

Áreas potenciales y vulnerabilidad del cultivo de café tipo robusta (*Coffea canephora* P.) al cambio climático en el estado de Tabasco, México

Potential areas and vulnerability of the robust coffee crop (*Coffea canephora* P.) to climate change in the state of Tabasco, Mexico

Lorenzo Armando Aceves Navarro¹, Benigno Rivera Hernández², Antonio López Castañeda², David Jesús Palma López¹, Rigoberto González Mancillas³ y José Francisco Juárez López¹

Palabras Clave: zonificación agroecológica; áreas muy aptas; rendimiento potencial; impacto del cambio climático

Keywords: agro-ecological zoning; very apt areas; potential yield; impact of climate change

Recepción: 12-02-2018 / Aceptación: 17-04-2018

Resumen

El gobierno federal a través de la Dirección General de Zonas Tropicales de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), ha venido impulsando la apertura de 20,000 ha del cultivo de café robusta en los estados del sur-sureste. Como parte de esa iniciativa se realiza el presente estudio para determinar en qué áreas del estado de Tabasco este tipo de café puede prosperar exitosamente y cuáles serían los impactos del cambio climático a mitad del siglo XXI, en su adaptación y rendimiento. Así, el objetivo del presente estudio fue: determinar las mejores áreas desde el punto de vista de clima y suelo, para cultivar café tipo robusta (*Coffea canephora* P.) en el estado de Tabasco y su posible vulnerabilidad al cambio climático a mediados del presente siglo. Lo anterior se realizó utilizando la metodología de Zonificación Agro-Ecológica (ZAE) propuesta por la FAO para las condiciones actuales y para el escenario de cambio climático (RCP8.5), esperado a mediados del siglo XXI. Asimismo, se estimaron los rendimientos potenciales para tres niveles de insumo (bajo, medio y alto) en las áreas resultantes muy aptas, para ambas condiciones climáticas. Los resultados indican que de ocurrir un incremento promedio diario de 1.6 °C para el año 2050, bajo el peor escenario (RCP8.5), la superficie muy apta para cultivar café tipo robusta en el estado de Tabasco no se modifica. En cambio, los rendimientos potenciales promedio disminuirán en 41 % para el año 2050, debido al efecto del incremento de las temperaturas diurnas sobre la tasa fotosintética máxima.

¹Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, México

²Universidad Popular de la Chontalpa, México. E-mail: brivera@colpos.mx

³Instituto Tecnológico de Torreón, México

© Universidad De La Salle Bajío (México)

Abstract

The federal government, through the General Direction of Tropical Zones of the Secretariat of Agriculture, Livestock, Rural Development, Fisheries, and Food (SAGARPA), has fostered the creation of 20,000 ha of Robusta coffee crops in the south-southeast states. As part of this initiative, the present study is done to determine what areas of the state of Tabasco are better suited for this type of coffee to prosper successfully and what the future impacts of climate change mid XXI century would be on its adaptation and yield. Thus, the objective of the present study was to determine the best areas, from the point of view of climate and soil, to grow Robusta coffee (*Coffea canephora* P.) in the state of Tabasco, as well as its vulnerability to a possible climate change in the middle of the present century. This was done using the Agro-Ecological Zoning methodology (AEZ) proposed by the FAO for the current conditions and for the worst-case scenario of climate change (RCP8.5) expected for mid XXI century. Also, the potential yields for three levels of input (low, medium, and high) were estimated in the areas that resulted to be very apt for both climatic conditions. The results indicate that if there were to be a mean daily increase in temperature of 1.6 °C by the year 2050, under the worst-case scenario (RCP8.5), the very apt surface to grow Robusta coffee in the state of Tabasco is not modified. However, the mean potential yields would decrease by 41% by the year 2050 due to the effect of the increase in daytime temperatures on the maximum photosynthetic ratio.

Introducción

En México el 97 % de la producción de café se obtiene de la especie *arábica* y sólo el 3% de la producción corresponde a la especie *canephora*, mejor conocida como robusta (AMECAFE, 2012). En Tabasco actualmente no se cultiva café tipo robusta. Sin embargo, el gobierno federal de México a través del programa del Trópico Húmedo (hoy Dirección General de Zonas Tropicales) de la SAGARPA, tiene dentro de sus planes de desarrollo impulsar la apertura de 20,000 ha de café robusta en los estados del sur-sureste de México, con el objetivo de sustituir los 500,000 quintales que de esta variedad importa la industria para el procesamiento de café soluble, lo cual representa 1,500 millones de pesos anuales. Para el año de 2012, el programa del Trópico Húmedo reportó que ya se tenía un avance de 3,600 hectáreas en los estados de Chiapas y Veracruz y que, aunque el café robusta tiene la mitad de precio que el *arábica*, sus rendimientos en cereza son mayores a

2,760 kg ha⁻¹ que lo hacen atractivo como alternativa productiva (SAGARPA, 2014). Por su parte el Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias ya cuenta con clones altamente productivos (Méndez *et al.*, 2014) y con el paquete tecnológico correspondiente (Méndez, 2014).

El programa del Trópico Húmedo de la SAGARPA, tiene dentro de sus estrategias y planes apoyar el establecimiento de nuevas superficies de café robusta en el estado de Tabasco en áreas con una altitud menor a 600 m, que es la mayoría de la superficie del estado (AMECAFE, 2014; SAGARPA, 2014). Es importante señalar que experimentos del INIFAP en la estación de Rosario Izapa, Chiapas, con clones mejorados de café robusta y sin sombra, reportan rendimientos entre 7.9 a 9.2 kg árbol⁻¹ año⁻¹, entre el tercer y cuarto año de edad, que equivale a rendimientos entre 5.7 a 7.7 t ha⁻¹ de café cereza al año, que serán utilizados en el programa que impulsa la SAGARPA (Méndez, 2014). Los clones superan ampliamente los rendimientos reportados para el estado de Chiapas con café arábica.

La introducción de un cultivo o nueva variedad en una zona donde nunca se ha cultivado requiere de estudios de zonificación que permitan determinar las mejores áreas para el éxito de su introducción. La Zonificación Agro-Ecológica (ZAE) propuesta por la FAO, es un procedimiento que permite ubicar las áreas medianamente aptas, aptas y muy aptas para un determinado cultivo (FAO, 1981) con base en combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas, así como por un complejo número de factores socio-económicos, culturales y tecnológicos, y que en la actualidad se sigue aplicando en diversos países (Agrell *et al.*, 2004; van Wart *et al.*, 2013; Tian *et al.*, 2014; Niggol *et al.*, 2014; Bunn *et al.*, 2015) productores de café.

Sin embargo, actualmente no solo es necesario determinar las áreas muy aptas y los rendimientos potenciales máximos para el presente, sino también para escenarios futuros. El incremento en la temperatura promedio diaria anual que se espera en el transcurso del siglo XXI debido al cambio climático, puede afectar el establecimiento y productividad del café (Camargo, 2010).

Estudios realizados sobre el incremento de la temperatura por efecto del cambio climático, muestran que el cultivo de *Coffea arabica*, sufrirá una importante redistribución geográfica en México y en otros países productores del mundo (Zullo *et al.*, 2006; Schroth *et al.*, 2009; Davis *et al.*, 2012; Hagggar y Schepp, 2012; Ovalle-Rivero *et al.*, 2015; y Bunn *et al.*, 2015a). Los impactos

negativos del cambio climático serán más altos en latitudes y altitudes bajas en los países productores de café (Gay *et al.*, 2006; Bunn *et al.*, 2015b).

En Tabasco actualmente, existen 121,643.39 ha para cultivar café tipo arábica (*Coffea arabica* L), con muy alto potencial productivo. Sin embargo, la superficie (año 2015) disminuirá en 92.46 % de acuerdo al escenario A2, (hoy RCP8.5) que reporta el IPCC (2014), y los rendimientos potenciales (año 2015) tendrían una reducción promedio del 67% con respecto al año 2050 (Aceves-Navarro *et al.*, 2018). Lo anterior indica lo susceptible que sería este tipo de café al cambio climático en el Estado de Tabasco, por lo que es necesario investigar qué tipo de café tiene mayor rango de adaptabilidad a los incrementos de temperatura y disminución de la precipitación. Se ha reportado que el café tipo robusta tiene un mayor rango de adaptabilidad de temperatura y precipitación comparado con el café tipo arábica (ECOROP, 2014) y mayor resistencia a la roya naranja del café (Méndez, 2011).

El consumo *per cápita* de café en México es de 1.41 kg persona⁻¹ (año 2015), y se estima que para el año 2020 el consumo de café se incremente a una tasa anual del 2.4% (LTD, 2017) y a nivel mundial el incremento será de 2% (FIRA, 2016). Por otra parte la USDA (2016), estima que la producción de café en México disminuya a una tasa anual de 8%, y que los principales factores que explican la disminución de la producción nacional durante la década reciente son la disminución de la superficie cosechada y la reducción de la productividad de los cafetales, relacionada principalmente con la avanzada edad de las plantaciones, afectaciones climatológicas (cambio climático) y por la roya naranja del café.

