sanas con un suministro adecuado de agua y nutrimentos (en kg ha⁻¹ año⁻¹), para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2\ 000$), y para el final del siglo XXI ($j = 2\ 075-2\ 099$); F_a^j = índice integral de la fertilidad del suelo para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2\ 000$), y para para el final del siglo XXI ($j = 2\ 075-2\ 099$), el cual se supone puede ser diferente al final del siglo debido a cierta dependencia de la fertilidad del suelo en función de las condiciones climáticas (Contreras et al., 2002; Castillo et al., 2007; Terrazas et al., 2010).

Desde luego, el modelo no considera un efecto potencial de plagas o enfermedades (las cuales se supone también dependen del cambio climático) debido a que los modelos matemáticos existentes utilizados en las investigaciones para pronosticar el impacto del cambio climático sobre enfermedades y/o plagas son empíricos (Van der Vossen, 2005). Es decir, se han desarrollado con base en observaciones hechas en algunos sitios de referencia, por lo cual no son representativos para su aplicación en otras regiones y zonas climáticas; además, tales modelos contienen una gran cantidad de parámetros empíricos, que no se sabría cómo aplicar para el caso del estado Veracruz. Por

tal razón, dichos modelos no se utilizan en la presente investigación.

Estimación de la productividad potencial ($Y_{\text{máx}}^j$)

El cálculo de la biomasa y el rendimiento potencial o máximo $Y_{\text{máx}}^j$ (en kg ha⁻¹ año⁻¹) del cultivo se realizó utilizando un modelo basado en principios ecofisiológicos (IIASA / FAO, 2012).

$$Y_{\text{máx}}^j = Bn * IC \quad (3)$$

Donde Bn es la biomasa neta de la materia seca total (en kg ha⁻¹) e IC es el índice de cosecha, o la fracción de Bn correspondiente al producto agrícola (adimensional). El valor de Bn (en kg ha⁻¹) se calcula con la siguiente ecuación:

$$Bn = \frac{0.36 b_{gm} L}{(1/n) + 0.25 C_t} \quad (4)$$

Donde b_{gm} es la tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia con el Índice de Área Foliar (IAF) igual a 5 (en kg ha⁻¹ día⁻¹); b_{gm} depende principalmente de la radiación fotosintéticamente activa y de la concentración de CO_2 en la atmósfera; L es la fracción de la tasa máxima de crecimiento del cultivo, por cobertura incompleta del terreno cuando el índice de área foliar IAF es menor de 5: $IAF < 5$ (adimensional); n es la duración del ciclo normal del cultivo (en días) para el cultivo de café (*Coffea Arabica* L.), la duración de ciclo es de 270 días (IIASA / FAO, 2012); C_t es la fracción de la tasa de producción de biomasa bruta (como CH_2O) que se pierde por la respiración de mantenimiento, misma que depende del tipo de cultivo (leguminosa o no leguminosa) y de la temperatura media del aire (kg día⁻¹).

Para la obtención de los valores de b_{gm} se estimó la tasa máxima de producción de biomasa, Pm (en kg CH_2O ha⁻¹ h⁻¹), mediante las expresiones siguientes:

Para $Pm^3 \geq 20$ kg CH_2O ha⁻¹ h⁻¹:

$$b_{gm} = N(0.8 + 0.01P_m)b_o + (1-N)(0.5 + 0.025P_m)b_c \quad (5)$$

Para $P_m < 20 \text{ kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$:

$$b_{gm} = N(0.8 + 0.01P_m)b_o + (1-N)(0.5 + 0.025P_m)b_c \quad (6)$$

Donde N es un parámetro adimensional dependiente de la radiación fotosintéticamente activa (Ac) teórica o potencial diaria cn el cielo totalmente despejado (en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y de la radiación global de onda corta (R_g , en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). Esta ecuación asume que la radiación fotosintéticamente activa (RFA) real es la mitad de la radiación global y que en un día nublado, la RFA es el 20% de la teórica (Ac):

$$N = \frac{Ac - 0.5R_g}{0.8Ac} \quad (7)$$

b_o es la tasa bruta de producción de materia seca para un cultivo de referencia hipotético ($\text{kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) en días completamente nublados, con dosel cubriendo por entero el terreno y una tasa máxima de producción de biomasa de $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$; b_c es la tasa bruta de producción de materia seca para un cultivo de referencia hipotético ($\text{kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) en días completamente despejados, con dosel cubriendo por entero el terreno y una tasa máxima de producción de biomasa de $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

El factor de corrección por cobertura incompleta del terreno (L) se calcula de la siguiente manera:

Si $IAF < 5$

$$L = 0.3424 + 0.9051 \text{Log}_{10}(IAF) \quad (8)$$

Si $IAF \geq 5$, entonces $L = 1$

Los valores de C_t se pueden calcular con la siguiente ecuación:

$$C_t = C_{30} (0.0044 + 0.0019 T + 0.0010 T^2) \quad (9)$$

Donde T es la temperatura media mensual del aire durante el ciclo del cultivo; C_{30} es la tasa de pérdida de producción de biomasa bruta por la respiración de mantenimiento a 30 °C (0.0108 para plantas no leguminosas, como en este caso).

La información bibliográfica sobre IC , N , IAF , ruta fotosintética, P_m , b_o , b_c y datos regionales sobre inicio y duración del ciclo del cultivo de café en México fueron obtenidos las publicaciones IIASA/FAO (2012) y De Wit (1965).

En cuanto a la información para el cálculo según el periodo referido en los escenarios de cambio climático para el final del siglo XXI ($j = 2075 - 2099$), se tomaron las siguientes consideraciones: El IC prácticamente no depende del cambio climático, por lo que no se considera cambio; asimismo, el IAF se considera sin cambio (Cure & Acock, 1986; Anthony & Ziska, 2000); la duración del ciclo del cultivo (N) se considera sin cambio, pues en la metodología no se consideran cambios para la fenología del cultivo de café debido a que no se cuenta con investigaciones referentes al tema en nuestro país; se asume que la transmisividad de la atmósfera no cambia de modo significativo debido a su propiedad diatérmica, por lo que los parámetros b_o y b_c permanecen sin cambio.

