



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-
ADMINISTRATIVAS**

DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

**EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA
PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS C₄ EN
MÉXICO (1985-2020)**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta: Marisol Hernández Rodríguez



APROBADA



Bajo la supervisión de: JOSÉ LUIS ROMO LOZANO, DR.



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2022.

**EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCTIVIDAD DE LOS
CULTIVOS C₄ EN MÉXICO (1985-2020)**

Tesis realizada por Marisol Hernández Rodríguez bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

DIRECTOR:  _____

Dr. JOSÉ LUIS ROMO LOZANO

ASESOR:  _____

DR. GERÓNIMO BARRIOS PUENTE

ASESOR:  _____

DR. IGNACIO CAAMAL CAUICH

ASESOR:  _____

DR. OMAR ORTÍZ BARRETO

LECTOR EXTERNO:  _____

DR. CRISTÓBAL MARTÍN CUEVAS ALVARADO

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación e importancia.....	2
1.3 Planteamiento del problema	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 General	4
1.4.2 Específicos.....	5
1.5 Hipótesis.....	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA	6
3. EL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO Y SUS EFECTOS SOBRE LA AGRICULTURA	15
4. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCTIVIDAD DEL MAÍZ, CAÑA DE AZÚCAR Y SORGO EN MÉXICO (1985-2020).....	35
5. CONCLUSIONES	63
6. LITERATURA CITADA	64

ABREVIATURAS USADAS

Siglas	Descripción
CAM	Metabolismo Ácido de las Crasuláceas
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CNIIA	Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica
CO ₂	Dióxido de carbono
FONADE	Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático
OIA	Organización Internacional del Azúcar
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PIB	Producto Interno Bruto
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme el financiamiento para cursar el Doctorado en Ciencias en Economía y llevar a cabo esta investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo, a la División de Ciencias Económico Administrativas (DICEA) y específicamente, al Posgrado de la División por darme las herramientas necesarias para incursionar en el ámbito de la investigación.

Al Dr. José Luis Romo Lozano, director del comité asesor, por su apoyo y asesoramiento en esta investigación, con la cual cumpla un objetivo académico más.

Al Dr. Gerónimo Barrios Puente, Dr. Ignacio Caamal Cauich y Dr. Omar Ortiz Barreto, integrantes del comité asesor, quienes me han impartido clases y apoyado durante mi estancia en este programa de doctorado.

Al Dr. Juan Hernández Ortiz, director del Posgrado de Economía, por las enseñanzas brindadas y todo el apoyo para culminar este proceso.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Marisol Hernández Rodríguez

Fecha de nacimiento: 21 de mayo de 1989

Lugar de nacimiento: San Pedro Jaltepetongo, Cuicatlán, Oaxaca.

CURP: HERM890521MOCRDR06

Profesión: Licenciada en Administración de Empresas

Desarrollo académico

- Maestría en Ciencias en Economía Agrícola. Posgrado de la División de Ciencias Económico Administrativas (DICEA), Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. (2015-2017). Cédula: 11496080.
- Licenciatura en Administración de Empresas Agropecuarias. DICEA, Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. (2007-2012). Cédula: 8034230.
- Técnico en contabilidad. Centro de Bachillerato Tecnológico industrial y de servicios Núm. 26, Oaxaca de Juárez Oaxaca. (2003-2006). Cédula: 5518880.

RESUMEN GENERAL

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS C₄ EN MÉXICO (1985-2020)

El cambio climático es una de las mayores preocupaciones a nivel mundial, tiene efectos en el medio ambiente y en los distintos sectores económicos. La agricultura es una de las actividades más vulnerables ante este fenómeno, las consecuencias sobre su productividad en general son negativas. Sin embargo, en el caso de los cultivos C₄, podría ser favorable. El objetivo principal fue determinar el efecto del cambio climático sobre la agricultura en México y en específico sobre la producción de maíz, caña de azúcar y sorgo. Mediante el enfoque de función de producción se estimaron modelos econométricos utilizando Mínimos Cuadrados Ordinarios. El factor climático que más influye en la producción agrícola a nivel nacional es la concentración de CO₂ en la atmósfera con una relación directa. Se encontró que este gas incentiva la productividad del maíz y el sorgo, por el contrario, tiene efectos negativos sobre la caña de azúcar. La precipitación tiene un efecto positivo sobre los tres cultivos. La temperatura media tiene una relación inversa con el rendimiento del maíz y una relación directa con la caña de azúcar y sorgo. Del año 1985 al 2020 las emisiones de dióxido de carbono por la quema de combustibles a nivel global han aumentado anualmente, si en los próximos años su crecimiento sigue la misma tendencia, la temperatura se seguirá incrementando, los patrones de precipitación se modificarán aún más y la producción agrícola se verá afectada. Las consecuencias de este fenómeno varían entre regiones, y sobre todo en México, que cuenta con una diversidad de climas.

Palabras clave: CO₂, temperatura, maíz, caña de azúcar y sorgo

ABSTRACT

EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON THE PRODUCTIVITY OF C₄ CROPS IN MEXICO (1985-2020)

Climate change is one of the biggest concerns worldwide, it has effects on the environment and on the different economic sectors. Agriculture is one of the most vulnerable activities to this phenomenon, the consequences on its productivity are generally negative, however, in the case of C₄ crops, it could be favorable. The main objective was to determine the effect of climate change on agriculture in Mexico and specifically on the production of corn, sugar cane and sorghum. Using the production function approach, econometric models were estimated using Ordinary Least Squares. The climatic factor that most influences agricultural production at the national level is the concentration of CO₂ in the atmosphere with a direct relationship. It was found that this gas encourages the productivity of corn and sorghum, on the contrary, it has negative effects on sugar cane. Precipitation has a positive effect on all three crops. The average temperature has an inverse relationship with corn yield and a direct relationship with sugar cane and sorghum. From 1985 to 2020, carbon dioxide emissions from the burning of fuels at a global level have increased annually, if in the coming years its growth follows the same trend, the temperature will continue to increase, precipitation patterns will change even more and agricultural production will be affected. The consequences of this phenomenon vary between regions, and especially in Mexico, which has a diversity of climates.

Key words: CO₂, temperature, corn, sugar cane and sorghum

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Antecedentes

El IPCC es el principal organismo internacional que evalúa el cambio climático, fue establecido hace 34 años por el PNUMA y la OMM en 1988 (IPCC, 2013). Afirma que éste fenómeno se debe a procesos tanto naturales (modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas) como a forzamientos externos (cambios antropogénicos en la composición de la atmosfera y uso de suelo; persistentes) (IPCC, 2014).

El clima, se define como el estado promedio del tiempo y como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos. Para medirlo se toman en cuenta variables de superficie como la temperatura, la precipitación y el viento. El periodo para promediar estas variables es de 30 años, según lo define la OMM (IPCC, 2014).

La CMNUCC, en su Artículo 1, define el cambio climático como un cambio de clima que se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada en períodos de tiempo comparables (Naciones Unidas, 1992).

De La Torre *et al.* (2009) afirman que la mayor parte del aumento en la concentración total de GEI observados desde la revolución industrial ha sido debido a actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, cambios en el uso de la tierra, agricultura y emisiones de metano relacionadas con el ganado. El aumento irrestricto de las emisiones de gases está subiendo la temperatura del planeta (Nelson *et al.*, 2009); además de ello, el cambio climático se manifiesta a través de los cambios en la precipitación tanto en intensidad como en distribución temporal y espacial (SEMARNAT, 2016).

Una preocupación de los distintos países es el cómo afectará el cambio climático a la productividad de su agricultura. De acuerdo con Ocampo (2011), los posibles

impactos para la agricultura incluyen el aumento del rendimiento en los entornos más fríos y la disminución de la producción en los ambientes más cálidos.

Si bien las consecuencias del cambio climático sobre la productividad de la agricultura, en general, es negativo, en el caso de los cultivos C₄, este fenómeno podría ser incluso favorable. Debido a las características fisiológicas, genéticas y evolutivas de tales plantas, el incremento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera tiene un “efecto de fertilización” e incrementa la productividad agrícola.

En esta investigación se pretende indagar el efecto del cambio climático en la productividad agrícola y específicamente en los cultivos de maíz, caña de azúcar y sorgo en México; al ser tres de los cultivos C₄ más importantes en el país en cuanto al valor de la producción y además de ser fundamentales para la seguridad alimentaria.

1.2 Justificación e importancia

Con base en INEGI (2022), el sector primario aportó el 3.5 % del PIB con respecto al total nacional. A pesar de que su contribución es relativamente pequeña, este sector es de gran importancia para la economía en general, para la sociedad y el medio ambiente. Por su parte la agricultura es el principal componente del sector primario, en 2021 aportó el 62 % del PIB de este sector y es la actividad fundamental del medio rural en donde habitan el 21 % de la población nacional.

El desarrollo agrícola es un punto clave para el crecimiento económico del país y mas aún en los países en vías de desarrollo (Bula, 2020) además de contribuir al desarrollo económico sustentable (Gómez, 1995).

De acuerdo con el SIAP (2020), el maíz y la caña de azúcar son dos de los cultivos más importantes en México. El maíz es el grano más esencial en la dieta de la población mexicana, en 2020 se cultivó en las 32 entidades de la república y ocupó el primer lugar en cuanto al valor de la producción y en superficie sembrada; por lo que garantizar la seguridad alimentaria de este producto básico

a la población es de carácter estratégico. Con respecto a la caña de azúcar, en el año 2020, ocupó el tercer lugar en cuanto al valor de la producción (antecedido únicamente por el maíz grano y el aguacate). México cuenta con 50 ingenios azucareros, se ubican en 15 estados (CNIIA, 2021). Con relación al cultivo de sorgo, su producción en México es de gran importancia debido a su uso como materia prima para la elaboración de alimentos balanceados para animales, se produce en 29 estados de la República Mexicana, y en el año 2020 representó el 2.79 % del total agrícola nacional (SIAP, 2020).

Por lo tanto, investigar cual es el efecto del cambio climático en estos tres cultivos básicos fundamentales para la seguridad alimentaria de México resulta de interés por su potencial beneficio al incrementarse su productividad debido al cambio climático.

1.3 Planteamiento del problema

El cambio climático es una de las mayores preocupaciones a nivel mundial, ya que éste fenómeno, además de tener efectos en el medio ambiente, también afecta a los distintos sectores económicos de los países, especialmente en los países en vías desarrollo los cuales presentan mayor vulnerabilidad y menor resiliencia en su población (FONADE e IDEAM, 2013). Una de las actividades económicas más vulnerables ante el cambio climático es la agricultura: “El cambio climático produce modificaciones tanto en la temperatura como en la precipitación y para la agricultura ambas variables desempeñan un papel determinante, ya que el crecimiento y desarrollo de los cultivos depende fundamentalmente de estos factores” (Mora *et al.* 2010). La temperatura es el factor ambiental que regula la velocidad de crecimiento y desarrollo de las plantas (Bravo *et al.*, 2012).