El café robusta es poco comercializable en los sectores de distribución (institucionales, servicios alimenticios, retail) por ser considerado de baja calidad (LTD, 2017). Sin embargo, en México existe casi medio millón de tiendas de abarrotes o changarros (conocidas popularmente), que juntas representan un volumen importante de café, donde se pueden comercializar (LTD, 2017). Por otra parte, se sabe que el consumo de café varía por la economía o nivel de desarrollo de la región, ciudad o zona; es decir, los consumidores con ingresos más bajos continúan optando por café de bajo precio como el robusta (Flores, 2015; LTD, 2017).

En el caso del café tipo robusta (*Coffea canephora* P), son escasos los estudios sobre el impacto del cambio climático sobre su adaptabilidad y rendimiento. Debido a lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo determinar la ubicación actual de las áreas muy aptas para cultivar café tipo robusta en el estado de Tabasco y que tan vulnerable sería en su adaptabilidad

para el año 2050, bajo el escenario de cambio climático (A2, hoy RCP8.5). Así como estimar los rendimientos potenciales actuales y futuros, para determinar el impacto que el cambio climático ocasionaría. Esto se realizó utilizando la metodología de Zonificación Agro-Ecológica propuesta por la FAO (FAO, 1981).

Método

Localización del área de estudio

El Estado de Tabasco se ubica entre los 17°15' 00'' y 18°39' 00'' de Latitud Norte; y los 91°00' y 94°17' de Longitud Oeste (INEGI, 2014). Limita al norte con el Golfo de México, al este con el estado de Campeche y la República de Guatemala; al sur con el estado de Chiapas y la República de Guatemala y al oeste con Veracruz (Figura 1).

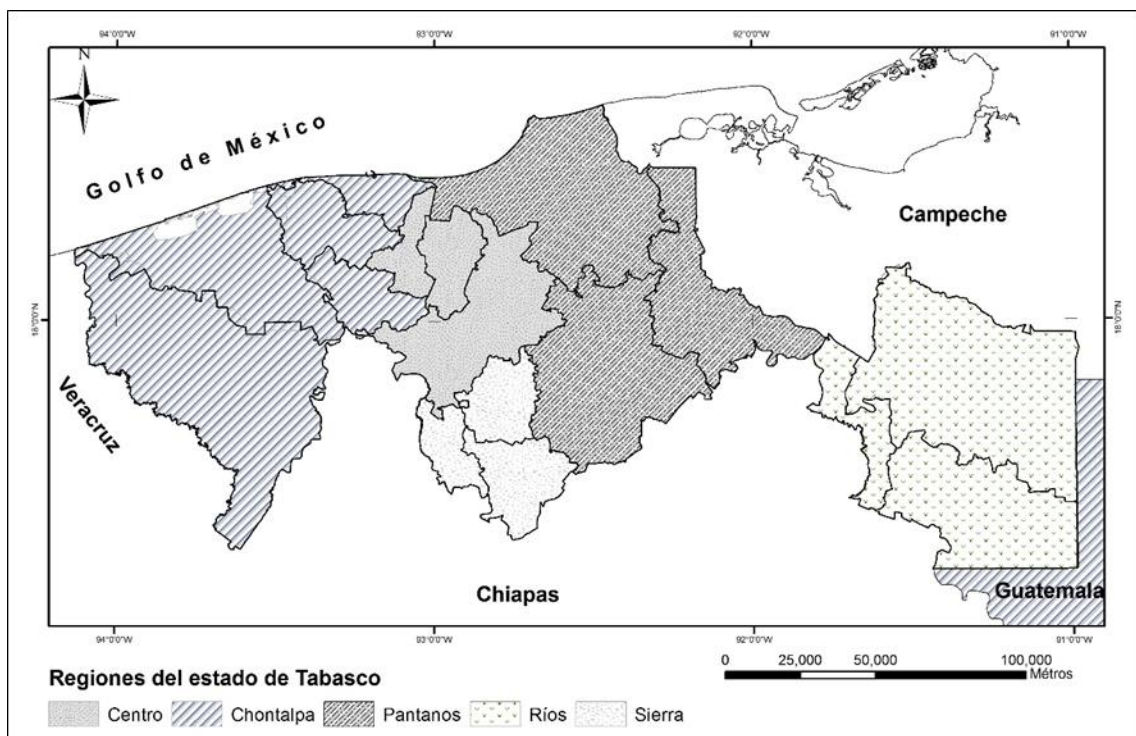


Figura 1. Ubicación geográfica del estado de Tabasco y sus subregiones.

Descripción general de la metodología

Para la realización de la Zonificación Agro-Ecológica (ZAE), del cultivo de café robusta en el estado de Tabasco en la época actual, así como para el año 2050, se siguió el procedimiento propuesto por la FAO (FAO, 1981).

Definición de los requerimientos bioclimáticos óptimos (clima y suelo) para el cultivo de café tipo robusta.

Las principales variables que se consideraron para determinar las zonas muy aptas para el cultivo de café robusta fueron: clima y suelo, por la relación directa que guardan con el rendimiento del cultivo. Se analizaron cinco elementos del clima (Cuadro 1) para determinar las zonas climáticas muy aptas y seis propiedades de los suelos (Cuadro 2) para determinar la aptitud del terreno. Estos requerimientos bioclimáticos del cultivo son reportados por la FAO en el sitio electrónico: <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/cropFindForm> (ECOCROP, 2014).

Cuadro 1. Valores óptimos y absolutos de los requerimientos climáticos para el café tipo robusta, que sirven para definir áreas de alta potencialidad productiva.

Variables climáticas	Óptima		Absoluta	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Requerimientos de temperatura (°C)	20	30	12	36
Precipitación anual (mm)	1700	3000	900	4000
Latitud	-	-	11	13
Altitudes (msnm)	-	-	-	1300
Intensidad luminosa	Cielo Nublado	Cielo Despejado	Sombra Ligera	Muy Brillante
Zona climática (clasificación de Köppen).	Tropical húmedo (Af, Am) y subhúmedo (Aw)			

Fuente: ECOCROP, 2014.

Cuadro 2. Valores óptimos y absolutos de las variables edafológicas seleccionadas para definir áreas con suelos de alta potencialidad para el cultivo de café tipo robusta.

Variables edáficas	Óptima	Absoluta
Profundidad	Media (50-150 cm)	Superficial (20-50 cm)
pH	5.0-6.3	4.0-8.0
Textura	Pesada	Pesada, media, Ligera
Fertilidad	Alta	Baja
Salinidad	Baja (<4 dS/m)	Baja (<4 dS/m)
Drenaje del suelo	Bien drenado	Pobre (saturado > 50% del año), Bien Drenados

Fuente: ECOCROP, 2014.

La fertilidad de suelo fue determinada con base en el porcentaje de saturación de bases (PSB), calculado por medio de la suma de las bases intercambiables (Ca+Mg+K+Na) entre la capacidad de intercambio de cationes (CIC) por cien. Si la PSB es igual o superior a 50 la fertilidad es alta, si la PSB es menor a 50 la fertilidad es baja (IUSS Working Group WRB, 2014). Con respecto al drenaje del suelo éste se basó en los datos de las descripciones de perfiles de suelo en campo, donde los suelos bien drenados se caracterizan por no poseer moteados debidos a condiciones de óxido-reducción dentro de los 60 cm de profundidad, en cambio los suelos pobremente drenados presentan colores de gleyzación en los primeros 60 cm de profundidad (colores grisáceos en la matriz del suelo o en las paredes de los agregados), esto indica que por más del 50% del año promedio los suelos están saturados con agua (Cuanalo, 1990).

Acopio de datos climatológicos

La información climática requerida en el estudio se extrajo de la base de datos incluida en el Extractor Rápido de Información Climatológica, ERIC III 3.2., (IMTA, 2013). La información analizada consistió en reportes diarios de precipitación y temperatura para 89 estaciones meteorológicas del estado de Tabasco. De esta base, se seleccionaron 45 estaciones meteorológicas con relación a su distribución geográfica de las cinco regiones fisiográficas del estado (Figura 1) y periodo de registros completos con 30 años o más. Los pocos datos faltantes de temperatura se corrigieron utilizando regresiones lineales entre la estación con los datos faltantes y la estación más cercana, dada su propiedad extensiva. En todos los casos el coeficiente de determinación fue superior a 0.95. Para la precipitación, dada su característica de variable discreta y fuerte asociación a condiciones locales, se utilizó el método geográfico, cuyo valor estimado fue el promedio ponderado por la distancia de al menos 4 estaciones cercanas a la estación con los datos faltantes. La precisión de los valores estimados se corroboró estimando valores conocidos, asumiendo que eran faltantes. En todos los casos, el error en la precipitación total mensual fue menor al 3%.

Los datos de irradiación solar global horizontal promedio diaria para esas 45 estaciones selectas se obtuvieron de la base de datos desarrollada por el Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco, a partir del modelo de Hargreaves-Samani, ajustado y validado para el estado de Tabasco con datos observados diarios de irradiación solar global publicados por Peralta-Gamas *et al.* (2008).