Estimación del índice de disponibilidad de agua en el suelo (INSHⁱ)

El índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricasⁱ se calculó a través del balance hídrico anual en la zona radical de tipo acumulativo; para ello se utilizó una escala mensual mediante la ecuación propuesta por Frère y Popov (1986):

$$INSH_i^j = INSH_{i-1}^j \left(\frac{DEF_i^j}{\sum_i NH_i^j} \right) * 100 \quad (10)$$

Donde $INSH_i^j$ es el índice de satisfacción de las necesidades hídricas en el mes i en el año j , es el Índice de Satisfacción de las Necesidades Hídricas para el mes anterior de ese mismo año; DEF_i^j es

el valor absoluto de la deficiencia de humedad en el mes i en el año j ; $\sum_{i=1}^n NH^i$ es la sumatoria de las necesidades hídricas del cultivo en el año j desde el mes i hasta el n , considerando su ciclo (270 días, del 15 de febrero al 15 de noviembre), en el cual la planta tiene su producción de biomasa (IIASA/FAO, 2012). Para el cálculo de los valores del $ISNH_i^j$ y DEF_i^j se ha considerado la evapotranspiración del cultivo (ETc_i^j) en el mes i del año j y la cantidad de agua que se infiltra en el suelo (Inf_i^j) en el mes i del año j .

Allen, Santos, Raes y Smith (2006) definen como necesidad de agua del cultivo (o necesidad hídrica, NH) a la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo (ETc). Para el caso que nos ocupa, el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ETc_i^j) se realizó con base en sus recomendaciones, utilizando mínimos datos climatológicos; la evapotranspiración de referencia (ET_o) se calculó por mes, utilizando el programa CROPWAT 8.0 (FAO, 2013), y posteriormente se multiplicó el valor obtenido por un valor coeficiente de transferencia $Kc = 1.1$ (Allen et al., 2006).

La cantidad de agua infiltrada fue obtenida por diferencia entre la precipitación y el escurrimiento superficial por mes (SARH, 1991; CNA, 2002); posteriormente se determinó la lámina de agua aprovechable almacenada y disponible para el cultivo con base en la textura de suelo y para una profundidad de 70 cm, la cual corresponde a la zona radical del café.

Desde luego existen cafetales que se encuentran bajo sombra, por lo que resulta necesario considerar si existe un efecto de reducción de la evapotranspiración a través de los cálculos pertinentes con datos bibliográficos sobre distribución de la radiación neta dentro o debajo de la copa de los árboles (Chang, 2001). Sin embargo, de acuerdo con observaciones experimentales sobre el cambio del microclima y de la productividad de café en el caso de la sombra (Siles, Harmand, & Vaast, 2010), se ha encontrado que si bien la temperatura de las hojas de café se reduce, también existe una competencia por el agua del suelo, dado como resultado final una producción de café similar para las condiciones

de cafetales a libre exposición y bajo sombra. Considerando que el objetivo principal de los cálculos era estimar el cambio relativo del rendimiento al final del siglo XXI ($Y^{2075-2099}$) como una fracción del rendimiento al inicio de este siglo (Y^{2000}), se estimaron los valores relativos $ISNH^{2075-2099} / ISNH^{2000}$, $ET^{2075-2099} / ET^{2000}$ y $P_r^{2075-2099} / P_r^{2000}$, concluyendo finalmente que se puede ignorar el efecto de la sombra y asumiendo además que la arquitectura de la vegetación cambiará significativamente con el tiempo.

Estimación del índice integral de fertilidad del suelo (F_a^j)

El índice integral de fertilidad agrícola (F_a^j) para el escenario base se ha calculado según la fórmula propuesta por Pegov y Jomyakov (1991), modificada por Nikolskii, Castillo-Álvarez, Bakhlaeva, Román-Calleros y Maslov (2006):

$$F_a^j = 0.46 \frac{MO}{MO_{\text{máx}}} + 0.28 \sqrt{\frac{P}{P_{\text{máx}}} \frac{K}{K_{\text{máx}}}} + 0.26 e^{-\left(\frac{pH-6}{2}\right)^2} \quad (11)$$

Donde F_a^j es la fertilidad del suelo (o agrícola) para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$); MO , K y pH son los valores modales de contenido de materia orgánica en el suelo, contenido de fósforo y potasio disponibles para el cultivo y de pH típicos para los suelos de cafetales con el mismo índice climático IHT para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2000$); $MO_{\text{máx}}$, $P_{\text{máx}}$ y $K_{\text{máx}}$ son los valores máximos observados de MO , P , K en los terrenos estudiados ($j = 2000$).

El valor F_a es adimensional, varía entre 1 y 0.1 y corresponde al suelo más fértil potencialmente; 0, al suelo completamente degradado e infértil. La ecuación (11) es útil porque utiliza la información limitada sobre algunas propiedades de suelos de la república mexicana disponible en los datos de INEGI (1988, 2004) e INIFAP (2012).

La estimación de la alteración de la fertilidad de los suelos al cambio climático está

basada en la Ley Geográfica de Zonificación del Suelo (Budyko, 1974; Volobuyev, 1974). De acuerdo con esta Ley, los valores modales regionales de algunas propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos vírgenes, geomorfológicamente homogéneos (con la misma topografía, condiciones geológicas e hidrogeológicas, textura y mineralogía del subsuelo y tiempo de formación) dependen principalmente del índice climático IHT^j típico para el escenario base a inicios del siglo XXI ($j = 2\ 000$), y para el final del siglo XXI ($j = 2\ 075 - 2\ 099$) (Volobuyev, 1974; Aydarov, 1985; Nikol'skii et al., 2006; Castillo et al., 2007).

En el cálculo del IHT^j , para el cálculo de la radiación neta (R_n), se empleó la ecuación (12) (Allen et al., 2006):

$$R_n = (1 - \alpha)R_s - R_{nl} \quad (12)$$

Donde α es albedo o coeficiente de reflexión del cultivo (adimensional), con un valor de 0.15 (Jaramillo & Gómez, 1989; Jaramillo, 2005); R_s y R_{nl} son la radiación solar entrante (o radiación global) y la radiación neta de onda larga, respectivamente, en el año j ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

Después se realizó una interpolación espacial de los valores de IHT para el escenario base ($j = 2\ 000$) para toda la zona cafetalera utilizando el método de Kriging con el software *ArcGis v.10* (ESRI, 2010).