Los efectos del cambio climático podrían ser diferentes entre países y más aún dentro de sus propias regiones (Mora *et al.*, 2010), Adams *et al.*, (1999) afirma que los efectos positivos o negativos sobre el rendimiento de los cultivos

dependerán de la ubicación geográfica y de la magnitud de los cambios en los factores climáticos.

El efecto del cambio climático sobre el rendimiento de los cultivos también depende de la ruta fotosintética que éstos empleen, algunas plantas están especialmente adaptadas a la vida en entornos o estaciones del año particularmente secos. Son llamadas plantas C₄ y CAM, emplean variaciones de la ruta fotosintética normal para la fijación del CO₂ (Taiz & Zeiger, 2006). El maíz, la caña de azúcar, el sorgo y las suculentas pertenecen al grupo de plantas llamadas C₄.

Al estudiar las consecuencias del cambio climático sobre la agricultura existe el argumento generalizado que, dado sus manifestaciones de este, las consecuencias de dicho fenómeno son negativas. Sin embargo, Al lado de esta problemática, existe la posibilidad de que cultivos que son básicos en las dietas de países como México debido a sus características evolutivas como son su alta eficiencia en el proceso de fotosíntesis, características de genética molecular que las hacen capaces de mejorar su productividad de biomasa a la luz del llamado efecto “fertilización por carbono” por una mayor concentración de este gas de efecto invernadero en la atmosfera e incremento de la temperatura.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Determinar el efecto del cambio climático en la productividad de tres cultivos C₄ en México, a través del análisis de largo plazo de tres variables climáticas: concentración del dióxido de carbono en la atmosfera, temperatura y precipitación; para determinar el factor climático que más influye en la productividad de dichos cultivos.

1.4.2 Específicos

- Analizar el comportamiento histórico de tres variables climáticas: concentración del dióxido de carbono en la atmosfera, temperatura y precipitación para confirmar la existencia de cambio climático.
- Examinar el efecto del cambio climático sobre la agricultura de México a través de tres variables: concentración de CO₂ en la atmósfera, temperatura y precipitación bajo el enfoque de función de producción, para determinar el factor climático que más influye en la productividad agrícola a nivel nacional.
- Examinar el efecto del cambio climático sobre la productividad del maíz, caña de azúcar y sorgo a través de variables climáticas para estimar una función de producción para cada cultivo y determinar el factor climático que más influye en su productividad.

1.5 Hipótesis

- El cambio climático tiene efectos negativos sobre la productividad agrícola en México.
- Existe una relación directa entre la productividad de los cultivos C₄ y el incremento de la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera.
- Existe una relación inversa entre la productividad de los cultivos C₄ en México y los cambios en los patrones de precipitación y temperatura del país.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

En este apartado se analizan y los hallazgos encontrados en la literatura sobre los efectos del cambio climático en la agricultura de diversos países y en específico los efectos del cambio climático en los cultivos C₄.

De acuerdo con la literatura revisada, los autores utilizan varios métodos para estimar la relación existente entre el rendimiento de los cultivos y variables climáticas. McCarl *et al.* (2001) clasificaron los métodos de estimación existentes en dos enfoques: enfoque estructural y enfoque espacial. El enfoque estructural utiliza modelos para simular efectos, adaptaciones y consecuencias económicas del cambio climático. El enfoque espacial, consiste en simular los efectos del cambio climático en la agricultura basándose en las diferencias observadas en el valor de la tierra, la producción agrícola u otros costos relacionados con el clima. Las metodologías de función de producción y Ricardiano se basan en un enfoque espacial.

El enfoque de función de producción es el tradicional y se basa en funciones de producción empíricas o experimentales para predecir el daño ambiental. Este enfoque toma una función de producción subyacente y estima los impactos variando una o algunas variables de entrada, como temperatura, precipitación y niveles de dióxido de carbono (Mendelsohn *et al.*, 1994).

Por su lado el enfoque Ricardiano utiliza observaciones tanto climáticas como económicas para proyectar el impacto del cambio climático en la producción de los cultivos; este enfoque es mucho más completo que el tradicional porque toma en cuenta la adaptación de los productores al cambio climático (Mendelsohn *et al.*, 1994). Maddison (2007), expone que este método tiene varias debilidades: no considera el efecto fertilización con CO₂ y supone que el nivel de tecnología y el conocimiento permanece constante (Maddison, 2007).

Adams (1989), pionero en el estudio de los efectos del cambio climático en la agricultura, generó dos proyecciones, uno de ellos refleja los cambios en las

condiciones climáticas, el segundo incluye los cambios climáticos y los efectos del aumento de las concentraciones de CO₂ en la fotosíntesis y la eficiencia en el uso del agua, de cultivos para trigo, maíz y soya. Las condiciones climáticas pronosticadas sugieren rendimientos reducidos. Cuando se simulan los efectos fertilizantes del aumento de CO₂ junto con el cambio climático, se mitigan las reducciones de rendimiento y, en algunos casos, aumentan sobre la línea de base. Stöckle *et al.* (2010), siguiendo la misma metodología, encontraron que el impacto del cambio climático en la agricultura del Este de Washington será generalmente leve a corto plazo, pero cada vez más perjudicial con el tiempo (las pérdidas potenciales de rendimiento alcanzarán el 25 % para algunos cultivos para fines de siglo). Sin embargo, esperan que la elevación de CO₂ proporcione una mitigación significativa, y resulte en ganancias de rendimiento para algunos cultivos.

Por otro lado, Mendelsohn *et al.* (1994) midieron el impacto económico del clima en los precios de la tierra utilizando el modelo Ricardiano y encontraron que en un escenario de calentamiento global el impacto estimado es mucho menor que el enfoque tradicional. Desarrollaron esta nueva técnica que corrigió el sesgo en la técnica de función de producción mediante el uso de datos económicos sobre el valor de la tierra. Llamaron a esto el enfoque Ricardiano, en el que, en lugar de estudiar los rendimientos de cultivos específicos, examinaron cómo el clima en diferentes lugares afecta la renta neta o el valor de las tierras agrícolas. Al medir directamente los precios o los ingresos agrícolas, tienen en cuenta los impactos directos del clima en los rendimientos de diferentes cultivos, así como la sustitución indirecta de diferentes insumos, la introducción de diferentes actividades y otras adaptaciones potenciales a diferentes climas. Encontraron que las temperaturas más altas en todas las estaciones, excepto el otoño, reducen los valores promedio de las granjas, mientras que una mayor precipitación fuera del otoño aumenta los valores de las granjas.

Schlenker *et al.* (2006), se basan en un enfoque Ricardiano, relacionaron los valores de las tierras agrícolas con las variables climáticas, del suelo y

socioeconómicas de los condados al Este de EE.UU. Encontraron grandes diferencias regionales. Los condados del Norte, que actualmente experimentan climas fríos, se benefician hasta en un 34 % del calentamiento previsto, mientras que otros en los estados del Sur más cálidos enfrentan disminuciones en el valor de las tierras de cultivo de hasta el 69 %.

Maddison *et al.* (2007), basándose en el enfoque Ricardiano estimaron los efectos del cambio climático en la Agricultura de África tomando en cuenta la adaptación de los agricultores ante dicho fenómeno. Plantean que, la agricultura africana es vulnerable al cambio climático, aún con adaptación perfecta, con pérdidas cercanas al 30 %. Por otra parte, los impactos en la productividad son menos pronunciados porque el clima es menos extremo, pero estos impactos serán parcialmente compensados por el efecto de fertilización con dióxido de carbono.

De igual manera, Mendelsohn *et al.* (2009), utilizaron el enfoque Ricardiano y encontraron diferencias en los efectos del incremento de la temperatura y cambios en la precipitación, estas diferencias dependían del tamaño de las granjas.

Mora *et al.* (2010), utilizaron las metodologías de función de producción y Ricardiano para examinar los efectos del cambio climático sobre la producción agrícola de Panamá. Los cultivos que examinaron fueron el maíz, el arroz y el plátano. Los resultados sugieren la presencia de rendimientos decrecientes en las funciones de producción. A bajos niveles de temperatura o precipitación se estimula la producción, pero a partir de cierto nivel, la producción empieza a decrecer.

Black *et al.* (2012), realizaron un estudio con un enfoque espacial que consideró dos regiones, una en Brasil y la otra en Ghana. Simularon el crecimiento del cultivo de caña de azúcar para calcular los requisitos de riego tanto para las condiciones climáticas actuales como para un escenario en el que la temperatura media se eleva en 4 °C y los niveles de dióxido de carbono se duplican.

Encontraron que, en la región de Ghana, siempre que haya suficiente riego, es posible generar aproximadamente el 75 % del rendimiento alcanzado en la región de Brasil. Muestran que duplicar el CO₂ mitiga el grado de estrés hídrico asociado con un aumento de 4 °C en la temperatura.

Berg *et al.* (2013), basándose en el enfoque espacial, simularon el rendimiento potencial de cereales tropicales C₄, para proyectar los impactos del cambio climático en los rendimientos en una región tropical de África e India. También analizaron el efecto del dióxido de carbono en la atmósfera sobre el rendimiento de los cultivos. Como resultado obtuvieron que la productividad del mijo en general disminuirá, en promedio en un 6 %.

Mendelsohn *et al.* (2007), demuestran la relación existente entre el ingreso per cápita rural total y el clima en los Estados Unidos y en Brasil. El estudio encuentra que el ingreso total (agrícola y no agrícola) en condados rurales y municipios en los Estados Unidos y Brasil se ve afectado por el clima. El estudio demuestra que este efecto del ingreso se debe a cambios en el valor neto de la agricultura. Las regiones con mejores climas para la agricultura mantienen mayores ingresos rurales y las regiones con climas pobres tienen más pobreza rural. Los resultados también sugieren que el calentamiento global probablemente aumentará la pobreza rural.

Nelson *et al.*, (2009), se basaron en el enfoque estructural, realizaron estimaciones sobre los impactos del cambio climático en la producción, consumo, precios y comercio agrícolas, proyectando además los posibles costos de adaptación. Como resultados encontraron que en los países en vías de desarrollo el cambio climático reducirá el rendimiento de los cultivos más importantes. Traerá como consecuencia un aumento de precios de los principales cultivos como el arroz, trigo, maíz y soya.

De La Torre *et al.* (2009), realizaron un estudio para América Latina y El Caribe, concluyeron que el impacto del cambio climático será diferente a lo largo de los países y regiones latinoamericanas, no solo por sus niveles diferenciados de

exposición a los impactos climáticos, sino también por sus distintas habilidades para adaptarse. Las naciones del Caribe probablemente reciban impactos en diversos frentes, incluyendo desastres naturales más intensos y la muerte paulatina de los ecosistemas marinos. Como resultado, esas naciones corren el peligro de sustanciales pérdidas económicas. Otros países experimentarán consecuencias negativas sólo en algunas regiones y, en algunos casos, efectos potencialmente positivos que se beneficiarían por el aumento de la temperatura y las precipitaciones.