Análisis agroclimático para definir el inventario climático y las divisiones climáticas

La elaboración de un inventario climático se realizó de acuerdo a los lineamientos de la FAO (1981), mismo que consta de dos etapas: 1) Definición de las divisiones climáticas mayores, y 2) Obtención de los periodos de crecimientos. La primera se definió con base en los requerimientos térmicos del cultivo, que limitan su distribución a escala global. Se utilizaron los datos de los requerimientos térmicos reportados (Cuadro 1), para establecer las divisiones climáticas mayores. Es importante mencionar que para el estado de Tabasco no hubo problemas en la clasificación del clima porque su fisiografía es similar en toda la región, debido a su poca elevación. Para calcular el inicio, final y duración en días del periodo de crecimiento del cultivo, de acuerdo con el método de la FAO (1981), se utilizó el programa AGROCLIM (Aceves *et al.*, 2008), que realiza dicho cálculo a partir de datos mensuales de precipitación (PP) y datos de evapotranspiración potencial (ET_p); esta última variable el programa la estima a partir del método de Thornthwaite. Cabe mencionar que todo el estado de Tabasco presenta un periodo de crecimiento superior a los 270 días que requiere el cultivo (Fisher *et al.*, 2012; ECOCROP, 2014), motivo por el cual no se presenta el mapa de periodo de crecimiento.

Análisis edafológico para definir el inventario edáfico

Para determinar donde se encuentran los mejores suelos para cultivar café en el estado de Tabasco, se hizo acopio de la base de datos de las propiedades físicas y químicas de las Subunidades de Suelos existentes en el estado de Tabasco, incluyendo la georreferenciación de los perfiles de suelo y los archivos digitales (shapes) de los polígonos de los suelos. Se compararon los requerimientos óptimos de cada una de las seis variables de suelo para café robusta reportados en el Cuadro 2, con las propiedades de las diferentes Subunidades de Suelo existentes en el estado de Tabasco, las cuales se encuentran en la base de datos de suelos y son reportadas a escala 1:250 000 con una resolución de 75 m por pixel por Palma-López *et al.* (2007). Aquellas subunidades de suelo cuyas propiedades cumplieran con los valores óptimos señalados en el Cuadro 2, se consideraron Subunidades con alto potencial edafológico para el cultivo de café tipo robusta.

Elaboración de la cartografía y álgebra de mapas para obtener el mapa con la distribución espacial de las áreas edafoclimáticamente muy aptas

La herramienta que se utilizó para la elaboración de la cartografía fue el programa ArcView SIG (Sistema de Información Geográfica) versión 9.3 (ESRI, 2004), que relacionan lugares con información agroclimática iguales a las del cultivo de café, las cuales se denominaron áreas muy aptas. De acuerdo a los requerimientos bioclimáticos del cultivo (Cuadro 1) y para su análisis espacial, se construyeron mapas a escala 1:250 000 de precipitación y temperatura media, para ello se empleó el método de interpolación espacial Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDW) incluido en el programa de ArcMap. El interpolador IDW ha sido ampliamente utilizado en variables meteorológicas, debido a que se asocia con el término de Mejor Predictor Lineal Insegado (MPLI) y es el más adecuado en el sentido de que minimiza la varianza del error en la predicción (Castro *et al.*, 2010). Con el uso del programa SIG se utilizó el álgebra de mapas, herramienta que permite ejecutar todos los operadores y las funciones del análisis espacial, para realizar análisis geográficos, específicamente, para nuestro caso sumar dos o más mapas y obtener uno nuevo que mezcla los polígonos de las variables de los mapas originales. En un primer tiempo se sumaron los mapas de temperaturas y precipitación, obteniéndose las zonas con alto potencial climático. Posteriormente, se realizó el álgebra de mapas de las zonas con alto potencial climático y las zonas con alto potencial edafológico, dando origen al mapa con alto potencial edafoclimático.

Estimación de rendimientos potenciales del café tipo robusta

En el presente estudio se utilizó el método de Zonas Agro-Ecológica (ZAE) propuesto por FAO (1981) y actualizado por Fischer *et al.* (2012) para estimar el rendimiento potencial del cultivo de café en el estado de Tabasco. El rendimiento potencial de un cultivo es aquel rendimiento máximo posible que no tiene ninguna restricción, salvo la impuesta por la genética del mismo cultivo y las condiciones climáticas (Lovenstein *et al.*, 1995).

La estimación del rendimiento máximo se basa en la ecuación (1).

$$Y_{\max}^j = B_n * I_c \quad \text{Ecu. 1.}$$

Donde Y_{\max}^j es el rendimiento máximo sin restricciones ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ de café pergamino), j es el año 2014 y/o 2050, Bn es la producción de biomasa neta ($t\ ha^{-1}$) e Ic es el índice de cosecha (adimensional).

Los cálculos del rendimiento máximo potencial se basan en principios ecofisiológicos y consideran la cantidad total de biomasa neta (Bn) producida por un cultivo en una localidad en particular, que además de depender de variables meteorológicas (irradiación solar global y temperatura), depende del índice de área foliar (IAF) y de un índice de cosecha (Ic); los que a su vez dependen del nivel de insumos aplicados al cultivo. En el Cuadro 3 se muestran los valores de IAF e Ic , para tres niveles de insumos (bajo, intermedio y alto) que fueron utilizados para estimar los rendimientos potenciales actuales y para mediados de siglo.

Cuadro 3. Valores del índice de área foliar (IAF) e índice de cosecha (Ic) para diferentes niveles de insumos, para el cultivo de café tipo robusta.

Índices	Nivel de insumos		
	Bajo	Intermedio	Alto
IAF	1.5	2.3	3
Ic	0.06	0.095	0.13

Fuente: Fischer *et al.* (2012).

Para el cálculo del rendimiento potencial actual se utilizaron datos de irradiación solar y de temperatura con registros de los últimos 14 años, lo anterior debido a que las bases de datos meteorológicos a largo plazo proporciona una estimación más robusta del rendimiento potencial (Van Ittersum *et al.*, 2013). La Bn se entiende como la materia seca total y el rendimiento (Y_{\max}) como la materia seca económicamente aprovechable que pueden producir plantas sanas. La Bn en $kg\ ha^{-1}$ para el café se calculó con la ecuación 2.

$$B_n = (0.36 * b_{gm} * L) / (1/N + 0.25 * C_t) \quad \text{Ecu 2.}$$

Donde b_{gm} es la tasa máxima de producción de biomasa bruta para un $IAF \geq 5$ en $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ (ecuación 3), L es el coeficiente de tasa máxima de crecimiento, C_t es el coeficiente de respiración (ecuación 6), N es la duración del ciclo del cultivo, para el cual se consideraron 270 días (ECOCROP, 2014; Fischer *et al.*, 2012).

$$bgm = F*b_o*((100+x/5)/100)+(1-F)*b_c ((100+x/2)/100) \quad \text{Ecu 3.}$$

Donde F es igual a la fracción del día cubierto con nubes (ecuación 4), x es el incremento o decremento porcentual para una fotosíntesis máxima (P_{max}) con respecto al valor de $20 \text{ kg}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, (ecuación 5), b_o es la tasa de fotosíntesis bruta en días completamente nublados ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) y b_c es la tasa fotosintética bruta en días completamente despejados ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$). Tanto b_o y b_c fueron calculadas con la ecuación de Campos-Aranda (1996).

$$F = ((Ac - 0.5 * R_g) / (0.80 * R_g)) \quad \text{Ecu 4.}$$

Donde Ac es la radiación fotosintéticamente activa en un día totalmente despejado en $\text{cal} \times \text{cm}^{-2} \times \text{d}^{-1}$. La metodología de la FAO (1981), asume que la radiación fotosintéticamente activa de un día totalmente cubierto es el 20 % de Ac y que la radiación fotosintéticamente activa equivale al 50% de la radiación global total de onda corta R_g , la cual fue reportada para Tabasco por Peralta-Gamas *et al.* (2008).

$$x = ((P_{max} - 20) / 20) * 100 \quad \text{Ecu 5.}$$

$$C_t = C_{30} * (0.044 + 0.00019 * T + 0.0010 * T) \quad \text{Ecu 6.}$$

Donde C_{30} es igual a 0.0108 para cultivos como el café que no son leguminosas y T es igual a la temperatura media en $^{\circ}\text{C}$.

Una vez estimada la biomasa neta de cada mes, se procede a calcular el rendimiento potencial, el cual se conoce al multiplicar la biomasa neta total por el índice de cosecha (I_c) del cultivo de café. Para una descripción más detallada sobre la estimación de los rendimientos potenciales se recomienda consultar a Ortiz *et al.* (2005), Gómez *et al.* (2009), Rivera-Hernández *et al.* (2012), Fischer *et al.* (2012) y Rivera-Silva *et al.* (2013). Los rendimientos potenciales estimados actuales y para mediados de siglo por esta metodología son válidos bajo las siguientes condiciones: son para cultivo de café robusta con 4 años de edad y con una densidad de población de 833 árboles por hectárea (4x3), con un índice de área foliar e índice de cosecha indicados en el Cuadro 3.