Al establecer relación cuantitativa entre los valores modales de $F_a^{2\ 000}$ utilizando las bases existentes de los datos de la distribución actual de las propiedades de suelos vírgenes y de cafetales de México, en función del índice climático $IHT^{2\ 000}$, se puede suponer que según la Ley Geográfica de Zonificación del Suelo, debería conservarse dicha relación $F_a^{2\ 000}(IHT^{2\ 000})$ al final del siglo XXI, cuando los valores regionales del índice climático cambiarán hacia $IHT^{2\ 075-2\ 099}$, considerando que el cambio climático, en promedio anual, ocurre en forma bastante lenta como para conservar la relación $F_a^{2\ 000}(IHT^{2\ 000})$. Entonces, al conocer los valores $IHT^{2\ 075-2\ 099}$ para los sitios de referencia de producción de café, se

puede estimar cambio del factor de fertilidad en estos sitios $F_a^{2\ 075-2\ 099}$, utilizando la relación en la gráfica $F_a^{2\ 000}(IHT^{2\ 000})$.

La explicación esquemática de la relación existente entre la fertilidad y el IHT para presente y su posible cambio en un futuro se presenta en la figura 1.

El procedimiento para establecer la relación $F_a^{2\ 000}(IHT^{2\ 000})$ ha sido descrito en los trabajos de Nikolskii et al. (2001, 2006) y Contreras et al. (2002). Para el presente trabajo incluye principalmente las etapas siguientes:

1. Selección y sistematización de sitios geográficos y de los datos sobre las propiedades mencionadas de los suelos vírgenes y de cafetales de la república mexicana utilizando el conjunto de las cartas de INEGI (2004) e INIFAP (2012). En el presente trabajo, el procesamiento de la información edafológica fue automatizado a través del software *ArcGis 10.0*; para el análisis, se utilizó el continuo de elevaciones mexicano 3.0 (CEM 3.0), cuya resolución es de 15 m, y utilizando las bases de datos georreferenciadas sobre las propiedades de suelos de los pozos edafológicos (INEGI, 2004, 2013; INIFAP, 2012).
2. Procesamiento estadístico de los datos sobre las propiedades de los suelos y el índice de fertilidad, búsqueda de sus valores modales X y los intervalos de confianza $X \pm 2\sigma$ (donde σ corresponde a la desviación estándar de los logaritmos naturales de los valores parciales de cada propiedad) en cada uno de los intervalos establecidos en la escala del índice climático $IHT^{2\ 000}$. En las investigaciones previas fue establecido que la distribución estadística de cada propiedad tiene carácter lognormal (Nikolskii et al., 2001; Contreras et al., 2002).
3. Establecimiento de la(s) curva(s) $F_a^{2\ 000}(IHT^{2\ 000})$ de mejor ajuste a los valores modales de esta propiedad, utilizando el programa *CurveExpert 1.4* (Hyams, 2010), marcando además los intervalos de confianza.

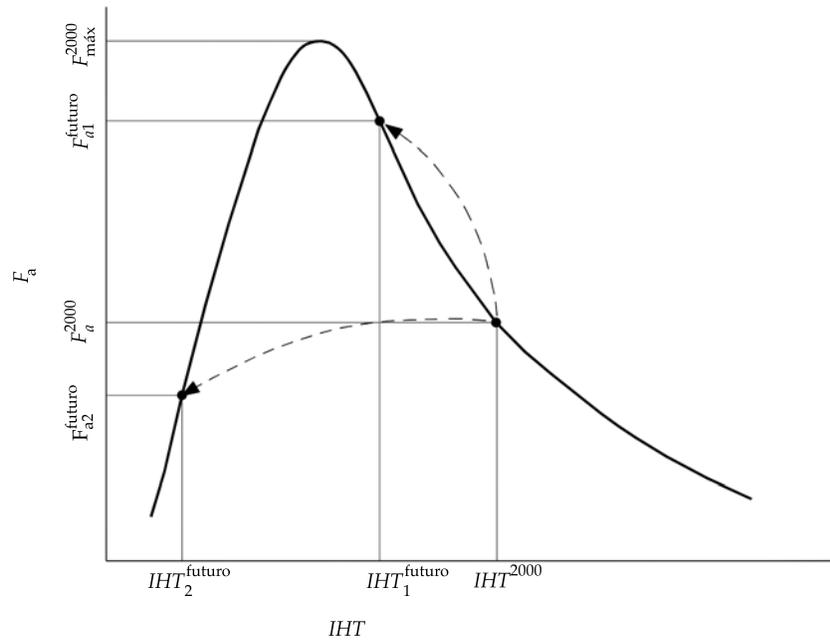


Figura 1. Esquema de predicción del cambio del índice integral de fertilidad del suelo F_a en una zona cafetalera de referencia en función del cambio del índice climático IHT en transcurso del siglo XXI. La gráfica $F_a(IHT)$ corresponde a la dependencia entre los valores modales regionales de F_a en función de los valores regionales promedio anuales de IHT al inicio del siglo XXI. IHT^{2000} y F_a^{2000} corresponden a un sitio de referencia en el inicio de este siglo. Los pares $IHT_1^{2075-2099}$ y $F_{a1}^{2075-2099}$ o $IHT_2^{2075-2099}$ y $F_{a2}^{2075-2099}$ corresponden a los escenarios posibles de cambio del índice climático ($IHT_1^{2075-2099}$ o $IHT_2^{2075-2099}$) en el mismo sitio de referencia al final del siglo XXI y a los valores respectivos del índice de fertilidad del suelo ($F_{a1}^{2075-2099}$ o $F_{a2}^{2075-2099}$).

4. Determinación del valor del índice climático $IHT^{2075-2099}$ en cada sitio de referencia y del valor del índice correspondiente de fertilidad $F_a^{2075-2099}$.

No se considera el efecto directo del aumento de la concentración creciente de CO_2 en la atmósfera a finales del siglo XXI sobre el cambio de contenido de materia orgánica y el índice de fertilidad debido a que no es significativo (Bazzaz & Sombroek, 1996; Knorr, Prentice, Holland, & House, 2005).