La OIA (2013), investigó la relación existente entre el rendimiento de los cultivos azucareros y el cambio climático. Examinó los cambios a largo plazo en las precipitaciones y temperaturas, y los rendimientos remolacheros/cañeros. Utilizó un modelo doble logaritmo para valorar el impacto individual de la temperatura y precipitación sobre el crecimiento de los rendimientos de la remolacha azucarera/caña de azúcar. El modelo arrojó que las subidas de temperatura son determinantes del crecimiento de rendimientos tanto en países productores de remolacha como de caña. Un aumento de 1° C en la temperatura media local aumentaría los rendimientos remolacheros en un 2.7 % en Francia, un 1.99 % en Suffolk, Reino Unido, en un 1.47 % en Países Bajos, en un 0.88 % en Fargo (EE. UU.) y en un 1.15 % en el norte de Alemania. No hay vínculos significativos entre los cambios en los patrones de precipitaciones y los rendimientos remolacheros, aunque hay resultados positivos y ligeramente significativos para China, Reino Unido, Rusia, Austria y Turquía, y negativos para Bélgica y Japón.

Chen *et al.* (2016), utilizaron datos meteorológicos a pequeña escala, para estimar el vínculo entre el clima y los rendimientos de maíz y soya en China. A diferencia de otros estudios dentro de las variables climáticas además de la temperatura y la precipitación incluyeron la radiación. También se incluyen dos variables para reflejar el cambio en la calidad del suelo, y controlaron factores que podrían afectar el rendimiento promedio de los cultivos del condado, como el uso de insumos y comportamientos de adaptación climática de los agricultores. Encontraron que: existen relaciones no lineales e invertidas en forma de U entre

los rendimientos de los cultivos y las variables climáticas; el calentamiento global ha causado una pérdida económica de aproximadamente \$ 820 millones para los sectores de maíz y soya de China en la última década; y se prevé que los rendimientos de maíz y soya disminuyan en un 3-12 % y un 7-19 % en 2100.

Burke & Emerick (2016), estudiaron el efecto del cambio climático en la productividad agrícola ante variaciones a largo plazo de las precipitaciones y temperatura en Estados Unidos. Encontraron que la productividad de los cultivos primarios de Estados Unidos (maíz y soya), se ven afectadas por estas tendencias climáticas a largo plazo. Para el maíz sugiere que pasar un solo día a 30 °C en lugar de los 29 °C óptimos reduce los rendimientos al final de la temporada en aproximadamente 0.5 %. La magnitud de este efecto depende de las adaptaciones hechas por los agricultores durante el período de estimación de 20 años.

Zhang *et al.* (2017), evalúan el impacto económico del cambio climático en la agricultura de China, para ello utilizan variables climáticas adicionales a otros estudios ya que el cambio climático cambia la distribución de un conjunto de variables climáticas, incluidas la temperatura, precipitación, humedad, velocidad del viento, duración de horas luz y evaporación. Utilizando los datos agrícolas a nivel de condado desde 1980 hasta 2010 en China, encontraron que esas variables climáticas adicionales, especialmente la humedad y la velocidad del viento, son críticas para el crecimiento del cultivo. Por lo tanto, omitir esas variables es probable que sesgue los impactos predichos del cambio climático en los rendimientos de los cultivos. En particular, omitir la humedad tiende a predecir demasiado costo del cambio climático en los rendimientos de los cultivos, mientras que ignorar la velocidad del viento es probable que subestime el efecto. Es probable que el cambio climático disminuya los rendimientos de arroz, trigo y maíz en China en 36.25, 18.26 y 45.10 % para finales de este siglo.

Recientemente Asseng *et al.* (2018), realizaron un estudio sobre los efectos combinados de CO₂, agua, nitrógeno y temperatura en la concentración proteína en el trigo, para las principales regiones productoras de trigo en el mundo.

Demostraron que las adaptaciones al cambio climático que benefician el rendimiento de grano no son necesariamente positivas para todos los aspectos de calidad de grano para la nutrición humana, particularmente en regiones de cultivo de temporal y de bajos insumos. Muchas de las regiones que probablemente se verán negativamente afectados son las regiones de baja y media latitud que son menos resistentes al cambio climático, donde las poblaciones están creciendo y la demanda de alimentos está aumentando rápidamente.

Huong *et al.* (2018), utilizaron el enfoque Ricardiano para explorar las implicaciones del cambio climático en la agricultura en el área noroeste de Vietnam teniendo en cuenta las adaptaciones de los agricultores. El estudio encontró que la relación entre los ingresos del hogar y las variables climáticas son relaciones no lineales significativas e invertidas en forma de U entre las dos estaciones. Los ingresos netos disminuyeron a medida que aumentaron la temperatura y las precipitaciones en la estación seca. Se prevé que los ingresos netos disminuyan alrededor del 17.7-21.28 % debido al cambio climático en 2050 y 2100, sin un modelo de adaptación. Los ingresos netos serían pérdidas de alrededor de 0.20-0.37 % en 2050 y 2100 con el modelo de adaptación.

En México existen estudios sobre el impacto del cambio climático en la agricultura entre ellos se encuentra la investigación realizada por Mendelsohn *et al.* (2009). Mediante un análisis Ricardiano encontró que los efectos marginales de temperatura para las granjas grandes son mayores que los efectos marginales para las granjas pequeñas. Temperaturas anuales más altas reducen el valor de las tierras agrícolas con superficies grandes en un 32 % por °C y reducen la pequeña granja 11 % por °C. Los efectos del aumento de las precipitaciones son más grandes para granjas pequeñas que para granjas grandes. El aumento de las lluvias reduce el valor de las tierras de las granjas grandes en 0.6 % por mm / mes y reduce el valor de la tierra en granjas pequeñas en 1.6 % por mm / mes. Las diferencias en la sensibilidad climática entre las granjas pequeñas y grandes pueden reflejar especialización por un lado y la capacidad de encontrar sustitutos

en el otro. Los escenarios futuros de cambio climático podrían afectar las tierras de cultivo en México, sin embargo, dichos efectos pueden variar según los climas existentes en México. Los modelos predicen pérdidas promedio de entre 42 y 50 % del valor de la tierra.

Bravo *et al.* (2012), realizaron un estudio en México para determinar las implicaciones del cambio climático sobre el cultivo de caña de azúcar. Declaran que los aumentos de temperatura incrementarán la evapotranspiración del cultivo de caña de azúcar en la región, aumentando las necesidades de riego en algunas áreas. Los incrementos en la temperatura máxima media anual tendrán efectos positivos sobre la producción de este cultivo desde el escenario actual al escenario 2041-2050, cuando se espera alcanzar los 32.5 °C; para el escenario 2051- 2060, se registrará un descenso en el rendimiento al ubicarse la temperatura máxima en 32.9 °C. Ante el aumento de la temperatura mínima, se espera que la caña de azúcar presente problemas de maduración (las plantas acumularán menos sacarosa). Así mismo, se incrementará la incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo.

La adaptación de los agricultores al cambio climático es importante para la mitigación de los efectos negativos que ocasiona en la producción. Orozco *et al.* (2019), evaluaron la percepción del cambio climático de los productores de Maíz de temporal en Tlaxcala, México. Las estrategias que han adoptado los agricultores ante las variaciones del clima son el cambio en las fechas de siembra, selección de semilla nativa resistente a la sequía y uso de abonos orgánicos para minimizar los efectos del clima. Confirmaron que, entre las regiones de análisis, la percepción es similar con relación a los efectos del cambio climático, y que en los últimos años los efectos se han acentuado más. Estos han obligado a los productores a implementar diversas estrategias para continuar con la producción de maíz y, a la vez, conservar el germoplasma de semillas nativas.

Las plantas terrestres se pueden clasificar en tres tipos fotosintéticos: C₃, C₄ y CAM (Raya & Aguirre, 2008). La vía C₄ involucra mecanismos especializados que permiten a las plantas adaptarse a zonas donde existe una limitada disponibilidad

de agua, ya que evolutivamente han desarrollado estrategias para reducir el proceso de fotorrespiración (Ahumada *et al.*, 2014). Entre los cultivos C₄ se encuentran el maíz, el sorgo y la caña de azúcar, las suculentas también son plantas C₄, sin embargo, en este caso no son de interés para la investigación.

Existe discrepancia en los resultados de las investigaciones sobre los efectos del cambio climático en la productividad de dichos cultivos.

Hatfield *et al.* (2011), señala que al duplicar el CO₂ provocó un aumento de aproximadamente el 30 % en el rendimiento reproductivo de las especies C₃ y un aumento menor al 10 % para las especies C₄. Así mismo, Stöckle *et al.* (2010), menciona que el efecto beneficioso del CO₂ elevado es más significativo para los cultivos con la vía fotosintética C₃ y menor para cultivos con vía fotosintética C₄ (por ejemplo, maíz y sorgo).

Por su parte, Black *et al.* (2012), estimaron la producción de caña de azúcar bajo un escenario de cambio climático con aumento de temperatura. Mostraron que duplicar el CO₂ mitiga el grado de estrés hídrico asociado con un aumento de temperatura de 4 °C. Sin embargo, Sindhu (2011), menciona que los cultivos C₄ no se benefician. Dado que estos cultivos se cultivan en los trópicos y señala el hecho de que sólo la producción agrícola en zonas templadas, será parcialmente compensado por los efectos beneficiosos del enriquecimiento con CO₂.

3. EL CAMBIO CLIMÁTICO EN MÉXICO Y SUS EFECTOS SOBRE LA AGRICULTURA

Tipo de manuscrito: artículo científico

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS SOBRE LA AGRICULTURA EN MÉXICO

Marisol **Hernández-Rodríguez**^{1*}, José Luis **Romo-Lozano**¹,
Gerónimo **Barrios-Puente**¹, Cristobal Martín **Cuevas-
Alvarado**²

¹Universidad Autónoma Chapingo. Dirección oficial:
Carretera México-Texcoco, Km. 38.5, Texcoco, Estado de
México, México. C. P. 56230.

²Consultor/investigador independiente: Dirección oficial:
Arboledas, 28, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.
C. P. 56230.