Análisis del incremento de la temperatura para el año 2050

Para determinar el incremento de temperatura para el año 2050 se utilizaron 12 mapas de los Estados Unidos Mexicanos, para tres diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (A2, B1 y A1B), reportados por Magaña y Caetano (2007). Dichos mapas son el resultado de 23 Modelos Ensamblados de Circulación General de la Atmósfera y Océano Acoplados (AOGCM's) que se utilizaron para realizar un análisis regional de los impactos esperados en la temperatura y la precipitación para el estado de Tabasco, para la climatología del año 2050.

El resultado del análisis señala que en el peor escenario A2 (equivalente al escenario RCP8.5 según el IPCC (2014), la temperatura promedio diaria de Tabasco, se incrementará en 1.6 °C a mediados de siglo. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), desarrolló una serie de escenarios de emisiones, para evaluar los impactos posibles del cambio climático. Los escenarios A1 y B1 están orientados a nivel global, mientras que el A2 y B2 se enfocan en las estructuras regionales. El escenario A2 se sitúa un alto crecimiento económico, caracterizado por un mundo heterogéneo dominado por el mercado, con un mayor crecimiento de población de los demás escenarios (A1, B1 y B2), pero con menor desarrollo económico. Para el año 2014, el IPCC renombró los escenarios, sustituyendo los "A" y "B" por las tendencias representativas de concentración (RCP). Estas RCP se utilizan para hacer proyecciones y describen las diferentes tendencias de las emisiones de GEI para el siglo XXI. Los RCP incluyen un escenario de mitigación riguroso (RCP2.6), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con muy elevadas emisiones de GEI (RCP8.5). En el presente estudio se ha determinado trabajar con el escenario A2 por que se enfoca en las estructuras regionales.

Este incremento se utilizó para realizar una zonificación agroecológica del cultivo del café robusta en el estado de Tabasco, para el año 2050, utilizando la metodología propuesta por la FAO. La zonificación agroecológica se realizó incrementando en 1.6 °C las temperaturas promedio diarias de las 45 estaciones meteorológicas selectas para el estado de Tabasco. Respecto a la precipitación, los mapas reportados por Magaña y Caetano (2007) mostraron que la precipitación se verá poco afectada (menos 50 mm) en los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), por lo que no se consideró el efecto de esta variable en la generación de los mapas de zonificación para el año 2050.

Resultados y discusión

Zonas climáticas muy aptas para el café tipo robusta actualmente

Los análisis de temperatura promedio anual de las 45 estaciones meteorológicas selectas, mostraron que todo el estado de Tabasco presenta condiciones óptimas para cultivar café tipo robusta. Lo anterior debido a que las temperaturas registradas en las estaciones meteorológicas se ubican en el rango (de 24 y 28 °C), que es el rango óptimo que ECOCROP (2014) reporta para cultivar café tipo robusta.

En la Figura 2, se muestra que la mayoría de la superficie del estado de Tabasco presenta condiciones muy aptas por precipitación total anual para establecer el cultivo de café robusta. Esta superficie muy apta equivale a 2, 034,227.52 ha. Se aprecia en la misma Figura 2 que la zona más húmeda al sur del estado, en las estribaciones de la Sierra de Chiapas, en los municipios de Teapa, Tacotalpa, Jalapa y Macuspana no resultaron muy aptas debido a que su precipitación total anual estuvo por encima de los 3,000 mm. Turbay *et al.* (2014) señalan que las lluvias muy intensas disminuyen la floración del cafeto y su productividad. Por otro lado, las altas precipitaciones provocan mayor infestación por roya (Muñoz, 2011) y provocan el lixiviado de los fertilizantes aplicados en el cultivo y disminuyen la radiación solar (Crisosto *et al.*, 1992). De la misma manera, tampoco resultaron muy aptas zonas de la parte norte del municipio de Centla y oriente del municipio de Balancán, donde la precipitación total anual estuvo por debajo de los 1,700 mm. Jaramillo y Arcila (2009) reportan que el déficit de agua en el suelo, asociado a bajos niveles de precipitación y pocos días con lluvia, puede causar daños en la cosecha de café, especialmente si ésta coincide con la época de floración o de llenado de fruto.

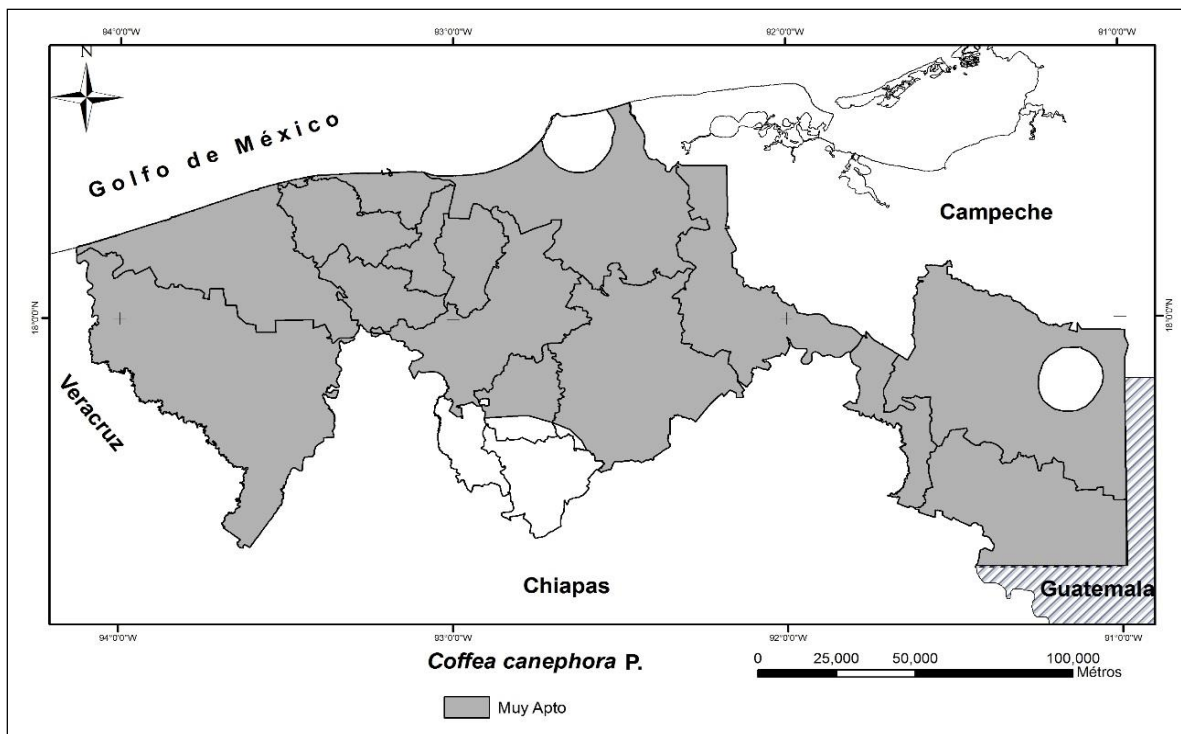


Figura 2. Zonas muy aptas para el cultivo de café tipo robusta (*Coffea canephora* P.) en el estado de Tabasco, por precipitación total anual y temperatura promedio anual.

Al realizar el álgebra de mapas, se logró sumar los mapas de temperaturas y precipitación para determinar las zonas con alto potencial climático por estos dos factores. Esto originó el mapa que muestra aquellas áreas que climáticamente son las muy aptas para cultivar café robusta y donde se esperan tener un alto potencial productivo (Figura 2), siendo la precipitación total anual el factor limitante para definir la aptitud climática.

Delimitación de las zonas edafológicas muy aptas actuales para el café tipo robusta

El análisis edafológico mostró que cuando se compararon los requerimientos óptimos de suelo que demanda el cultivo de café robusta (Cuadro 2), con las propiedades de las 80 Subunidades de suelo existentes en el estado de Tabasco (Palma *et al.*, 2007), se encontró que sólo 2 de ellas cubrían los requerimientos para este tipo de café. El mapa de la Figura 3 muestra las áreas que resultaron edafológicamente muy aptas para cultivar café robusta. Las Subunidades de suelo para producir café fueron: Fluvisoles Éutricos y Cambisoles Éutrico-calcáricos, que ocupan una superficie de 207,021.12 ha, consideradas como suelos muy aptos para cultivar café del tipo robusta y que se localizan en las cinco subregiones (Sierra, Centro, Chontalpa, Ríos y Pantanos). Esta superficie

representa el 5% de territorio del estado de Tabasco. La textura de estas dos Subunidades de suelo, coinciden con las texturas reportadas en las principales zonas productoras de café en México (Rosas *et al.*, 2008) y en otras partes del mundo (Wintgens, 2004).