Por último, la estimación del cambio relativo en el rendimiento del cultivo de café al final del siglo XXI (ΔY , en %), producido para los escenarios seleccionados, se realizó con la siguiente ecuación:

$$\Delta Y = \left(\frac{Y_{\text{calc}}^{2075-2099} - Y_{\text{calc}}^{2000}}{Y_{\text{calc}}^{2000}} \right) 100$$

$$= \left(\frac{Y_{\text{máx}}^{2075-2099}}{Y_{\text{máx}}^{2000}} \frac{INSH^{2075-2099}}{INSH^{2000}} \frac{F_a^{2075-2099}}{F_a^{2000}} - 1 \right) 100 \quad (13)$$

También se ha estimado el cambio relativo de los componentes del rendimiento en el modelo: $\Delta Y_{\text{máx}}$, $\Delta INSH$ y ΔF_a , utilizado las siguientes ecuaciones:

$$\Delta Y = \left(\frac{Y_{\text{máx}}^{2075-2099} - Y_{\text{máx}}^{2000}}{Y_{\text{máx}}^{2000}} \right) 100 \quad (14)$$

$$\Delta Y = \left(\frac{INSH^{2075-2099} - INSH^{2000}}{INSH^{2000}} \right) 100 \quad (15)$$

$$\Delta Y = \left(\frac{F_a^{2.075-2.099} - F_a^{2.000}}{F_a^{2.000}} \right) 100 \quad (16)$$

Resultados y discusión

Con objeto de verificar la confiabilidad del modelo para pronosticar la productividad del café, se estableció una comparación entre la producción de café cereza promedio anual en el periodo 2003-2011 y media entre los municipios de estudio (SIAP, 2013).

La ecuación de regresión obtenida con el programa *Curve Expert 1.4* (Hyams, 2010) es:

$$\frac{Y_{real}^{2000}}{Y_{real\ máx}^{2000}} = 0.07 + 0.99 \frac{Y_{calc}^{2000}}{Y_{calc\ máx}^{2000}} \quad (17)$$

Donde Y_{real}^{2000} y Y_{calc}^{2000} son los rendimientos observado y calculado, respectivamente, como valores promedio anuales al principio del

siglo XXI en los sitios de referencia del estado de Veracruz; $Y_{real\ máx}^{2000} = 2\,471.1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $Y_{calc\ máx}^{2000} = 2\,059.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

La diferencia entre los valores $Y_{real\ máx}^{2000}$ y $Y_{calc\ máx}^{2000}$ puede explicarse por la ignorancia de varios factores en el proceso de cálculo de los rendimientos, como aspectos económicos y tecnológicos de manejo del cultivo, fluctuación diaria de las temperaturas del aire, riesgo de plagas y enfermedades, entre otros. Sin embargo, para nuestro análisis es importante comparar los rendimientos relativos, como fracción de los rendimientos máximos al final e inicio del siglo XXI. Debido a que existe una buena correlación entre los valores relativos $Y_{calc}^{2000} / Y_{calc\ máx}^{2000}$ y $Y_{real}^{2000} / Y_{real\ máx}^{2000}$ (figura 2), consideramos que las estimaciones sobre el cambio relativo de la productividad esperados en el futuro son confiables.

En la figura 3 se presenta la dependencia de los valores modales del índice de fertilidad del suelo F_a^{2000} , en función del índice climáti-

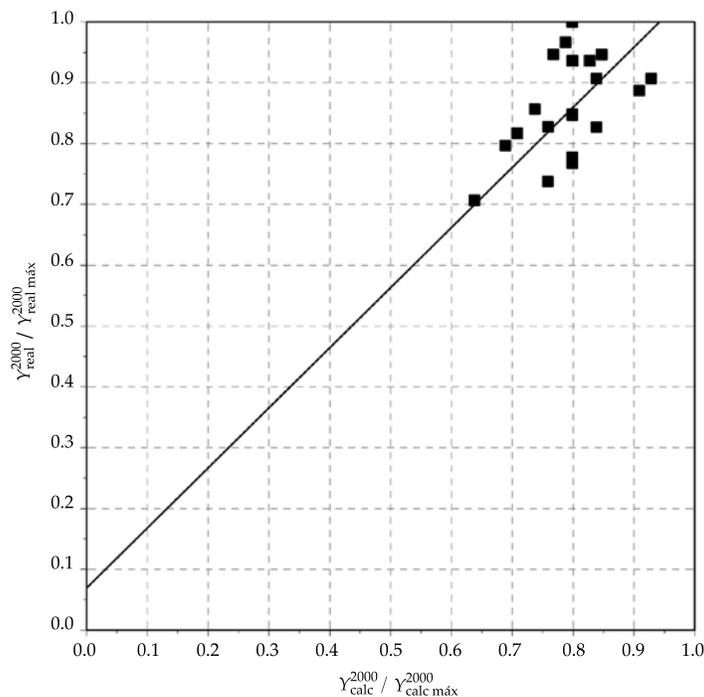


Figura 2. Comparación entre las fracciones de rendimientos observados y estimados con el modelo IIASA/FAO para condiciones de clima del periodo 2003-2011.