***Autor para correspondencia:** h.r.marysol@gmail.com

RESUMEN

El cambio climático es una de las mayores preocupaciones a nivel mundial y en especial en países en vías de desarrollo como México, en donde la agricultura es la principal actividad del medio rural. A modo de hipótesis se planteó que niveles altos de concentración de CO₂ en la atmósfera contribuye al incremento del rendimiento de los cultivos en México; mientras que el aumento de temperatura y la variación en las precipitaciones reducen su rendimiento. Utilizando el enfoque de función de producción, se examinó el efecto del cambio climático sobre la agricultura en México a través de la concentración de CO₂ en la atmósfera, temperatura y precipitación. Se determinó el factor climático que más influye en la productividad agrícola a nivel nacional. Se estimó un modelo econométrico tipo Cobb-Douglas por el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios con una significancia estadística ($p \leq 0.05$). El factor climático que más influye en la producción agrícola a nivel nacional es la concentración de CO₂ en la atmósfera con una relación directa, si el CO₂ se incrementa en 1 %, el rendimiento agrícola aumentará en 0.46 %. En México, el maíz y la caña de azúcar, dos de los tres cultivos más importantes en cuanto al valor de la producción son plantas con vía fotosintética C₄. Éstos se benefician del efecto fertilización del CO₂ y disminuyen el impacto negativo del cambio climático; no obstante, en los últimos treinta años

Citation: Apellido-Apellido NN,
Apellido-Apellido NN, Apellido-
Apellido N, Apellido-Apellido N.
2022. Título del artículo.
Agrociencia
<https://doi.org/10.47163/xxx>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez-Merino

Received: month, year.
Approved: month, year.
Published in Agrociencia #: #-#. 2022.

This work is licensed under a
Creative Commons Attribution-
Non- Commercial 4.0 International
license.



Los autores no deben realizar
ningún cambio en este apartado.

las emisiones de CO₂ a nivel global se incrementaron en promedio en un 0.5 % anual. Si en el corto plazo su crecimiento sigue la misma conducta, la temperatura también seguirá en incremento, los patrones de lluvia se modificarán y la producción agrícola se verá afectada de manera negativa.

Palabras clave: CO₂, índice de producción agrícola, temperatura, precipitación, cultivos C₄.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático (CC) es una de las mayores preocupaciones a nivel mundial, en las últimas décadas las modificaciones en el clima han causado impactos en los ecosistemas, la sociedad y los sectores productivos (SEMARNAT, 2016). Ésta preocupación se intensifica en los países en vías de desarrollo porque dependen más de la agricultura y poseen menos capital para tomar medidas de adaptación (López y Hernández, 2016).

El CC se debe al incremento de la concentración de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera provocando un aumento en la temperatura del planeta y una modificación de los patrones de lluvia (Medina *et al.*, 2016). La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales informó que el cambio en el clima ha ocasionado una disminución en el rendimiento de los cultivos de trigo y maíz en muchas regiones a nivel global. A nivel nacional se ha observado un incremento en la temperatura; variaciones regionales en la precipitación; elevación del nivel del mar; aumento de ciclones, tornados y sequías; los suelos menos productivos. Lo anterior trae consigo importantes consecuencias económicas y sociales (SEMARNAT, 2019).

De acuerdo con el INEGI (2022) la agricultura es el principal componente del sector primario, en 2021 aportó el 62 % del PIB de éste sector y es la actividad fundamental del medio rural en donde habitan el 21 % de la población nacional; además de ello la agricultura cumple con múltiples funciones (FAO, 2009); de acuerdo con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2015) el desarrollo agrícola es un punto clave para el crecimiento económico sustentable del país y en la reducción de la pobreza. El INECC (2018) declaró que con base en los escenarios futuros se prevé que en México se presente una disminución de la productividad del maíz para la década de 2050, por lo tanto, investigar el efecto del cambio climático en la agricultura resulta de interés.

En la actualidad existen varios métodos para estimar la relación existente entre el rendimiento de los cultivos y variables climáticas, Fernández (2013) clasifica éstos enfoques

en estructural y espacial; afirma que el primero utiliza modelos para simular efectos, adaptaciones y consecuencias económicas del cambio climático; mientras que el segundo consiste en simular el resultado del cambio climático en la agricultura basándose en las diferencias observadas en el valor de la tierra, la producción agrícola u otros costos relacionados con el clima.

Adams (1989), pionero en el estudio de los efectos del cambio climático en la agricultura, utilizó el enfoque espacial en condados estadounidenses, duplicando el CO₂ y encontró que cuando se simulan los efectos fertilizantes del incremento de CO₂ junto con el cambio climático, se mitigan las reducciones de rendimiento y, en algunos casos, aumentan sobre la línea base. Stöckle *et al.* (2010) siguiendo la misma metodología, encontraron que el impacto del cambio climático será leve en el corto plazo, pero cada vez más perjudicial con el transcurso del tiempo. Sin embargo, esperan que la elevación de CO₂ proporcione una mitigación significativa en la reducción del rendimiento de los cultivos y resulte en incremento para otros.

El enfoque Ricardiano fue desarrollado por Mendelsohn, Nordhaus y Shaw en 1994 para estimar el efecto de las variables climáticas sobre el precio de la tierra agrícola. Concluyeron que el calentamiento global podría tener beneficios económicos para la agricultura. Ésta metodología corrige el sesgo del enfoque de función de producción incorporando el valor de la tierra. Encontraron que el impacto estimado del calentamiento global en la agricultura es menor que el obtenido con el enfoque de función de producción (González y Galera, 2014).

Se analizó el comportamiento de las variables climáticas a nivel global y nacional durante el periodo de estudio. El objetivo principal de ésta investigación fue examinar el efecto del CC sobre la agricultura de México a través de tres variables: concentración de CO₂ en la atmósfera, temperatura y precipitación bajo el enfoque de función de producción. Se determinó el factor climático que más influye en la productividad agrícola a nivel nacional. Como hipótesis se planteó que el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera contribuye al incremento de la productividad agrícola en México, mientras que los aumentos de temperatura y los cambios en las precipitaciones reducen el rendimiento de los cultivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para estimar el modelo econométrico se recopiló información de 35 años. La Organización Meteorológica Mundial asevera

que los efectos del cambio climático se ponen de manifiesto en el largo plazo y lo define como aquel horizonte de tiempo de 30 años o más.

Para la variable dependiente se utilizó el Índice de Producción Bruta de FAO (base 2014-2016) para la agricultura en México. Éste contempla a 106 cultivos y muestra el nivel relativo del volumen global de producción agrícola para cada año en comparación con el período base. Contempla la producción cosechada en los campos y huertos en la modalidad de riego y de temporal en conjunto, no existe un índice para cada tipo de agricultura.

México cuenta con un inventario nacional de gases y compuestos de efecto invernadero para el periodo 1990-2019, la contribución del país a las emisiones globales en el año 2016 fue tan solo del 1.4 %. En ese mismo año de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, cinco países fueron responsables del 57.6 % del CO₂ emitido a nivel mundial por consumo y quema de combustibles fósiles: China, Estados Unidos, Rusia, Japón e India (SEMARNAT 2019). Por lo tanto, para la variable independiente CO₂ se utilizó la emisión mundial de CO₂, éste volumen equivale a más del 70 % del total de GEI y es para el cual se cuenta con información más confiable y homogénea a nivel mundial” (SEMARNAT, 2016). Los datos utilizados corresponden a las observaciones de CO₂ tomadas en el observatorio Mauna Loa, Hawaii, EE.UU. Se considera que Mauna Loa es uno de los lugares más favorables de medición atmosférica. La posible contribución de la vegetación o de actividades humanas, sobre la concentración de éste gas, son mínimas y la influencia de los volcanes puede ser excluida de los registros. Debido a que el CO₂ es un gas que se dispersa fácilmente en la atmósfera, las mediciones hechas en cualquier parte del mundo se consideran representativas (Keeling *et al.* 2021).

Para las variables de temperatura se utilizaron máxima, media y mínima promedio en °C de cada año y para la variable precipitación se utilizó la acumulada en mm, ambas corresponden a información nacional y se obtuvieron del SMN (Servicio Meteorológico Nacional) dependiente de CONAGUA (Comisión Nacional del Agua).

Se realizaron los análisis estadísticos de raíz unitaria y de estacionariedad para las variables explicativas mediante las pruebas de Dickey-Fuller, Phillips-Perron y KPSS. Para el CO₂, temperatura y precipitación resultaron series de tiempo no estacionarias. Se eliminó la tendencia utilizando $\nabla \text{CO}_2 = \text{CO}_2_{(t)} - \text{CO}_2_{(t-1)}$, $\nabla T = T_{(t)} - T_{(t-1)}$ y valor absoluto de $\nabla P = P_{(t)} - P_{(t-1)}$.

A continuación, mediante el enfoque de función de producción se examinó el efecto de los cambios anuales de concentración de CO₂ en la atmósfera, temperatura y precipitación sobre la productividad agrícola de México. Se estimó un modelo econométrico por el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), a través del paquete estadístico SAS. Se partió de una función tipo Cobb-Douglas transformada en lineal mediante una función doble log. La variable dependiente es el rendimiento agrícola (Y) y las explicativas son CO₂, Temperatura (T) y Precipitación (P). Los β_1 , β_2 y β_3 son los estimadores de cada variable. α es el coeficiente estimado de la constante, es decir, la respuesta a otros factores tales como los cambios tecnológicos y en materia de política. ε representa el término error (efectos no observables).

El modelo lineal estimado para el rendimiento agrícola en México con las variables climáticas explicativas se presenta en la Ecuación 1:

$$\ln Y = \alpha + \beta_1 \ln CO_2 + \beta_2 \ln T + \beta_3 \ln P + \varepsilon \quad (1)$$

Se determinó la bondad de ajuste del modelo econométrico mediante el coeficiente de determinación (R^2) para observar en qué proporción la variación de la variable dependiente se explica por las variables independientes. El *p-valor* asociado al valor del estadístico *t* es ≤ 0.05 , por lo tanto, los parámetros estimados por el modelo econométrico tienen significancia estadística.

Los coeficientes estimados se interpretaron como elasticidades: cuando el CO₂ varía en 1 %, la producción agrícola se modifica en β_1 % y de igual manera para la temperatura y precipitación con sus respectivos estimadores.

La investigación puede subestimar los efectos del cambio climático sobre la agricultura, puesto que no se toma en cuenta la respuesta de los agricultores ante dicho fenómeno, como por ejemplo modificación de patrón de cultivos, uso de semillas mejoradas u otros insumos agrícolas, así como variaciones en las fechas de inicio de siembra, acciones que contrarresten los efectos negativos de éste fenómeno.

Otra limitación de estudio es la generalización de los resultados tomando en cuenta que se utilizó los índices de producción agrícola de la FAO a nivel nacional, el cual contempla 106 cultivos entonces los resultados no explican el efecto del cambio climático sobre la agricultura por regiones. Tampoco se incluyen indicadores de sensibilidad y exposición a fenómenos meteorológicos extremos.