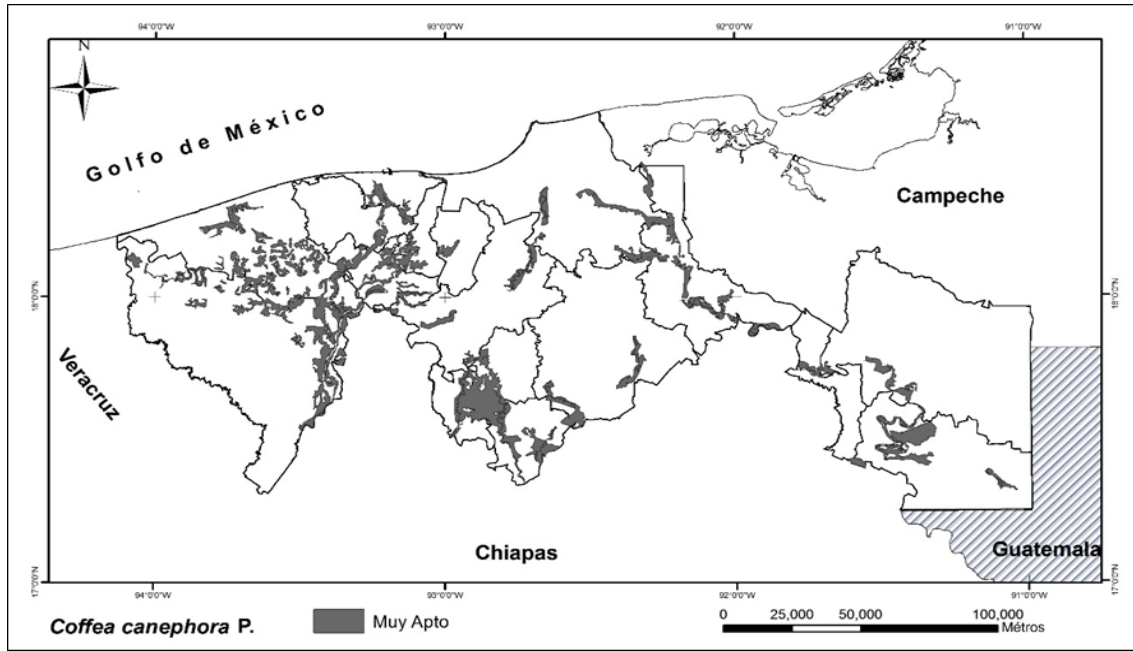


Figura 3. Áreas edafológicamente muy aptas para cultivar café del tipo robusta (*Coffea canephora* P.) en el estado de Tabasco.

En el Cuadro 4 se muestran las Subunidades de suelo y sus propiedades, que resultaron óptimas para el cultivo de café en el estado de Tabasco. Esta limitada selección de Subunidades de suelo se debe a que la mayoría de los suelos en Tabasco presenta drenajes pobres principalmente por: i) fisiografía plana que promueve inundación, ii) niveles freáticos altos durante una gran parte del año y iii) por altos contenidos de arcillas. Por ejemplo, las subunidades de los suelos Histosoles (Hs) sólo están libres de manto freático en la superficie de 30 a 40 días. Otras subunidades que abarcan una gran superficie del estado son los Vertisoles y Gleysoles que presentan altos contenidos de arcillas (Palma *et al.*, 2007), que dificulta el drenaje del agua de lluvia y el laboreo de los cultivos. La profundidad (>1.2 m) y la textura del suelo son dos propiedades físicas importantes, que permiten al cultivo de café tener un sistema radicular eficiente (Matiello, 1991). Además, el exceso de humedad en el suelo afecta la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Unger *et al.*, 2009) y según Xiao-Chang y Qin, (2006) la inundación inhibe la actividad de enzimas

como la β -D-glucosidasa y la fosfatasa, involucradas en los ciclos del carbono, nitrógeno, fósforo y azufre.

Cuadro 4. Subunidades de suelos óptimas para el cultivo de café tipo robusta en el estado de Tabasco, México.

Subunidades De suelos	Propiedades							
	Profundidad	Textura	Fertilidad	Toxicidad Aluminio	Salinidad	Drenaje	pH	Pendiente %
Fluvisol Éutrico	>2 metros	Media	PSB 58%	No existe	Baja (< de 4 dS/m)	Bueno	7.0	0 a 5
Cambisol Éutri- Calcárico	>2 metros	Media	PSB 57%	No existe	Baja (< de 4 dS/m)	Imperfecto	6.5	0 a 5

PSB: porcentaje de saturación de bases.

Delimitación de las zonas edafoclimáticas muy aptas actuales para el café tipo robusta

Al realizar el álgebra de mapas sumando el de las zonas con alto potencial climático y el de las zonas con alto potencial edafológico, se tiene como resultado el mapa edafoclimático muy apto para el cultivo de café; las áreas que se traslapan, son aquellas que edafoclimáticamente son las más aptas para cultivar café y donde se espera tener un alto potencial productivo de este cultivo. El resultado de este traslape se presenta en el mapa de la Figura 4. En color oscuro se muestran las áreas edafoclimáticas muy aptas para producir café del tipo robusta en el estado de Tabasco. Es importante resaltar que al área edafoclimáticamente muy apta, a través del procedimiento de álgebra de mapas se restó un área de amortiguamiento de 10 km a partir de la costa, para evitar el efecto de las sales cíclicas que son acarreadas tierra adentro por los vientos dominantes del Golfo de México que afectan negativamente al cultivo (Aceves, 2011).

A las áreas edafoclimáticamente muy aptas se restaron las áreas de uso urbano actual, para ello se utilizaron los *shape* de uso urbano publicados por el (INEGI, 2014), las áreas por municipio se presentan en el Cuadro 5. En la subregión Chontalpa (Cárdenas, Comalcalco, Cuanducán y Huimanguillo) se ubica la mayor superficie (78,220 ha) para producir café robusta, y actualmente estas áreas están cultivadas con plantaciones de cacao y con pastizales mejorados. Es importante señalar que en los últimos años (2005-2017) la superficie de plantaciones de cacao han disminuido a causa de la enfermedad *Moniliophthora roreri* (Cif. y Par.), agente causal de la *moniliasis* del cacao (Torres-de-la-Cruz *et al.*, 2011), lo que ha generado un problema socio-económico debido

principalmente a la reducción en la producción de almendra de cacao, en más del 75% en plantaciones cultivadas y alcanzan hasta 100% en plantaciones sin manejo (Ortíz-García *et al.*, 2015). Se ha documentado que el café robusta puede ser cultivado como monocultivo (Zaffaroni y Enríquez, 1979), como sistema agroforestal (café-cacao) (Phillips-Mora, 1991; Farfán, 2014), así como lindero con otros cultivos, entre ellos el cacao (Beer, 1987; Phillips-Mora, 1991; Farfán, 2014). Por lo que el café robusta puede ser una alternativa viable para diversificación del agrosistema cacao, con lo cual se esperaría un incremento del ingreso económico por unidad de áreas cultivada, ya que el productor podrían comercializar este tipo de café a nivel local y regional. Además, actualmente el mercado de consumo de café es liderado por el consumo en hogar en zonas de medio y bajos ingresos económico (LTD, 2017).

En las otras cuatro Subregiones (Ríos, Centro, Pantanos y Sierra) la mayoría de las superficies muy aptas se ubican dentro del uso de pastizales cultivados en estas zonas sería factible cultivar áreas compactas de café robusta, lo cual traería beneficio ecológico. Se ha reportado que los sistemas agroforestales (café-árbol de sombra) propician un mayor reciclaje de nutrientes, mayor fijación y estabilidad del carbono, mayor infiltración de agua y ayudan a reducir la erosión (Beer, 1987). La fijación de carbono ayudaría a mitigar el efecto del cambio climático a nivel local, además los sistemas agroforestales propician mayores servicios ambientales como regulación del clima, calidad del aire y de flujo de agua en el ciclo hidrológico (Groot *et al.*, 2002; Gómez-Baggethun *et al.*, 2010) en comparación con los pastizales.

En el Cuadro 5 se muestran 16 de los 17 municipios del estado de Tabasco que poseen el mejor clima y los mejores suelos para cultivar café tipo robusta. Asimismo, se muestra la superficie existente por cada municipio y el porcentaje que representan las áreas muy aptas del total de su superficie. Las superficies que están entre paréntesis (Cuadro 5) representan áreas muy óptimas, que actualmente tienen uso urbano y que fueron descontadas del área edafoclimáticamente muy apta.