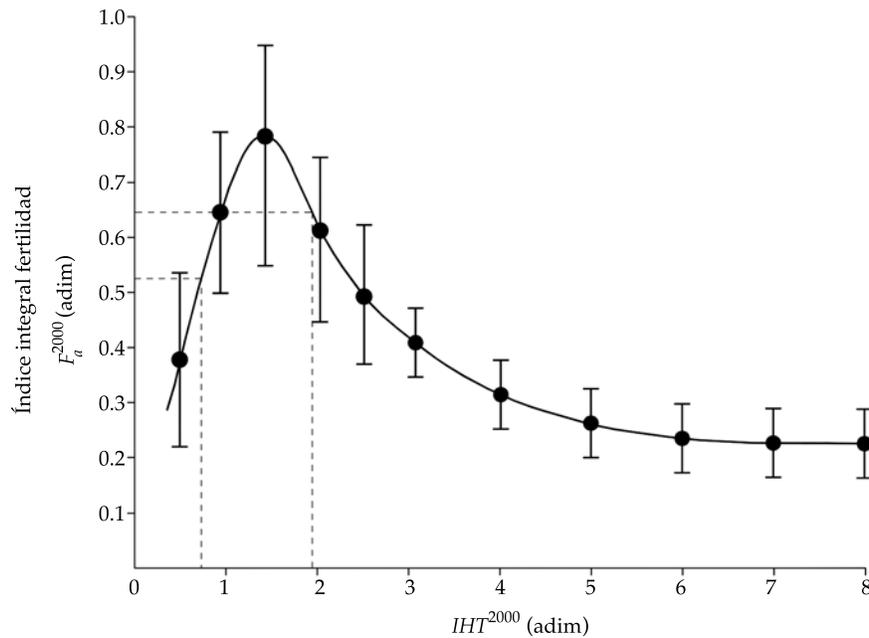


Figura 3. Dependencia de los valores modales del índice de fertilidad del suelo en función del índice climático típica para los suelos de cafetales del estado de Veracruz y los suelos vírgenes ubicados en diferentes zonas climáticas de México en terrenos planos y laderas con vegetación forestal y diferentes rangos de pendientes dentro del intervalo de 0 a 30%. También se muestran los intervalos de confianza $\pm 2\sigma$ de los valores modales con 95 de confiabilidad. Los suelos de cafetales del estado de Veracruz tienen los índices climáticos promedio anuales $0.73 \leq IHT^{2000} \leq 1.95$.

co IHT^{2000} , típica para los suelos de cafetales del estado de Veracruz y los suelos vírgenes ubicados en diferentes zonas climáticas de México en terrenos planos y laderas con vegetación forestal y diferentes rangos de pendientes dentro del intervalo de 0 a 30%. Asimismo, se muestran los intervalos de confianza $\pm 2\sigma$ de los valores modales con 95 de confiabilidad.

La comparación preliminar de forma de las gráficas F_a^{2000} (IHT^{2000}) en el ámbito regional para suelos de los cafetales del estado de Veracruz con las mismas gráficas para suelos vírgenes ubicados en terrenos planos y laderas con vegetación forestal y diferentes rangos de pendientes dentro del intervalo de 0 a 30% mostró que estas gráficas son similares. La distribución de los valores del índice de fertilidad F_a^{2000} para suelos de cafetales de Veracruz en función del IHT^{2000} está dentro de

rangos de variabilidad de los valores de F_a^{2000} para suelos vírgenes. Por esta razón, en la figura 3 se presenta una gráfica general de distribución. El objetivo de la presentación generalizada de la gráfica F_a^{2000} (IHT^{2000}) fue estimar con mayor seguridad el cambio relativo del índice de fertilidad F_a en suelos de cafetales de Veracruz, en función del cambio del índice climático IHT al final del siglo XXI.

Los suelos de cafetales estudiados del estado de Veracruz tienen los índices climáticos promedio anuales $0.73 \leq IHT^{2000} \leq 1.95$, que de acuerdo con la gráfica mostrada (figura 3) corresponden a los suelos bastante fértiles.

Con base en los escenarios de cambio climático, al final del siglo XXI se espera un incremento promedio anual en la temperatura de 11 a 25% (de 2 a 4 °C), una disminución de 10% en la precipitación (de 100 a 250 mm año⁻¹), en función del escenario y el sitio de referencia,

Cuadro 2. Cambio estimado del rendimiento del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) (ΔY_{calc}) y de sus componentes ($\Delta Y_{\text{máx}}$, $\Delta INSH$ y ΔF_a) en las regiones cafetaleras del centro del Estado Veracruz al final del siglo XXI (en periodo de 2075 a 2099) considerando escenarios de cambio climático desarrollado por los modelos GFDL CM3, HADGEM2 y MPI ESM LR para dos 2 trayectorias de crecimiento de la concentración de CO₂ en la atmósfera al final de este siglo: hasta 650 ppm y 1370 ppm.

Región cafetalera	Modelo climático	RCP 4.5					RCP 8.5				
		$\Delta Y_{\text{máx}}$ (%)	$\Delta INSH$ (%)	ΔF_a (%)	ΔY_{calc} (%)	φF (%)	$\Delta Y_{\text{máx}}$ (%)	$\Delta INSH$ (%)	ΔF_a (%)	ΔY_{calc} (%)	φF (%)
Atzalán	GFDL CM3	-2.19	-4.57	5.54	-12.59	35.88	-6.15	-4.39	7.85	-17.89	35.31
	HADGEM2	-2.38	-8.86	5.14	-15.14	31.50	-6.91	-3.36	5.94	-11.94	20.76
	MPI ESM LR	-1.34	-0.80	1.70	-9.50	42.82	-4.35	-0.77	3.65	-11.75	30.07
Coatepec	GFDL CM3	-5.75	-12.20	0.28	-25.71	38.78	-9.84	-14.18	-0.45	-33.65	36.38
	HADGEM2	-5.99	-14.51	0.96	-25.94	37.17	-10.37	-11.94	1.70	-25.55	30.53
	MPI ESM LR	-4.12	-9.49	2.69	-20.54	35.63	-8.04	-10.31	0.99	-24.63	28.7
Córdoba	GFDL CM3	-0.94	-7.38	-0.68	-18.86	38.79	-5.21	-5.88	3.14	-21.98	35.07
	HADGEM2	-1.19	-10.53	-0.82	-20.17	36.01	-5.91	-11.12	1.64	-21.36	17.2
	MPI ESM LR	0.68	-5.99	-4.51	-16.19	34.81	-3.49	-5.99	0.82	-17.69	19.37
Huatusco	GFDL CM3	-9.10	-9.13	1.96	-25.03	21.97	-11.39	-12.10	2.29	-31.57	24.73
	HADGEM2	-7.57	-10.87	1.90	-23.62	24.03	-11.94	-11.74	3.53	-25.49	11.64
	MPI ESM LR	-5.74	-6.52	1.57	-17.76	11.79	-9.63	-6.95	1.96	-22.74	14.34
Misantla	GFDL CM3	-4.76	-2.14	4.64	-13.30	14.51	-9.15	-6.00	4.76	-23.73	8.17
	HADGEM2	-4.85	-14.24	4.64	-22.31	7.27	-9.85	-1.58	4.60	-14.56	22.51
	MPI ESM LR	-3.67	-0.44	3.11	-10.41	39.68	-6.42	-0.42	4.64	-12.37	34.82
Tezonapa	GFDL CM3	-9.34	-10.39	14.75	-16.90	14.04	-14.40	-10.39	18.03	-23.06	16.31
	HADGEM2	-9.59	-12.99	13.11	-18.89	18.66	-16.36	-14.29	16.39	-22.67	0.88
	MPI ESM LR	-7.81	-9.09	9.84	-14.66	8.43	-11.92	-9.09	14.75	-17.20	0.51

Nota: φF es error potencial en predicción de la productividad de café en caso de ignorar el factor de alteración de fertilidad del suelo debido al cambio climático.

y un incremento en la radiación global de 4 a 10% (de 200 a 400 Mj m⁻² año⁻¹).