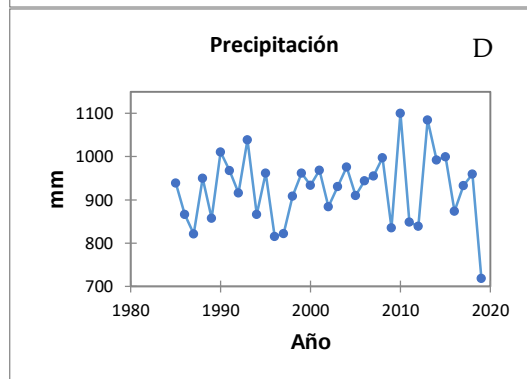
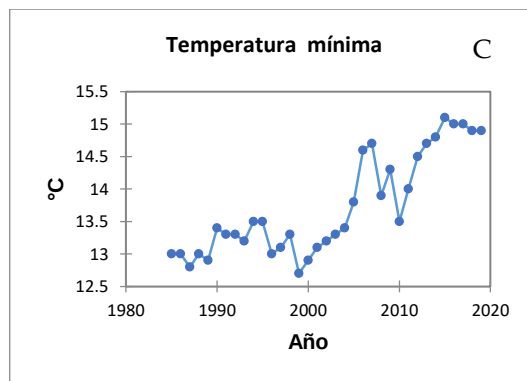
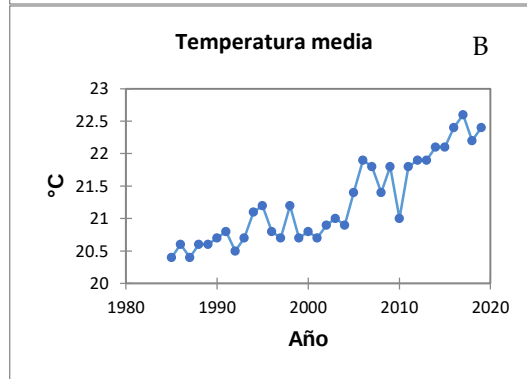
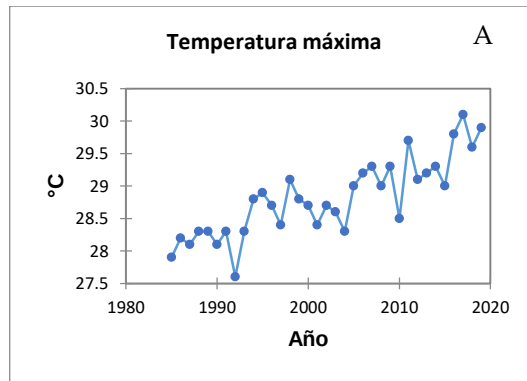
Análisis de datos

Con base a la NASA (2021), los años más calurosos a nivel mundial fueron 2016 y 2020. La variación de la temperatura en el año 2020 fue de 1.02 °C con respecto al periodo base (1951-1980) y en el año 2016 se tuvo una elevación de cerca de 1 °C. Del año 1940 a 1976, la temperatura a nivel global presentó aumentos y disminuciones con respecto a la media mostrando que no existe calentamiento global. A partir del año 1977 a la fecha las variaciones han sido únicamente incrementos de temperatura con referencia al periodo base.

Los años más calurosos en México fueron 2020 y 2017, con una variación de temperatura con respecto a la media (1951-1980) de 1.6 y 1.5 °C (FAO, 2021). De acuerdo a la CONAGUA (2021), las temperaturas (máxima, media y mínima) de México presentaron una tendencia creciente durante el periodo de estudio (Figura 1A, 1B, 1C). Los promedios fueron: máxima de 28.8 °C, media 21.3 °C y mínima 13.7 °C. Los extremos superiores se presentaron en 2017 para la máxima con 30.1 °C y en 2015 para la mínima con 15.1 °C (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de las variables.

Variable	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Índice de producción agrícola	52.360	112.520	77.175	18.067
Temperatura media	20.400	22.600	21.257	0.660
Temperatura máxima	27.600	30.100	28.814	0.595
Temperatura mínima	12.700	15.100	13.731	0.778
Precipitación	718.300	1100.418	925.321	80.050
CO ₂ global	345.903	411.400	375.339	19.521



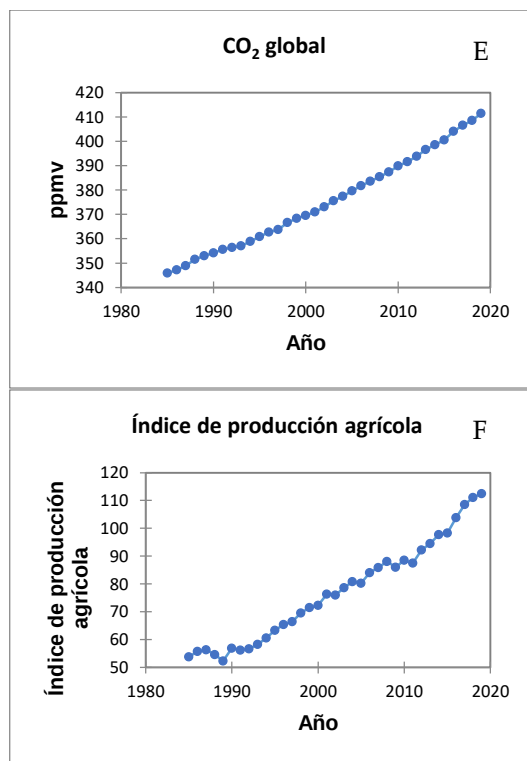


Figura 1. Comportamiento de las variables climáticas y la producción agrícola en México.

Durante el periodo de estudio la precipitación promedio en México fue de 925 mm, según CONAGUA (2021). Su comportamiento no muestra un cambio de patrón, aunque si se presentan variaciones de un año a otro. El año 2010 fue el más lluvioso del periodo con una precipitación media de 1100 mm, mientras que el año con menos lluvia fue 2019, con un promedio de 718 mm. (Figura 1D).

La serie histórica existente de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera se divide en dos periodos. La información del año 1010 al 1955 proviene de muestras de hielo y de 1959 al 2019 corresponden a mediciones directas de la atmósfera. Según registros del SNIARN (2021) en el año 1010 la concentración de dióxido de carbono fue de 279.5 ppmv, durante la época preindustrial se mantuvo alrededor de 280 y en el año 2018 fue 408.6. En el año 2018 se emitieron en el mundo 33 513 millones de toneladas de CO₂ por la quema de combustibles (Figura 1E). Los principales países emisores fueron China con el 28.43 %, Estados Unidos con el 14.68 %, India con el 6.89 %, Rusia con el 4.74 %, Japón con el 3.22 % y Alemania con el 2 %. En conjunto emitieron el 60 % de las emisiones totales del mundo, las demás naciones emiten menos del 2 %. México emitió 448.5 millones de toneladas de CO₂ (1.34 %) (IEA, 2021).

México cuenta con un Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, el más actualizado posee información para el periodo 1990-2015 y contabiliza el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), los hidrofluorocarbonos (hfc), y el hexafluoruro de azufre (SF_6).

En el año 2015, el CO_2 fue el gas con la mayor contribución a las emisiones nacionales con 71.97 %, seguido del CH_4 con 20.32 % y 5.9 % de N_2O . Estos tres gases representan el 98.1 % de los GEI totales. El 1.8 % restante se atribuye a los hfc y al SF_6 . En ese mismo año, el sector energía generó el 71 % de las emisiones totales, la ganadería el 10 %, y el 19 % corresponde a procesos industriales, usos de productos, residuos, fuentes agregadas y distintas al CO_2 de la tierra (INECC, 2018).

Las emisiones de CO_2 en México, correspondientes a la quema de combustible durante el periodo 1989-2012, presentan una tendencia creciente. En los años 2013 y 2014 disminuyó un poco. Del año 2015 al 2018 aumentó, aunque a un ritmo menos acelerado.

El índice de producción agrícola en México presenta una tendencia creciente, su valor mínimo fue de 52.36 en el año 1989, y el máximo fue de 112.52 en 2019 (Figura 1F).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimación del modelo econométrico para el índice de producción agrícola en México

Para determinar el efecto individual de los cambios anuales de temperatura, precipitación y CO_2 sobre el rendimiento agrícola en México se estimaron los modelos econométricos 1, 2, 3, 4 y 5 (Cuadro 2). La variable climática que mejor explica la producción agrícola del país es el dióxido de carbono, el R^2 es de 0.36 y es más alto que en los modelos 2, 3, 4 y 5. El dióxido de carbono explica el 36 % de la producción agrícola. El CO_2 y temperatura máxima tuvieron un $p\text{-valor} \leq 0.05$ %.

De manera global, según resultados de la estimación para determinar la función de producción agrícola en donde se incluyeron como variables dependientes el dióxido de carbono, la temperatura máxima y la precipitación, éstas últimas explican cerca del 58 % de la varianza del índice de producción agrícola en México, pues R^2 ajustada fue de 0.5782. El valor crítico de F es < 0.0001 lo que significa que existe relación lineal significativa entre la productividad agrícola y el conjunto de variables independientes.

Cuadro 2. Estimaciones para determinar el factor climático que más influye en la producción agrícola en México.

Variables	Estimación 1	Estimación 2	Estimación 3	Estimación 4	Estimación 5
Intercepto	4.083	4.398	4.356	4.352	4.434
Ln CO ₂	0.399 (4.315)*				
Ln T max		0.061 (2.359)*			
Ln T med			0.018 (0.810)		
Ln T Min				0.013 (0.720)	
Ln P					-0.027 (-0.662)
R ²	0.360	0.144	0.019	0.015	0.013
R ² ajustado	0.341	0.118	0	0	0
Valor crítico de F	0.0001	0.024	0.423	0.476	0.512

() estadístico *t* * *p*-valor ≤ 0.05 %

El análisis estadístico arrojó la información necesaria para construir la función doble-log correspondiente al índice de producción agrícola. Se observa que los estadísticos de *t* de las variables independientes son mayores a 2 en valor absoluto y su probabilidad es menor a 0.05 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Estimación de la función de producción agrícola.