Áreas potenciales y vulnerabilidad del cultivo de café tipo robusta (*Coffea canephora* P.) al cambio climático en el estado de Tabasco, México

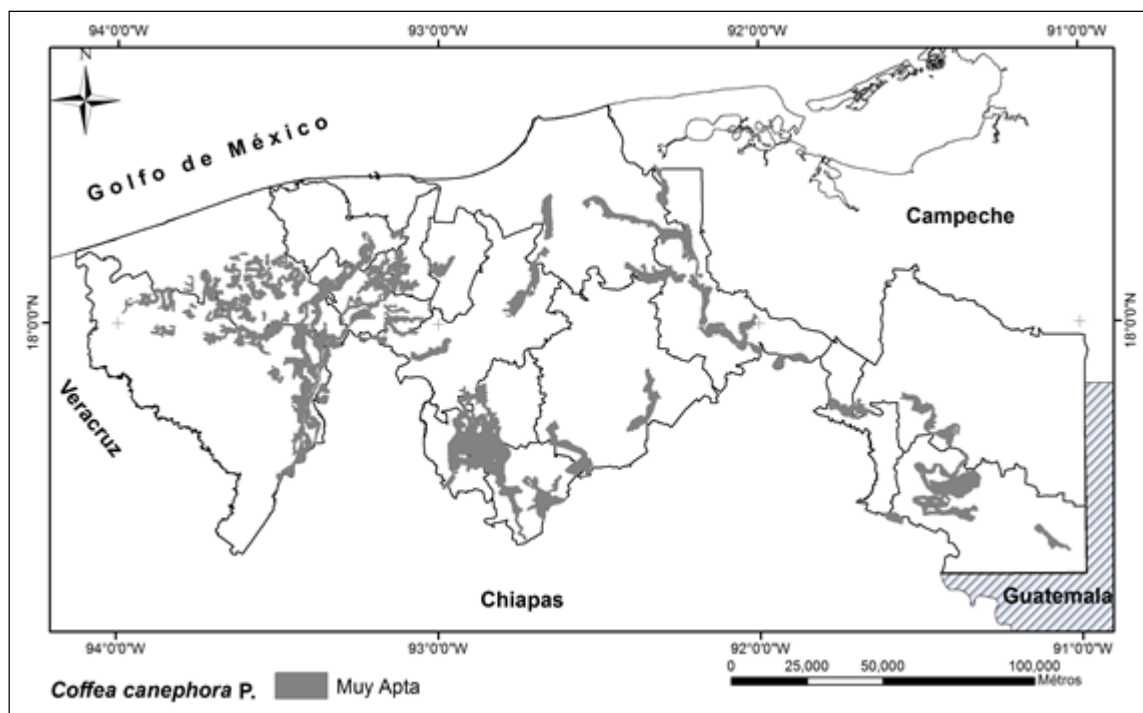


Figura 4. Zonas de alto potencial productivo (zonas edafoclimáticamente muy aptas) para cultivar café del tipo robusta (*Coffea canephora* P.) en el estado de Tabasco.

Cuadro 5. Municipios y superficie edafoclimáticamente muy apta para cultivar café tipo robusta (*Coffea canephora* P.) en el estado de Tabasco, México.

Municipios	Superficie (ha)	% del área del municipio	Municipios	Superficie (ha)	% del área del municipio
Balancán	6,955 (92)	0.19	Jalapa	10,144	1.58
Cárdenas	25,753 (1135)	1.26	Teapa	10,003	2.38
Centla	13,128	0.49	Jonuta	17,183	1.04
Centro	8,536 (219)	0.53	Macuspana	10,794	0.44
Comalcalco	3,529	0.46	Nacajuca	2,007 (78)	0.38
Cunduacán	14,527 (361)	2.43	Tacotalpa	2,1577	2.94
Emiliano Zapata	2,165 (18)	0.42	Jalpa de Méndez	5,039 (224)	1.07
Huimanguillo	34,413	0.93	Tenosique	19,144	1.02

Delimitación las zonas edafoclimáticas muy aptas para el año 2050 bajo escenario (RCP8.5) de cambio climático para el cultivo de café tipo robusta

Al incrementarse en 1.6 °C promedio diario las temperaturas actuales, los análisis muestran que desde el punto de vista climático, las áreas muy aptas para café tipo robusta no se reducen. Es decir, bajo este escenario de cambio climático las zonas climáticamente muy aptas para café tipo robusta no se modifican respecto de la superficie original, ya que este incremento no rebasa los límites del requerimiento de temperatura óptima reportado en el Cuadro 1. Asimismo, tampoco se modifica la aptitud edafológica para el 2050. Motivo por el cual el mapa de la Figura 4, es idéntico al mapa que resultaría para el año 2050 bajo el escenario RCP8.5 de cambio climático.

Así, en la Figura 4 se muestra el mapa del estado de Tabasco con las zonas edafoclimáticamente muy aptas (de alta potencialidad) para café tipo robusta, para el año 2050. En este mapa, se aprecia que para el año 2050 la superficie de zonas muy aptas para café tipo robusta (oscurecidas) equivale a 154,755.14 ha ya que bajo el escenario de cambio climático RCP8.5, las áreas edafoclimáticamente muy aptas no se reducen.

El hecho de que las áreas muy aptas en el año 2014 sean las mismas para el año 2050, se debe a que el café robusta tienen un rango de temperaturas amplio (20-30 °C), es decir que al sumar el incremento de temperatura (1.6 °C) pronosticado, a las temperaturas promedios de las estaciones meteorológicas, éstas aun caen dentro del rango óptimo de temperatura señalado por el ECOCROP (2014). Sin embargo, el mismo incremento de temperatura fue suficiente para causar una disminución del 92.46 % del área edafoclimáticamente muy apta en el café arábica para el año 2050 (Aceves-Navarro *et al.*, 2018). Lo anterior se debe al rango de temperatura menor (14 y 28 °C) que el café arábica demanda (ECOCROP, 2014).

Rendimientos potenciales actuales y para el año 2050 para el café tipo robusta

Los rendimientos potenciales estimados para café robusta con el método FAO (1981) y Fischer *et al.* (2012) mostraron una variación en los rendimientos para diferentes insumos y para las diferentes localidades dentro de la misma zona de aptitud (muy apta). Los rendimientos potenciales promedios actuales para el cultivo de café robusta para las zonas muy aptas del estado de Tabasco en los tres niveles de insumo: bajo, intermedio y alto fueron 4.3, 6.9 y 9.3 t ha⁻¹ de café cereza, respectivamente.

Los rendimientos anteriores equivalen a 0.80, 1.28 y 1.72 t ha⁻¹ de café pergamino seco (cps), respectivamente. Los rendimientos potenciales promedios estimados para el cultivo de café robusta para el año 2050 en el estado de Tabasco en los tres niveles de insumo: bajo, intermedio y alto se redujeron a 2.6, 4.0 y 5.5 t ha⁻¹ de café cereza, respectivamente. Esto representa una reducción promedio del 41% en todos los casos, respecto al año 2014. El incremento de la temperatura promedio diaria de 1.6 °C representa reducciones en la producción de 1.7, 2.9 y 3.8 t ha⁻¹, al año de café cereza para los 3 niveles de señalados, respectivamente. Esto indica lo susceptible que sería el café robusta a un cambio climático. Lo cual se pudiera explicar por la reducción que habría en el número de horas con temperaturas adecuadas durante el día para una máxima fotosíntesis, que ahora se reducen a menos de 3 horas al día y con una baja intensidad luminosa, pues esas tasas ocurrirían en las primeras horas de la mañana. Es importante señalar que las tasas fotosintéticas máximas del cultivo de café tipo robusta se obtienen a valores de temperaturas diurnas entre 25 y 30°C (Fisher *et al.*, 2012). El incremento en la temperatura pueden reducir la fotosíntesis, alterar el inicio de la floración y provocar el aborto de flores en el cultivo de café (Gay *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2004; Pérez y Geissert, 2006), resultando en disminuciones en el rendimiento y productividad (Craparo *et al.*, 2015; Villers *et al.*, 2009).

El efecto del incremento del CO₂ sobre la fisiología de la planta en el presente trabajo no se discute, debido a que el volumen de información científica sobre estos fenómenos en el cultivo del café sigue siendo reducido (Júnior *et al.*, 2012) y la poca información disponible en la literatura científica fue obtenidas a través de experimentos conducidos en un ambiente controlado, lo que presenta una gran comprensión de efectos aislados, pero presenta limitaciones para el entendimiento del fenómeno en campo, de ahí que en los estudios de zonificación no se considera esta discusión (Davis *et al.*, 2012; Rivera-Silva *et al.*, 2013; Bunn *et al.*, 2015), por lo que es necesario generar aún más información en campo para realizar una discusión más detallada sobre el fenómeno del cambio climático.

Se ha documentado que incluso dentro de un mismo género, existen diferencias en la respuesta de algunas especies en función de la alteración de la concentración de CO₂. Así, es probable que los cambios climáticos tengan efectos diferenciados para las especies del género *Coffea*, en virtud de sus diferencias ecofisiológicas (Júnior *et al.*, 2012). Las respuestas de una especie a una condición ambiental diferenciada, como es el caso de una atmósfera con mayor

concentración de CO₂, son muy variables y dependen del genotipo, del ambiente y de la interacción entre estos factores (Pimentel, 2004).