En el cuadro 2 se presentan los resultados esperados de cambio mediante la modelación con la información relativa al cambio climático; la información presenta las estimación de cambio relativo de los rendimientos (ΔY_{calc}) y de los componentes de la productividad ($\Delta Y_{\text{máx}}$, $\Delta INSH$ y ΔF_a) del cultivo de café (*Coffea arabica* L), para finales del siglo XXI (periodo 2075-2099).

El análisis de la información contenida en el cuadro 2 señala que el cambio estimado de la productividad de café (ΔY_{calc}) al final del siglo XXI depende del escenario de cambio climático y de las trayectorias de crecimiento de la concentración de CO₂ en la atmósfera. Se espera que la productividad de café al final del siglo XXI sea

menor a la actual, con pérdidas desde un 10% hasta 34%. Se puede notar que los resultados de estimación de vulnerabilidad de café al cambio climático pronosticado por diferentes modelos tienen diferencia por lo general entre 30%.

La mayor vulnerabilidad del cultivo de café (*Coffea arabica* L) al cambio climático se espera en las regiones de Coatepec y Huatusco, donde se estima una disminución de la productividad ΔY de 25 a 30%, encontrándose que el mayor impacto sobre el cambio de la productividad corresponde a la deficiencia de agua para desarrollo del cultivo. El cambio esperado del índice de satisfacción de las necesidades hídricas ($\Delta INSH$) debido a disminución de precipitación y crecimiento de la evapotranspiración en algunas regiones se estima de 10 a 15%, mientras que

la productividad máxima potencial relacionada con crecimiento de la temperatura y de la radiación solar se espera menor que la actual en las mismas regiones de 2 a 6%.

El análisis señala que el cambio climático va a causar una alteración de fertilidad del suelo; el índice integral de fertilidad (F_a) va a cambiar, situándose estos cambios entre disminución hasta 5% y aumento hasta 15%, en función de la región; concentración de CO_2 en la atmósfera y el clima correspondiente.

El error potencial en predicción del cambio de la productividad de café (ϕF) en caso de ignorar el factor de alteración de fertilidad del suelo debido al cambio climático se ha estimado con la fórmula siguiente:

$$\phi F = \left(\frac{\Delta Y_{calc}^{2075-2099}(\text{con } F_a) \Delta Y_{calc}^{2075-2099}(\text{sin } F_a)}{\Delta Y_{calc}^{2075-2099}(\text{con } F_a)} \right) 100 \quad (18)$$

Donde $\Delta Y_{cal}^{2075-2099}(\text{con } F_a)$ es el valor de cambio de la productividad estimada, tomando en cuenta la fertilidad en el modelo y $\Delta Y_{cal}^{2075-2099}(\text{sin } F_a)$ es el valor de cambio de la productividad estimada, sin tomar en cuenta la fertilidad en el modelo.

Las estimaciones señalan que en caso de ignorar el factor de alteración de fertilidad del suelo F_a debido al cambio climático se puede causar error en los cálculos de los rendimientos de café al final del siglo XXI hasta 50% o aun hasta cambio del signo de ΔY , lo que significa que este factor no debería ser ignorado.

Conclusiones

1. Se estima que la productividad de café cereza (*Coffea arabica* L.) en la parte central del estado de Veracruz al final del siglo XXI va a reducirse entre un 10 y 34%, en función de la región cafetalera, trayectorias de crecimiento de la concentración de CO_2 en la atmósfera y modelo que predice escenario del cambio climático.

2. La mayor vulnerabilidad del cultivo de café al cambio climático se tiene en las regiones de Coatepec y Huatusco de este estado.
3. El análisis de vulnerabilidad de los componentes para la estimación de la productividad del cultivo del café: rendimiento potencial ($Y_{m\acute{a}x.}$), índice de satisfacción de las necesidades hídricas (*INSH*), e índice integral de fertilidad (F_a), demostró que cada uno ejerce influencia en el valor total de la producción estimada y son imprescindibles para determinar con un mayor grado de confiabilidad la variabilidad de la producción ante los escenarios de cambio climático.
4. La ignorancia del factor de alteración de fertilidad del suelo debido al cambio climático puede causar error en las predicciones de la productividad de café al final del siglo XXI de hasta 40%, lo que significa que este factor no debe ser ignorado.

Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias con sede en Xalapa, Veracruz; en especial al doctor Gabriel Díaz Padilla, por facilitarnos la información relativa a las propiedades de suelo muestreadas en zonas cafetaleras del estado de Veracruz.

Referencias

- Allen, G. R., Santos, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (298 pp.). Riego y Drenaje 56. Roma: FAO.
- Anthony, E. H., & Ziska, L. H. (January, 2000). Crop Breeding Strategies for the 21st Century. *Journal of Experimental Botany*, 51(342), 1-8.
- Aydarov, I. P. (1985). *Manejo de los regímenes hídrico, salino y de nutrientes en suelos bajo riego* (en ruso) (204 pp.). Moscú: Ed. Agropromizdat.
- Bazzaz, F. & Sombroek, W. (Eds.). (1996). *Global Climate Change and Agricultural Production Direct and Indirect Effects of Changing Hydrological, Pedological and Plant Physiological Processes* (146 pp.). Rome: FAO.
- Budyko, M. (1974). *Climate and Life* (508 pp.). New York: Publ. Academic Press.