Variable	Estimador del parámetro	Error estándar	Valor <i>t</i>	Pr > <i>t</i>
Intercepto	4.397	0.118	37.077	< 0.0001
lnT	0.072	0.018	3.998	0.0004
lnCO ₂	0.459	0.075	6.065	< 0.0001
lnP	-0.062	0.027	-2.279	0.0297

De acuerdo con los parámetros de la estimación, se obtuvo la función de producción agrícola (Ecuación 2).

$$\ln Y = 4.40 + 0.46 \ln CO_2 + 0.07 \ln T - 0.06 \ln P \quad (2)$$

El valor calculado de α representa la respuesta a otros factores tales como los cambios tecnológicos y de materia política, en este caso es 4.40. El valor calculado de β_1 es 0.46, éste coeficiente, indica que, si la temperatura y la precipitación se mantienen constantes, a un incremento de 1 % en la concentración de dióxido de carbono a nivel global, le corresponde en promedio, un aumento de 0.46 % en el índice de producción agrícola en México. La variable CO₂ tiene una relación directa con la productividad de los cultivos. El signo es el esperado, a mayor emisión de CO₂, la producción agrícola

aumenta. Los resultados de la investigación concuerdan con los estudios realizados en otros lugares. Las plantas utilizan el CO₂ y la luz del sol para llevar a cabo la fotosíntesis y transforman este dióxido de carbono en sacarosa, almidón o celulosa como lo afirman Taiz and Zeiger (2006). Las plantas se clasifican en C₃, C₄ y CAM, dependiendo del tipo de metabolismo fotosintético que efectúan (Carcia de Carvalho *et al.*, 2014); de acuerdo a Wahid (2004) las plantas C₃ con humedad y temperatura óptimas, se benefician del incremento del CO₂ atmosférico; Taiz y Zeiger (2006) señalan que las plantas C₄ y CAM en condiciones adversas (temperaturas altas y baja humedad) presentan menos transpiración y un uso más eficiente del agua y nutrientes. Sin embargo, a pesar de que el dióxido de carbono es benéfico para las plantas, si estas concentraciones siguen aumentando podría ser perjudicial para el rendimiento de los cultivos; el grado de vulnerabilidad dependerá del tipo de cultivo. Nereu y Cleber (2006) encontraron que el incremento de la temperatura del aire de 3, 6 y 2 °C puede anular los efectos beneficiosos del aumento de CO₂ en los rendimientos de trigo, soja y maíz en Brasil. Por su parte, Bravo-Ortega y Lederman (2005), argumentan que la agricultura en América Latina es neutral en lo que a emisiones de dióxido de carbono se refiere. Mientras que Rabbinge *et al.* (2007) afirman que, el enriquecimiento de CO₂ y el aumento de la temperatura traen consecuencias positivas sobre el rendimiento de los cultivos solo bajo condiciones óptimas de crecimiento. Por lo tanto, sigue siendo preocupante el incremento del dióxido de carbono en la atmósfera, puesto que la mayoría de los cultivos no se encuentran bajo esas condiciones óptimas de crecimiento.

El valor calculado de β_2 es 0.07 e indica que, si la concentración de dióxido de carbono a nivel global y la precipitación se mantienen constantes, a un incremento de 1 % en la temperatura máxima en México, le corresponde en promedio, un aumento de 0.07 % en el índice de producción agrícola en México. La variable temperatura tiene una relación directa con la productividad agrícola. Caicedo *et al.* (2021), afirman que los incrementos en la temperatura alargarían la estación de crecimiento de las plantas, en zonas donde el potencial del cultivo está hoy en día limitado por el frío, y en estas regiones el cambio climático podría verse como ventajoso para los cultivos. De la misma manera, Iglesias *et al.* (2011) afirman que para la agricultura española los cambios en la productividad dependerán de la región agroclimática y del tipo de cultivo. Para la región mediterránea se esperan impactos negativos mientras que en el resto de España se esperan efectos no tan severos (incluso efectos positivos). Por su parte, Feder *et al.*

(2010) destacan los efectos negativos para la mayoría de los cultivos, en especial en donde hay mayor escasez de agua. Tubiello y Rosenzweig (2008) afirman que, si el calentamiento continúa más allá de la mitad del siglo, la producción en todas las regiones del planeta se verá afectada de manera negativa. La vulnerabilidad de los países dependerá, entre otras cosas, de sus condiciones geográficas y del tipo de cultivos que produzcan o puedan producir (López y Hernández, 2016). Carrasco (2016) encontró que el rendimiento de quinoa en Perú se verá afectado cuando la temperatura sobrepase el umbral óptimo requerido para dicho cultivo.

Según el SIAP (2021), los cultivos más importantes en México en cuanto al valor de la producción para el año 2019 fueron: maíz grano, aguacate y caña de azúcar, en conjunto representaron cerca del 30 % del valor total de la producción nacional. El maíz y la caña de azúcar son cultivos con ciclo fotosintético C₄. Akiyoshi *et al.* (2016) señalan que éstas gramíneas tienen un elevado potencial de producción atribuido a la mayor eficiencia en el uso del agua en regiones tropicales de bajas latitudes, alta insolación y temperaturas elevadas. Orozco *et al.* (2019) expone las estrategias que han adoptado los agricultores ante las variaciones del clima. Éstas son: el cambio en las fechas de siembra, selección de semilla nativa resistente a la sequía y uso de abonos orgánicos para minimizar los efectos del clima. Por ésta razón, se puede afirmar que el rendimiento de los cultivos en México en su conjunto, aún no se ha visto perjudicado por el incremento de la temperatura.

El valor calculado de β_3 es -0.06. Si el CO₂ atmosférico y la temperatura máxima en México se mantienen constantes, a un cambio del 1 % en la precipitación nacional acumulada, le corresponde en promedio, una disminución del 0.06 % en el índice de producción agrícola. Éste resultado concuerda con Guajardo *et al.* (2018) ya que afirman que el exceso de precipitación puede disminuir la oxigenación en el suelo y la tasa de absorción de agua y nutrientes por el cultivo. Entre los posibles efectos del cambio climático están la variación en la frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, como los ciclones y la sequía. México, por su ubicación geográfica, condición climática y características socioeconómicas de la población, resulta vulnerable a estos fenómenos (SEMARNAT, 2016). Bahena *et al.* (2017) confirman que “los cambios en los regímenes de lluvias aumentan las probabilidades de fracaso de las cosechas a corto plazo y reduce la producción a largo plazo”. Recapitulando, la precipitación es un determinante de la producción agrícola, ésta puede tener efectos positivos o negativos sobre la

agricultura, cuándo las lluvias son superiores o inferiores a los parámetros requeridos por cada cultivo, el rendimiento agrícola disminuye.

Según el modelo estimado el factor climático que más influye en la producción agrícola a nivel nacional es la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera con una elasticidad de 0.46, le sigue la temperatura con 0.07 y por último está la precipitación con 0.06. Las tres variables son inelásticas. Cabe señalar que existe una relación directa entre el índice de producción agrícola y la concentración de CO₂ en la atmósfera al igual que con la temperatura; y se presenta una concordancia inversa con los cambios en los patrones de la precipitación.

De acuerdo con el modelo estimado doble-log, se obtuvo una función de producción tipo Cobb-Douglas (Ecuación 3).

$$Y = 81.45 CO_2^{0.46} T^{0.07} P^{-0.06} \quad (3)$$

Como $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 < 1$ ($0.46 + 0.07 - 0.06 = 0.47$) se plantea que dicha función de producción tiene rendimientos decrecientes a escala, esto indica que a medida que una de las variables (CO₂, temperatura o precipitación) aumenta, y el resto se mantiene constante, su productividad va decayendo. El producto marginal es positivo y decreciente.

Con base en la Ecuación 3, se obtuvo la función de producción univariada, manteniendo constantes la temperatura y la precipitación (Ecuación 4).

$$Y = 67.95 CO_2^{0.46}$$

(4)

En la gráfica correspondiente a dicha función se observa que los rendimientos marginales son positivos y decrecientes (Figura 2).

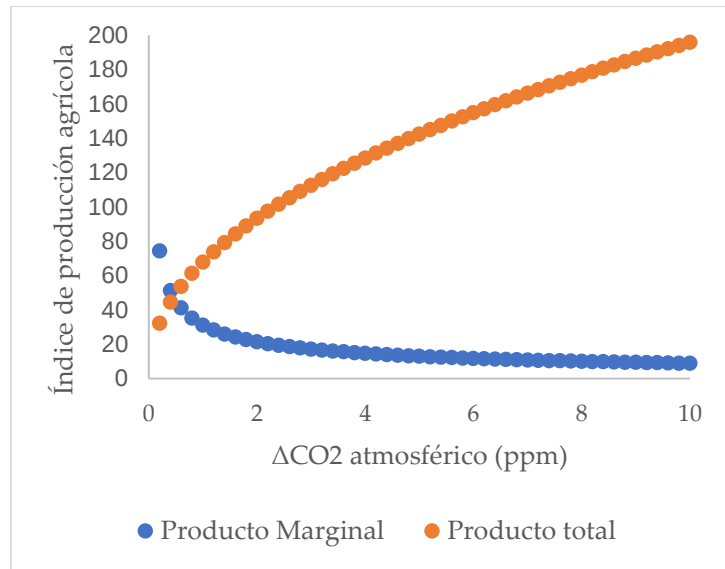


Figura 2. Producto marginal y función de producción agrícola con respecto al CO_2

El modelo univariado arroja que el incremento del CO_2 atmosférico es un determinante para el crecimiento de la productividad agrícola en México. Los rendimientos marginales son decrecientes. Llega un punto en el que el producto marginal de dicho factor productivo comienza a decrecer. Ante un aumento del CO_2 , se presenta un incremento de la temperatura y por consiguiente un cambio en los patrones de la precipitación modificando la productividad agrícola.

Manteniendo constantes el CO_2 y la precipitación se obtuvo la función de producción univariada para observar el comportamiento de la producción agrícola en función de la temperatura (Ecuación 5). Se mantuvieron constantes las variables utilizando los promedios de las emisiones globales y de las variaciones anuales del periodo de estudio.

$$Y = 81.71 T^{0.07} \quad (5)$$

De la ecuación 4 se obtiene la productividad agrícola de México en función de la temperatura máxima. Los rendimientos marginales son positivos y decrecientes (Figura 3). La temperatura es una variable que influye en la producción agrícola, sin embargo, para que ésta muestre un incremento, las emisiones de dióxido de carbono deben aumentar y también se presentará un cambio en los regímenes de lluvias.

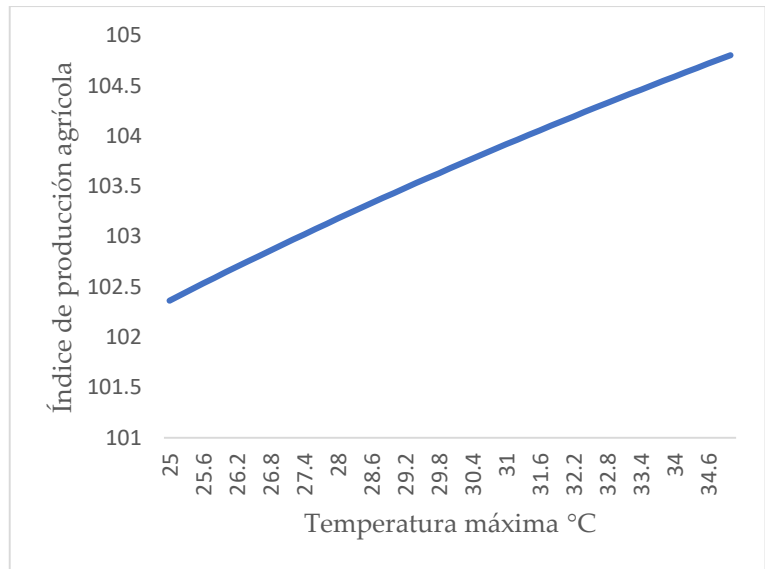


Figura 3. Función de producción agrícola con respecto a la temperatura.