En el Cuadro 6 se presentan los rendimientos potenciales promedio en café cereza para el cultivo de café robusta en las áreas muy aptas del estado de Tabasco, para diferentes niveles de insumos actuales y para el año 2050 bajo el peor escenario de cambio climático y su reducción correspondiente. El Cuadro 6 muestra que bajo el escenario A2 de cambio climático los rendimientos potenciales se reducen aproximadamente 40% para los tres niveles de insumos, respecto a los rendimientos potenciales actuales. Es importante señalar que, aunque no se reduce la superficie de las zonas muy aptas para cultivar café robusta en el 2050, los rendimientos potenciales sí se reducen porque se afectan las tasas fotosintéticas. Así, el rendimiento potencial promedio de café cereza para las zonas muy aptas para cultivar café robusta en el estado de Tabasco en el año 2050, y para diferentes niveles de insumos varía de 4.3 a 9.3 t ha⁻¹, de café cereza, equivalente a 0.80 y 1.72 t ha⁻¹ de café pergamino seco (cps).

Cuadro 6. Rendimientos potenciales del café robusta actuales (2014) y para el año 2050 bajo el peor escenario de cambio climático.

Nivel de insumo	Rendimiento potencial promedio en café cereza (t ha ⁻¹)		
	Año		Reducción (%)
	2014	2050	
Bajo	4.3	2.6	39
Intermedio	6.9	4.0	42
Alto	9.3	5.5	41

Conclusiones

En el estado de Tabasco existen actualmente 154,755.14 ha edafoclimáticamente muy aptas para establecer el cultivo de café tipo robusta. Bajo el escenario de cambio climático A2 (RCP8.5) se espera un incremento en la temperatura promedio diaria de 1.6°C, la cual no afectará la aptitud edafoclimática del café robusta. Los rendimientos potenciales promedio varían en función del nivel de insumos para la edad y densidad de siembra señalada, entre 4.3 y 9.3 t ha⁻¹ de café cereza bajo el escenario actual y de 2.6 a 5.5 t ha⁻¹ para el escenario del 2050, respectivamente. Lo anterior es un indicador de que el cultivo de café tipo robusta, en el estado de Tabasco, es vulnerable al cambio climático y que aunque no se modificará la aptitud en superficie, los rendimientos si se reducirán significativamente en un 41%.

Referencias

- Aceves, N. E. (2011). El Ensalitramiento de los Suelos Bajo Riego, segunda ed., Editorial del Colegio de Postgraduados-Mundi Prensa México. Biblioteca Básica de Agricultura. 236 p.
- Aceves, N.L.A., R.A. Arrieta., Barbosa, O.J.L. (2008). Manual de AGROCLIM 1.0, Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco, H. Cárdenas Tabasco, México, 28 p.
- Aceves-Navarro, L.A., Rivera-Hernández, B., Juárez-López, J.F., David Jesús Palma-López, D.J., Hernández-Gómez, M., González-Mancillas, R. 2018. Impacto del cambio climático en la adaptación del cultivo de café *Coffea arabica* L, en el estado de Tabasco, México. 67 (3). En prensa Revista Acta Agronómica.
- AMECAFE (Asociación Mexicana de la Cadena Productiva del Café). (2012). “Plan Integral de Promoción del Café de México” 63 p. (en línea) [<http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2016/04/pcm2012.pdf> 2 marzo 2017]
- AMECAFE (Asociación Mexicana de la Cadena Productiva del Café). (2014). “Plan de Innovación de la Cafeticultura en el Estado de Tabasco” (en línea), [www.amecafe.org.mx/downloads/Plan%20de%20Innovacion%20Tabasco.pdf: 7 abril 2017].
- Agrell, P.J., Stam, A., Fischer, G.W. (2004). Interactive multi-objective agroecological land use planning: the Bungoma region in Kenya. Eur. J. Oper. Res 158: 194-217.
- Beer, J.W. (1987). Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. Agroforestry Systems. 5(1):3-13.
- Bunn, C., Läderach, P., Ovalle-Rivera, O., Kirschke, D. (2015a). A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. Clim. Change 129 (1.2):89-101.
- Bunn, C., Läderach, P., Pérez-Jimenez, J.G., Montagnon, C., Schilling, T. (2015b). Multiclass classification of agro-ecological zones for Arabica coffee: an improved understanding of the impacts of climate change. PLoS ONE 10, e0140490
- Camargo, M.B.P. (2010). “The impact of climatic variability and climate change on Arabic Coffee crop in Brazil”, Bragantia 69(1): 239-247.
- Campos-Aranda, D. F. (1996). Programa en BASIC para la estimación del rendimiento climático máximo. Agrocienca 30: 21-30.

- Castro, F., Pezzopane, J.E., Cecilio, R. A., Pezzopane, J.R.M., Xavier, A.C. (2010). “Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14(8): 871-880.
- Cuanalo, C.H. (1990). *Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo*. Centro de edafología. Chapingo, México. Colegio de Postgraduados. 49p.
- Craparo, A.C.W., van Asten, P.J.A., Laderach, P., Jassogne, L.T.P., Grab, S.W. (2015). “Coffea arabica yields decline in Tanzania due to climate change: Global implications”, *Agricultural and Forest Meteorology* 207: 1-10.
- Crisosto, C.H., Grantz, D.A., Meinzer, F.C. (1992). “Effects of the water deficit on flower open in coffee (*Coffea arabica* L.)”, *Tree physiology* 10(2):127-139.
- Davis, A.P., Gole, T.W., Baena, S., Moat, J. (2012). The impact of climate change on indigenous arabica coffee (*coffea arabica*): predicting future trends and identifying priorities. *PLoS ONE* 7(11).
- ECOCROP (2014), The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Versión 1.0. Agls. Rome, Italy. [<http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/cropSearchForm>: 20 abril del 2017].
- ESRI (Environmental System Research Institute). (2004). *Arcgis 9. Getting Started With Arcgis*. Sistema de información. Redland, CA. USA, 256 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (1981). *Report on the Agro-Ecological Zones Project. Vol. 1: Methodology and Results for Africa*. Food and Agriculture Organization of the United Nations World Soils Report No. 48. Rome, Italia, 158 p.
- Farfán, V.F. (2014). *Agroforestería y Sistemas Agroforestales con Café*. Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé Manizales, Caldas (Colombia). 342 p.
- Fischer, G., Nachtergaele, F., Prieler, S., Teixeira, E., Toth, G., Harrij, V., Verelst, L., Wiberg, D. (2012). *Global Agro-Ecological Zones (GAEZ v3.0)*, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) and Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 179 p.
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura) (2016). *Panorama alimentario, dirección de investigación y evaluación económica sectorial*. 36 pag.

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200636/Panorama_Agroalimentario_Caf_2016.pdf, 26 de enero de 2018]

- Flores, V.F. (2015). La producción de café en México: ventana de oportunidad para el sector agrícola de Chiapas. *Espacio I+D*. 4 (7):175-194.
- Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Heakin, H., Villers, L. (2006). "Potential Impacts of Climate Change on Agriculture: A Case of Study of Coffee Production in Veracruz, México". *Climatic Change* 79(3): 259-288.
- Gómez, M.R., Ortiz, S.C.A., Zamora, D.M., Soria, R.J., Trinidad, S.A., Carballo, C.A. (2009). Estimación del rendimiento de cebada (*Hordeum vulgare* L.) maltera con el método FAO. *Agricultura Técnica en México* 35(1): 12-22.
- Gómez-Baggethun, E., Groot, R., Lomas, P.L., Montes, C. 2010. The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics* 69: 1209-1218.
- Groot, R.S., Wilson, M.A., Boumans, R.M.J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41(3): 393-408.
- Haggard, J., Schepp, K. (2012). Coffee and climate change. Impacts and options for adaptation in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam. NRI Working Paper Series: Climate Change, Agriculture and Natural Resources, Núm. 4, University of Greenwich. UK, 55 p.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). (2013). Eric III. Extractor Rápido de Información Climatológica v.3.2. [cd-rom].
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2014). Anuario Estadístico Tabasco. Gobierno del estado de Tabasco, México, 597 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change). (2014). Climate Change 2014, Synthesis Report. Contributions of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- IUSS Working Group WRB. (2014). World reference base for soil resource. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO. Rome, Italy. 181p.