- Bunn, C., Ovalle-Rivera, O., Laderach, P., Mosnier, A., Obersteiner, M., & Kirschke, D. (2013). *The Utility of an Agroecological Niche Model of Coffee Production for Future Change Scenarios*. Impacts World 2013, International Conference on Climate Change Effects, May 27-30, Potsdam, Brandenburg, Germany.
- Caballero, M., Lozano-García, S., Vázquez-Selem, L., & Ortega, B. (2010). Evidencias de cambio climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del centro de México durante el último máximo glacial. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3), 359-377.
- Camargo, M. B. P. (2010). The Impact of Climatic Variability and Climate Change on Arabica Coffee Crop in Brazil. *Bragantia*, 69(1), 239-247.
- Castillo, A. M., Nikolskii, I., Ortiz, C., Vaquera, H., Cruz, G., Mejía, E., & González, A. (junio, 2007). Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad agrícola. *Interciencia*, 32(6), pp. 368-376.
- Cavazos, T., Salinas, J. A., Martínez, B., Colorado, G., De Grau, P., Prieto-González, R., Conde-Álvarez, A. C., Quintanar-Isaías, A., Santana-Sepúlveda, J. S., Romero-Centeno, R., Maya-Magaña, M. E., Rosario de la Cruz, J. G., Ayala-Enríquez, Ma. del R., Carrillo-Tlazazanatz, H., Santiesteban, O., & Bravo, M. E. (2013). *Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. Informe Final del Proyecto al INECC* (150 pp.). México, DF: INECC.
- Chang, J. H. (2001). *Climate and Agriculture: An Ecological Survey* (304 pp.). Chicago: Transaction Publisher.
- CNA (17 de abril, 2002). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. Conservación del recurso agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. *Diario Oficial de la Federación*, México, D.F.
- Contreras, B. A., Nikolskii, I., Aceves, L., Arteaga, R., Escalona, M., & Fernández, D. (mayo-junio, 2002). Pronóstico del cambio en algunas propiedades de los suelos agrícolas al modificarse las condiciones microclimáticas. *Agrociencia*, 36(3), 267-277.
- Contreras, H. A. (septiembre-diciembre, 2010). Los cafetales de Veracruz y su contribución a la sustentabilidad. *Estudios Agrarios*, 16(45), 143-161.
- Cure, J. D., & B. Acock (1986). Crop Responses to Carbon Dioxide Doubling: A Literature Survey. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38(1), 127-145.
- Davis, A. P., Gole, T. W., Baena, S., & Moat, J. (November, 2012). The Impact of Climate Change on Indigenous Arabica Coffee (*Coffea arabica*): Predicting Future Trends and Identifying Priorities. *PLoS ONE*, 7(11), 1-13.
- De Wit, C. T. (1965). Photosynthesis of Leaf Canopies. *Agricultural Research Reports*, 663, 1-56.
- ESRI (2010). *ArcGis. An Easy Mapping and Geographic Analysis Platform (Computer Program), Version 10*. Redlands, USA: Environmental Systems Research Institute.
- FAO (2013). *CROPWAT 8.0 for Windows (Computer Program)*. Rome: Natural Resources and Environment Department.
- Fernández, E. A., Zavala, H. J., & Romero, C. R. (2014). *Atlas Climático Digital de México. Ejemplos de modelos y escenarios de la 5ª Comunicación Nacional de México para la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático*. Recuperado de http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/Docs/f_escenarios.html#ModelosGlobales5ta.
- Fontagro (2011). *Sensibilidad y adaptación del café al cambio climático en Centroamérica (CafAdapt)*. San José, Costa Rica: Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria.
- Frère, M., & Popov, G. F. (1986). *Pronóstico agrometeorológico del rendimiento de los cultivos* (194 pp.). Roma: FAO.
- Heakin, H., Gay C., Estrada, F., & C. Conde (2004). Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura: escenarios de producción de café para el 2050 en Veracruz (México) (pp. 651-660). En L. C. Diego, C. J. C. García, A. D. F. Rasilla, H. P. F. Fernández de Arroyabe, & P. C. Garmendia (Coords.). *El clima entre el mar y la montaña*. IV congreso de la Asociación Española de Climatología, Santander, España.
- Gonzalez, E. M., Jurado, E., González, E. S., Aguirre, C. O., Jiménez, P. J., & Navar, J. (julio-septiembre, 2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia UANL*, 6(3), 377-385.
- Haggan, J., & Schepp, K. (2012). *Coffee and Climate Change. Impacts and Options for Adaption in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam* (50 pp.). NRI Working Paper Series: Climate Change, Agricultura and Natural Resources No. 4. Publ. Greenwich, UK: University of Greenwich.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (December, 2005). Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978.
- Hyams, D. A. (2010). *Comprehensive Curve Fitting System for Windows (Computer Programme). Version 1.4*. San Francisco, USA: Microsoft Corp.
- IIASA/FAO (2012). *Global Agro-Ecological Zones (GAEZ v3.0)*. Rome: IIASA Publ./FAO.
- INEGI (1988). *Conjunto de las cartas de topografía, geología, uso de suelo y edafología (escala 1:250 000 y 1:50 000) de la República Mexicana*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI (2004). *Información Nacional sobre Perfiles de Suelo. Ver. 1.2* (24 pp.). Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI (2013). *Continuo de elevaciones mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. México, DF: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INIFAP (2012). *Muestreo de las propiedades del suelo en zonas cafetaleras de Veracruz*. Xalapa, México: INIFAP Campo Experimental.
- Jacoby, G. C., & D'Arrigo, R. D. (August, 1997). Tree Rings, Carbon Dioxide, and Climatic Change. *Proceedings of the*