Así mismo de la ecuación 3, se obtiene la función de producción agrícola con respecto a la precipitación, manteniendo constantes las emisiones globales de CO₂ y la temperatura (Ecuación 6).

$$Y = 135.2 P^{-0.06} \quad (6)$$

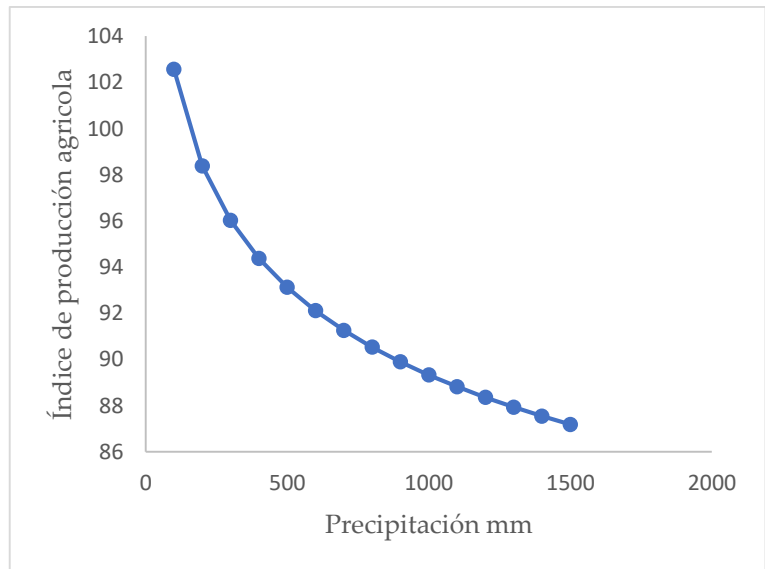


Figura 4. Función de producción agrícola con respecto a la precipitación

De acuerdo con la función de producción estimada, el incremento de la precipitación tiene una relación inversa sobre el índice de producción agrícola (Figura 4). Por lo tanto, la variación en los patrones de la precipitación como

consecuencia del cambio climático, tiene un efecto negativo sobre la producción agrícola en México.

CONCLUSIONES

Las estadísticas a nivel global y nacional muestran que en el periodo de estudio se han incrementado las emisiones de dióxido de carbono en la atmósfera, lo cual ha repercutido en el aumento de la temperatura y cambios en los patrones de precipitación.

La agricultura en México se ha visto beneficiada de los niveles altos del dióxido de carbono, por el efecto fertilización puesto que dos de los tres cultivos más importantes en cuanto al valor de la producción son plantas C₄ (maíz y caña de azúcar); la elevación de la temperatura tampoco ha perjudicado a la agricultura, sin embargo, los cambios en los patrones de la precipitación si redujeron el rendimiento agrícola.

Del año 1985 al 2019 las emisiones de dióxido de carbono por la quema de combustibles a nivel global han aumentado anualmente, si en los próximos años su crecimiento sigue la misma conducta, la temperatura se incrementará aún más, los patrones de precipitación se seguirán modificando y la producción agrícola se verá afectada de forma negativa.

REFERENCIAS

- Adams RM. 1989. Global climate change and agriculture: an economic perspective. *American Journal of Agricultural Economics* 71: 1272-1279. <https://www.jstor.org/stable/1243120> (Recuperado: julio 2021).
- Akiyoshi F, Maia G, Aparecida K, Costa C, De Lima PR. 2016. Phosphorus as a mitigator of the effects of water stress on the growth and photosynthetic capacity of tropical C₄ grasses. *Acta Scientiarum Agronomy* 38: 363-370. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303046073010> (Recuperado: febrero 2022).
- Bahena D, G, Castillo G A, Broa R E, Olvera S MD, Jaime H MA, García M F. 2017. Respuesta agronómica de maíces híbridos a la fertirrigación en Xalostoc, Morelos. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas* 8: 531-543. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.29>
- Bravo-Ortega C, Lederman D. 2005. Agriculture and national welfare around the world: casualty and international heterogeneity since 1960. Policy Research Working Paper 3499. World Bank, Washington, DC. © World Bank.

<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/8903> (Recuperado: septiembre 2022).

- Caicedo A, JC, Puyol C JL, López MC, Ibáñez J SS. 2021. Adaptabilidad en el sistema de producción agrícola: Una mirada desde los productos alternativos sostenibles. *Revista de Ciencias Sociales* 26(4): 308-327. <https://www.redalyc.org/journal/280/28065077024/html/> (Recuperado: febrero 2022).
- Carcia de Carvalho, CA, De Oliveira S E, Alves B M. 2014. Impact of climate change on plants, fruits and grains. *Revista Caatinga* 27(1): 205-212. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=237130153026> (Recuperado: febrero 2022).
- Carrasco C, F. 2016. Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de la quinua en el distrito de Juli, periodo 1997 - 2014. *Comuni@cción* 7(2): 38-47. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2219-71682016000200004&lng=es&tlng=es (Recuperado: septiembre 2022).
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2015. Cambio climático y actividades agropecuarias en América Latina. Naciones Unidas. Santiago de Chile. 74 p. http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39824/S1501286_es.pdf?sequence=1 (Recuperado: julio 2021).
- CONAGUA (Comisión de Nacional del Agua). 2021. Resúmenes mensuales de Temperaturas y lluvia. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias> (Recuperado: julio 2021).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2009. La FAO en México. Más de 60 años de cooperación 1945-2009. México. <https://www.fao.org/documents/card/es/c/5644342f-afe9-44ee-8063-6ea479a0d4bd/> (Recuperado septiembre 2022).
- FAO. 2021. FAOSTAT. Variación de temperatura. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/ET> (Recuperado: abril 2021).
- Feder G, Anderson JR, Birner R, Deininger K. 2010. Promises and realities of community-based agricultural extension. IFPRI Discussion Paper 00959. <http://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p15738coll2/id/794/filename/795.pdf> (Recuperado: septiembre 2022).

- Fernández, M E. 2013. Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de cultivos por sectores. Primer informe: estado del arte sobre la agricultura y el cambio climático. Fondo Financiero de proyectos de desarrollo e Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales. <http://glaciares.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Efectos+del+Cambio+Climatico+en+la+agricultura.pdf/3b209fae-f078-4823-afa0-1679224a5e85> (Recuperado: septiembre 2022).
- Gonzalez V, KD, Galera G KC. 2014. Efectos del cambio climático sobre la producción de papa en el municipio de Villapinzón (Cundinamarca-Colombia) a partir del enfoque Ricardiano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 5(1): 231-242. <https://doi.org/10.22490/21456453.958>
- Guajardo P, RA, Granados R GR, Sánchez C I, Barradas M VL, Gómez R JC, Díaz P G. 2018. Rendimientos de maíz (*Zea mays* L.) en escenarios de cambio climático en la región de La Antigua, Veracruz-México. *Agrociencia* 52(5): 725-739. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000500725&lng=es&tlng=es (Recuperado: septiembre 2022).
- IEA (International Energy Agency). 2021. CO2 Emissions from Fuel Combustion. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/greenhouse-gas-emissions-from-energy> (Recuperado: agosto 2021).
- Iglesias A, Quiroga S, Sotes V. 2011. La agricultura española y el cambio climático. *Economistas* 29 (127): 19-26. <https://privado.cemad.es/revistas/online/Revistas/0127.pdf/144> (Recuperado: septiembre 2022).
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2018. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015 en México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/226> (Recuperado: julio 2021).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2022. Sistema de cuentas nacionales de México. <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?tm=0#D494101> (Recuperado: septiembre 2022).
- Keeling, C. D., S. C. Piper, R. B. Bacastow, M. Wahlen, T. P. Whorf, M. Heimann and H. A. Meijer. 2021. Exchanges of atmospheric CO₂ and CO₂ with the terrestrial

- biosphere and oceans from 1978 to 2000. I. Global aspects. SIO Reference Series, No. 01-06, Scripps Institution of Oceanography. In: Scripps CO2 Program. Atmospheric CO2. http://scrippsco2.ucsd.edu/data/atmospheric_co2.html (Recuperado: julio 2021).
- López F, AJ, Hernández C D. 2016. Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El trimestre económico* 83(4): 459-496. <http://dx.doi.org/10.20430/ete.v83i332.231>
- Medina G, G, Ruiz C JA, Rodríguez M VM, Soria R J, Díaz P G, Zarazúa V P. 2016. Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(spe 13): 2465-2474. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263144472002> (Recuperado: febrero 2021).
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). 2021. Análisis de temperatura de superficie. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/ (Recuperado: abril 2021).
- Nereu A, S, Cleber M A, 2006. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41(9): 1351-1359. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000900002>
- Orozco B, H, H., Hernández V M, García J G, Suárez G G. 2019. Cambio climático: una percepción de los productores de maíz de temporal en el estado de Tlaxcala, México. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias* 8(16): 1-26. <https://doi.org/10.23913/ciba.v8i16.89>
- Rabbinge R, Van L HC, Goudriaan J. 2007. Assessing the greenhouse effect in agriculture. *Ciba Found Symp* 175: 62-76. <https://doi.org/10.1002/9780470514436.ch5>
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2016. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave de desempeño ambiental y de crecimiento verde. Edición 2015. Semarnat. México. 470 p. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf (Recuperado: julio 2021).
- SEMARNAT 2019. Informe de la situación del medio ambiente en México. Edición 2018. Semarnat. México. 487 p.

<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html> (Recuperado: julio 2021).

SIAP (Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera). 2021. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Recuperado: junio 2021).

SNIARN (Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales). 2021. Conjunto Básico del Desempeño Ambiental. Concentración global atmosférica de CO₂. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores19/conjuntob/indicador/01_atmosfera/1_2_4.html (Recuperado: julio 2021).

Stöckle, CO, Nelson RL, Higgins S, Brunner J, Grove G, Boydston R, Whiting M, Kruger C. 2010. Assessment of climate change impact on Eastern Washington agriculture. *Climatic Change* 102: 77-102. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9851-4>

Taiz, L, Zeiger E. 2006. Fisiología Vegetal. Publicaciones de la Universitat Jaume I. Tercera Edición. Castellon de la Plana, España.

Tubiello, FN, Rosenzweig C. 2008. Developing climate change impact metrics for Agriculture. *The Integrated Assessment Journal* 8(1): 165-184. <https://journals.lib.sfu.ca/index.php/iaj/article/view/2730> (Recuperado: septiembre 2022).