- Jaramillo, A., Arcila, J. (2009). “Variabilidad climática en la zona cafetera colombiana asociada al evento de la niña y su efecto en la caficultura”, *Avances Técnicos Cenicafé*, Chinchina: 390: 8
- Junior, W.C.J., Martins, L.D., Rodrigues, W.N., Moraes, W.B., Amaral, J.F.T., Tomaz, M.A., Alves, F.R. (2012). Mudanças climáticas: potencial impacto na sustentabilidade da cafeicultura. In: Tomaz, M.A., Amaral, J.F.T., Junior, W.C.J., Fonseca, A.F.A., Ferrão, R.G., Ferrão, M.A.G., Martins, L.D., Rodrigues, W.N. (editors). *Inovação, difusão e integração: bases para a sustentabilidade da cafeicultura*. N°. 3, UFES, Centro de Ciências Agrárias, Alegre, p. 179-201.
- LTD (Euromonitor International) (2017). Análisis del Mercado de Consumo de Café en México 2016. Informe del estudio realizado por Euromonitor International para AMECAFE. [https://amecafe.org.mx/.../Euromonitor_Informe_Análisis-de-consumo-2016-AMECA: 30 de enero del 2018].
- Lovenstein, H.M., Lantinga, R., Rabbinge, R., van Keulen, H. (1995). *Principles of Production Ecology: Text of course F 300-001*, pp 8. Fig. 8. Department of Theoretical Production Ecology, Wageningen University and Research Centre, Wageningen, The Netherlands, pp 121 Open University, Heerlen. pp 247.
- Magaña, V., Caetano, E. (2007). Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana, como elemento para la reducción del riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: Cambio climático por estado y por sector. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Dirección General de Investigación Sobre Cambio Climático. Informe Final Proyecto Núm. INE/A1-006/2007. 19 p.
- Matiello, J.B.O. (1991). *Café: do cultivo ao consumo*. São Paulo: Globo. 320p. (Coleção do Agricultor. Grãos. Publicações Globo Rural).
- Méndez, L. I. (2014). “Paquete Tecnológico Café Robusta (*Coffea canephora* P.). Establecimiento y Mantenimiento. Programa Estratégico para el Desarrollo Sustentable de la Región Sur-Sureste de México: Trópico Húmedo 2011. SAGARPA-INIFAP” (en línea) www.inifap.gob.mx/Documents/inicio/paquetes/cafe_robusta.pdf: 18 marzo del 2017].
- Méndez, L.I., Iracheta, D.L., Sandoval, E.A. (2014). “Clones Selectos de Café Robusta (*Coffea canephora* P.)”. Una Alternativa para la Reconversión de las Áreas Cafetaleras Bajas de

México. Centro de Investigación Regional Pacífico Sur. Campo Experimental Rosario Izapa. INIFAP (en línea) [www.inifap.gob.mx: 18 marzo del 2017].

- Muñoz, L.G. (2011). “La inestabilidad climática: nueva realidad para la caficultura colombiana”, *Ensayos sobre economía cafetera* 27:5-9.
- Niggol, S.D. (2014). Evaluation of the Agro-Ecological Zone methods for the study of climate change with micro farming decisions in sub-Saharan Africa. *Europ. J. Agronomy* 52: 157-165.
- Ovalle-Rivero, O., Laderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M., Schroth, G. (2015). “Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change”, *Plos One* 10(4): 1-13.
- Ortíz-García, C.F., Torres-de-la-Cruz, M., Hernández-Mateo, S.C. (2015). Comparación de dos sistemas de manejo del cultivo del cacao, en presencia de *Moniliophthora roreri*, en México. *Rev. fitotec. mex* 38(2): 191-196.
- Ortiz, S.C.A., Gutiérrez, C.M.C., Nieves, F.J. (2005). Estimación de rendimientos de maíz con el método FAO en el ejido de Atenco, Estado de México, *Rev. Geografía Agríc* 35: 57-65.
- Palma-López, D.J., Cisneros, D.J., Moreno, C.E., Rincón-Ramírez, J.A. (2007). Suelos de Tabasco: Su uso y manejo sustentable. Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-FRUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México, 194 p.
- Peralta-Gamas, M., Jiménez-Jiménez, R., Martínez-Gallardo, J.B., Rivera-Hernández, B., Pascual-Córdova, A., Caraveo-Ricardez, A.C., Aceves-Navarro, L.A. (2008). “Estimación de la variación espacial y temporal de la radiación solar en el estado de Tabasco, México”. XX Reunión Científica-Tecnológica Forestal y Agropecuaria. Villahermosa, Tabasco, México, pp. 243-253.
- Pérez, P.E., Geissert, K.D. (2006). “Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: el caso café (*Coffea arabica* L.) - Palma Camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.)”, *Interciencia* 31(8): 556-562.
- Phillips-Mora, W. (1991). Sombras y cultivos asociados con cacao. Serie Técnica Informa Técnico. N0.206. Centro Agronomico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. 221pag.
- Pimentel, C.A. (2004). Relação da planta com a água. *Seropédica: EDUR* 2004. 192p.

- Rivera-Hernández, B., Aceves-Navarro, L.A., Juárez-López, J.F., Palma-López, D.J., González-Mancillas, R., González-Jiménez, V. (2012). “Zonificación agroecológica y estimación del rendimiento potencial del cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el estado de Tabasco, México”. *Avances en Investigaciones Agropecuaria* 16(1):29-47.
- Rivera-Silva, M.R., Nikolskii-Gavrilov, I., Castillo-Álvarez, M., Ordaz-Chaparro, V.M., Díaz-Padilla, G., Guajardo-Panes, R.A. (2013). “Vulnerability of Coffee Production (*Coffea arabica* L.) to Global Climate Change”. *Terra Latinoamericana* 31(4):301-313.
- Rosas, A. J., Escamilla, P. E., Ruiz, R.O. (2008). “Relationship of Soil Nutrients to Physical and Sensorial Characteristics of Organic Coffee”. *Terra Latinoamericana* 26(26):375-384.
- SAGARPA, (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2014). Programas de Apoyo SAGARPA (en línea) [[www.sagarpa.gob.mx/Programas SAGARPA/2014/Procafe/Paginas/default.aspx](http://www.sagarpa.gob.mx/Programas/SAGARPA/2014/Procafe/Paginas/default.aspx): 9 octubre del 2016].
- Silva, E.A., Damatta, F.M., Ducatti, C., Regazzi, A.J., Barros, R.S. (2004). “Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis of Arabica coffee trees”. *Field Crops Research* 89: 349-357.
- Schroth, G., Laderach, P., Dempewolf, J., Philpott, S., Hagggar, J., Eakin, H., Castillejos, T., Garcia, M.J., Pinto, L.S., Hernandez, R., Eitzinger, A., Ramirez-Villegas, A. (2009). “Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico”. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 14(7): 605-625.
- Tian, Z., Zhong, H., Sun, L., Fischer, G., van Velthuisen, H., Liang, Z. (2014). Improving performance of Agro-Ecological Zone (AEZ) modeling by cross-scale model coupling: An application to japonica rice production in Northeast China. *Ecol. Model* 290:155-164.
- Torres-de-la-Cruz M., Ortiz-García, C. F., Téliz-Ortiz, D., Mora-Aguilera, A., Nava-Díaz, C. (2011). Temporal progress and integrated management of frosty pod rot [*Moniliophthora roreri* (Cif y Par.) Evans et al.] of cocoa (*Theobroma cacao*) in Tabasco, Mexico. *Journal of Plant Pathology* 93:31-36.
- Turbay, S., Nates, S., Jaramillo, F., Vélez, J. J., Ocampo, O.L. (2014). “Adaptación a la variabilidad climática entre los caficultores de las cuencas de los ríos Porce y Chinchiná, Colombia”, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM* 85:95-112.

- Unger, I.M., Kennedy, A.C., Muzika, R.M. (2009). "Flooding effects on soil microbial communities". *Applied Soil Ecology* 42(42):1-8.
- USDA, FAS. (2016). GAIN Report Number MX6019. "Mexico Coffee Annual". Global Agricultural Information Network, [5/13/2016.]
- van Ittersum, M.K., Casman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance-a review. *Field Crops Res* 143:4-17.
- van Wart, J., van Bussel, L.G., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., Boogaard, H., Gerber, J., Mueller, N.D., Claessens, L., van Ittersum, M.K., Cassman, K.G. (2013). Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crop. Res* 143: 44-55.
- Virginio, F.E.M. 2011. Paquete Tecnológico Café Robusta (*Coffea canephora* P.) Establecimiento y mantenimiento. Programa Estratégico para el Desarrollo Rural Sustentable de la Región sur-sureste de México: Trópico Húmedo. Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias INIFAP. Centro de Investigación Regional Pacífico Sur Campo Experimental Rosario Izapa. 8 p. [www.inifap.gob.mx/Documents/inicio/paquetes/cafe_robusta.pdf].
- Villers, L., Arizpe, R.N., Orellana, C., Hernández, J. (2009). "Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México, *Interciencia* 34(5): 322-329.
- Wintgens, J.E. (2004). "Coffee: growing, processing, sustainable production". A Guide Book for Growers, Processors, Traders and Researchers. Wiley-VCH Verlag. Weinheim, Germany.
- Xiao-Chang, W., Qin, L.U. (2006). "Effect of waterlogged and aerobic incubation on enzyme activities in paddy soil". *Pedosphere* 16(4):532- 539.
- Zaffaroni, E., Enriquez, G.A. (1979). Asociación de cultivos perennes, una alternativa de diversificación en áreas tropicales para pequeños productores. Turrialba, Costa Rica, CATIE. p.38
- Zullo, J.J., Pinto, H.S., Assad, E.D. (2006). "Impact assessment study of climate change on agricultural zoning". *Meteorological Applications* 13(S1):69-80.