- National Academy of Sciences of the United States of America*, 94(16), 8350-8353.
- Jaramillo, R. A., & Gómez, G. L. (julio-septiembre, 1989). Microclima en cafetales a libre exposición solar y bajo sombrero. *Cenicafé* (Colombia), 40(3), 65-79.
- Jaramillo, R. A. (septiembre, 2005). La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 29(112), 371-382.
- Jaramillo, J., Muchugu, E., Vega, F. E., Davis, A., Borgemeister, Ch., & Chabi-Olaye, A. (September, 2011). Some Like it Hot: The Influence and Implications of Climate Change on Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) and Coffee Production in East Africa. *PLoS ONE*, 69(9), 1-14.
- Knorr, W., Prentice, I., Holland, E., & House, J. (2005). Long-Term Sensitivity of Soil Carbon Turnover to Warming. *Nature*, 433(7023), 298-301.
- Laderach, P., Lundy, M., Jarvis, A., Ramirez, J., Perez-Portilla, E., Schepp, K., & Eitzinger, A. (2011). Predicted Impact of Climate Change on Coffee-Supply Chains (pp. 703-723). In F. W. Leal (Ed.). *The Economic, Social and Political Elements of Climate Change*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Lin, B. B., Perfecto, I., & Vandermeer, J. (octubre de 2008). Synergies between Agricultural Intensification and Climate Change could Create Surprising Vulnerabilities for Crops. *BioScience*, 58(9), 847-854.
- López, M. R., Díaz, P. G., & Martínez, R. J. (2007). *Potencial productivo y tipología de productores de café en la zona centro del estado de Veracruz* (25 pp.). México, DF: INIFAP.
- Magaña, R. V. O. (2004). El cambio climático global: comprender el problema (2004). En *Cambio climático: una visión desde México* (525 pp.). México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología.
- Mann, M. E., Bradley, R. S., & Hughes, M. K. (April, 1998). Global-Scale Temperature Patterns and Climate Forcing over the Past Six Centuries. *Nature*, 392, 779-787.
- Mann, M. E., Bradley, R. S., & Hughes, M. K. (March, 1999). Northern Hemisphere Temperatures during the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations. *Geophysical Research Letters*, 26(6), 759-762.
- Moguel, P., & Toledo, V. M. (febrero, 1999). Conservación de la biodiversidad en los tradicionales sistemas de café de México. *Biología de la Conservación*, 13(1), 11-21.
- Nikolskii, G. I., Bakhlaeva, O., Contreras, A., & Ordaz, V. (2001). Assessment of Changes in Soil Properties as Dependent on Hydrotermic Conditions of Plowlands (by the Example of Mexico). *Eurasian Soil Science*, 35(10), 1031-1036.
- Nikolskii, Y. U. N., Castillo-Álvarez, M., Bakhlaeva, O. S., Román-Calleros, X. A., & Maslov, B. S. (2006). The Influence of the Possible Global Climate Change on the Properties of Mexican Soils. *Eurasian Soil Science*, 39(11), 1164-1169.
- Paavola, J. (November, 2008). Livelihoods, Vulnerability and Adaptation to Climate Change in Morogoro, Tanzania. *Environmental Science & Policy*, 11(7), 642-654.
- Pegov, S. A., & Jomyakov, P. (1991). *Modelación del desarrollo de los sistemas ecológicos* (en ruso) (223 pp.). San Petersburgo, Rusia: Ed. Hidrometeoizdat.
- Rivera-Silva, M. R., Nikolskii-Gavrilov, I., Castillo-Álvarez, M., Ordaz-Chaparro, V. M., Díaz-Padilla, G., & Guajardo-Panes, R. A. (octubre-diciembre, 2013). Vulnerabilidad de la producción del café (*Coffea arabica* L.) al cambio climático global. *Terra Latinoamericana*, 31(4), 305-313.
- Rodney, M. J. J. N., & Freddy, H. J. R. (2002). Análisis de tendencia de series de tiempo oceanográficas y meteorológicas para determinar evidencias de cambio climático en la costa del Ecuador. *Acta oceanográfica del Pacífico*, 11(1), 17-21.
- SMN (2013). *Normales climatológicas* [en línea]. México, DF: Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua. Citado el 18 de marzo de 2013. Recuperado de http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=164:veracruz&catid=14&Itemid=2.
- SARH (1991). *Manual de conservación del suelo y agua. Instructivo* (33 pp.). (3a ed.). Chapingo, México: SARH.
- SIAP (2013). *Proyecciones para el sector agropecuario en México* [en línea]. México, DF: SAGARPA, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Citado el 6 de marzo de 2013. Recuperado de <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>.
- Siles, P., Harmand, J. M., & Vaast, P. (March, 2010). Effects of *Inga densiflora* on the Microclimate of Coffee (*Coffea arabica* L.) and Overall Biomass under Optimal Growing Conditions in Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 78(3), 269-286.
- Terrazas, M. L., Nikolskii, G. I., Herrera, G. S., Castillo, A. M., & García, E. A. (enero-marzo, 2010). Alteración de la fertilidad del suelo y vulnerabilidad de maíz y trigo bajo riego debido al cambio climático. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(1), 87-102.
- Van Der Vosen, H. A. M. (October, 2005). A Critical Analysis of the Agronomic and Economic Sustainability of Organic Coffee Production. *Experimental Agriculture*, 41(4), 449-473.
- Villers, L., Arizpe, N., Orellana, R., Conde, C., & Hernández, J. (mayo, 2009). Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interiencia*, 34(5), 322-329.
- Volobuev, V. R. (1974). *Introducción a la energía de formación de suelos* (127 pp.) (en ruso). Moscú: Nauka Publ.

Dirección institucional de los autores

M. en C. Juan Gabriel Brigido

Colegio de Postgraduados
Programa de Hidrociencias
kilómetro 36.5 de la carretera México-Texcoco
56230 Montecillo, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1175
Fax: +52 (595) 9520 237
brigido.juan@colpos.mx

Dr. Iouri Nikolskii

Profesor-investigador titular
Colegio de Postgraduados
Programa de Hidrociencias
kilómetro 36.5 de la carretera México-Texcoco
56230 Montecillo, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1175
Fax: +52 (595) 9520 237
nikolski@colpos.mx

M.C. Liliana Terrazas

Colegio de Postgraduados
Programa de Hidrociencias
kilómetro 36.5 de la carretera México-Texcoco
56230 Montecillo, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1175
Fax: +52 (595) 9520 237
termely@colpos.mx
M.C. Sergio Santiago Herrera

Colegio de Postgraduados
Programa de Hidrociencias
kilómetro 36.5 de la carretera México-Texcoco
56230 Montecillo, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1175
Fax: +52 (595) 9520 237
hserch@colpos.mx