Wahid, A. 2004. Analysis of toxic and osmotic effects of sodium chloride on leaf growth and economic yield of sugarcane. *Botanical Bulletin of Academia Sinica* 45(2): 133-141. <https://ejournal.sinica.edu.tw/bbas/content/2004/2/Bot452-05.html> (Recuperado: septiembre 2022).

4. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCTIVIDAD DEL MAÍZ, CAÑA DE AZÚCAR Y SORGO EN MÉXICO (1985-2020)

DOI: XXXXXXXXXXXX

**Efectos del cambio climático en la productividad del Maíz, Caña de azúcar
y Sorgo en México (1985-2020)**

**Effects of climate change on the productivity of corn, sugar cane and
sorghum in Mexico (1985-2020)**

Marisol Hernández Rodríguez^{1*}, José Luis Romo Lozano¹, Gerónimo Barrios
Puente¹, Ignacio Caamal Cauich¹ y Omar Ortíz Barreto¹

¹ Posgrado, División de Ciencias Económico – Administrativas, Texcoco,
Universidad Autónoma Chapingo.

* Correo electrónico: h.r.marysol@gmail.com

*Autor de correspondencia

**Efectos del cambio climático en la productividad del Maíz, Caña de azúcar y
Sorgo en México (1985-2020)**

**Effects of climate change on the productivity of corn, sugar cane and sorghum
in Mexico (1985-2020)**

Resumen:

El cambio climático es una de las mayores preocupaciones a nivel mundial, tiene efectos en el medio ambiente y en los distintos sectores económicos. Una de las actividades económicas más vulnerables es la agricultura, las consecuencias sobre su productividad en general es negativo, sin embargo, en el caso de los cultivos C₄, el cambio climático podría ser favorable. El objetivo fue determinar el efecto del cambio climático en la producción de maíz, caña de azúcar y sorgo en México, mediante el enfoque de función de producción. Se estimaron modelos econométricos mediante Mínimos Cuadrados Ordinarios. Se encontró que el CO₂ incentiva la productividad del maíz y sorgo, por el contrario, tiene efectos negativos sobre la caña de azúcar. La precipitación tiene un efecto positivo sobre los tres cultivos. La temperatura media tiene una relación inversa con el rendimiento del maíz y una relación directa con la caña de azúcar y sorgo.

Palabras-clave: cultivos C₄, CO₂, temperatura, precipitación.

Abstract:

Climate change is one of the world's biggest concerns; it affects the environment and economic sectors. One of the most vulnerable economic activities is agriculture; the consequences on its productivity are generally negative; however, climate change

could be favorable in the case of C₄ crops. The objective was to determine the effect of climate change on the production of corn, sugar cane, and sorghum in Mexico through the production function approach. Econometric models were estimated using Ordinary Least Squares. It was found that CO₂ encourages the productivity of corn and sorghum; on the contrary, it has adverse effects on sugar cane. Precipitation has a positive effect on all three crops. The average temperature has an inverse relationship with corn yield and a direct relationship with sugar cane and sorghum.

Keyword: C₄ crops, CO₂, temperature, precipitation.

Recibido en dd/mm/aaaa

Aceptado en dd/mm/aaaa

Introducción

El cambio climático (CC) es el mayor desafío de nuestro tiempo, sus efectos son de alcance mundial, las pautas meteorológicas cambiantes amenazan la producción de alimentos (Naciones Unidas, 2021). El CC está en función del incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero, lo cual a su vez provoca cambios en los patrones de precipitaciones y temperaturas (Organización Internacional del Azúcar, 2013). El IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático) (2019) afirma que “desde el período preindustrial (1850 a 1900), la temperatura media observada del aire en la superficie terrestre ha aumentado bastante más que la temperatura media global en superficie (tierra y océano)”.

Una de las mayores preocupaciones a nivel mundial es la influencia que ha tenido y tendrá el cambio climático en los diferentes sectores económicos y sobre todo en países en vías de desarrollo (Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (FONADE) e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) 2013). La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2020) afirma que el aumento de la temperatura mundial y los cambios en la distribución de las precipitaciones ya han afectado a ecosistemas terrestres como los bosques y las praderas, así como a las tierras agrícolas y al rendimiento de los cultivos. Una de las actividades económicas más vulnerables ante el cambio climático es la agricultura: El cambio climático produce modificaciones tanto en la temperatura como en la precipitación y para la agricultura ambas variables desempeñan un papel determinante (Mora, Ramírez, Ordaz, Acosta & Serna, 2010). Asimismo, Bravo, Medina, Ruíz, Báez & Mariles (2012), afirman que la temperatura afecta diversos procesos del crecimiento: el desarrollo del sistema radicular, la velocidad de absorción de agua y nutrimentos,

la expansión de las hojas, la floración y el rendimiento. Por lo tanto, la productividad agrícola está determinada fundamentalmente por cuestiones climáticas, ello indica que los posibles acontecimientos relacionados con el cambio climático podrían influir de manera significativa en el sector agrícola y con ello afectar los tipos de cultivos, su producción y las frecuencias e intensidad de las cosechas (Maddison, Manley & Kurukulasuriya, 2007). Adams, Hurd & Reilly (1999), advierten que el cambio climático puede tener efectos positivos o negativos sobre el rendimiento de los cultivos y estos efectos dependerán de la ubicación geográfica y de la magnitud de los cambios en los factores climáticos. Aunado a esto, algunas plantas están especialmente adaptadas a la vida en entornos o estaciones del año particularmente secos, son llamadas plantas C₄ y CAM (Metabolismo Ácido de las Crasuláceas), emplean variaciones de la ruta fotosintética normal para la fijación del CO₂ y generalmente transpiran menos agua por molécula de CO₂ fijada (Taiz & Zeiger, 2006). Se les ha dado el nombre de plantas C₄ debido a que una molécula de cuatro carbonos desempeña un papel destacado en una ruta bioquímica que evita la fotorespiración, ésta ruta se denomina C₄ (Mckee & Mckee 2003). El maíz, la caña de azúcar, el sorgo y las suculentas pertenecen al grupo de plantas llamadas C₄.

De acuerdo a datos del INEGI (2022a), en el año 2020 el sector primario aportó el 3.5 % del PIB nacional, este sector es de gran importancia para la economía en general, para la sociedad y el medio ambiente. La agricultura es el principal componente del sector primario, y es la principal actividad del medio rural. El desarrollo agrícola es un punto clave para el crecimiento económico del país y para la reducción de la pobreza. México es un país particularmente vulnerable a los

impactos del cambio climático debido a su ubicación geográfica, su topografía y sus características socioeconómicas (SEMARNAT, 2018).

En México, el maíz es el cultivo más importante en cuanto al valor de la producción, en el año 2020, de acuerdo al Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2022), aportó el 18 % de la producción agrícola nacional. El maíz se cultiva en los 32 estados de la República Mexicana. La caña de azúcar ocupó el tercer lugar de importancia con respecto al valor de la producción, representó cerca del 8 % de la producción agrícola nacional. México cuenta con 50 ingenios azucareros, se ubican en 15 estados y en Veracruz se concentran 18 (CNIIA, 2021). En el año 2020, la producción de dicho estado representó el 34 % de la producción nacional. Por su lado, la producción de sorgo representó el 2.79 % del total agrícola nacional, se produce en 29 estados de la República Mexicana. Los principales estados productores son Tamaulipas y Guanajuato, con el 41, 19 % del total nacional (SIAP, 2022).

El objetivo principal de esta investigación fue determinar el efecto del cambio climático en la productividad de los tres cultivos C_4 más importantes, en cuanto a su valor de la producción en México, mediante el enfoque de función de producción; los resultados obtenidos servirán como base para planear acciones que mejoren la producción de dichos cultivos.

Como hipótesis se planteó que la productividad de los cultivos de maíz, caña de azúcar y sorgo tienen una relación directa con el CO_2 y la precipitación, mientras que con la temperatura y los cambios en la precipitación tienen una relación inversa. El cambio climático aún no tiene efectos negativos sobre dichos cultivos.

Materiales y métodos

Considerando el enfoque de función de producción, en este estudio se examinó el efecto de los cambios anuales de temperatura, precipitación y concentración de CO₂ sobre los rendimientos de los cultivos de maíz, caña de azúcar y sorgo. Se utilizó un modelo econométrico doble log para cada cultivo (Ecuación 1). Se recopiló información de 35 años (1985-2020); la OMM asevera que los efectos del cambio climático se ponen de manifiesto en el largo plazo (30 años o más) (IPCC, 2014). La información de los rendimientos de los cultivos se obtuvo del SIAP y se da en ton ha⁻¹, mientras que las series de precipitación y temperatura se consultaron en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Para la variable CO₂ se utilizó el volumen de emisión mundial de este gas, la SEMARNAT (2019) afirma que es representativo de la emisión total de GEI y equivale a más del 70 % de las emisiones totales. El observatorio Mauna Loa, Hawaii, EE.UU. es considerado uno de los lugares más favorables de medición atmosférica, ya que la posible influencia de la vegetación o de actividades humanas, sobre la concentración de este gas, son mínimas y la influencia de los volcanes puede ser excluida de los registros. El CO₂ es un gas que se dispersa fácilmente en la atmósfera y las mediciones hechas en cualquier parte del mundo se consideran representativas¹. Se mide en partes por miles por millón (ppmm).

¹ Keeling, C. D., S. C. Piper, R. B. Bacastow, M. Wahlen, T. P. Whorf, M. Heimann y H. A. Meijer. Exchanges of atmospheric CO₂ and CO₂ with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. I. Global aspects. SIO Reference Series, No. 01-06, Scripps. Institution of Oceanography. En: Scripps

$$\ln Y = \alpha + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \dots + \beta_n \ln X_n + \varepsilon \quad (1)$$

Donde:

- Y: Rendimiento del cultivo (maíz / caña de azúcar / sorgo).
- $X_1, \dots, X_n$: variables explicativas (temperatura, precipitación, CO₂)
- $\alpha, \beta_1, \dots, \beta_n$: coeficientes estimados
- ε : término aleatorio

En el modelo del rendimiento del maíz se utilizó como variable dependiente el rendimiento de este grano en condiciones de temporal en Jalisco. En el año 2020, dicho estado ocupó el primer lugar a nivel nacional en la producción de maíz de temporal (SIAP, 2022). Las variables explicativas fueron: CO₂, precipitación, temperatura mínima y temperatura media. Se utilizó el acumulado de lluvias y temperaturas promedios (mínima y media) de los meses de marzo a septiembre de cada año para el estado de Jalisco.

A fin de estimar el modelo del rendimiento de la de caña de azúcar, se utilizó el rendimiento en el estado de Veracruz bajo la modalidad de temporal, puesto que dicho estado ocupó el primer lugar a nivel nacional en la producción de este cultivo en temporal y riego (SIAP, 2022). Las variables explicativas fueron CO₂, precipitación, temperaturas máxima y media.

Para estimar el modelo econométrico del sorgo se empleó como variable dependiente el rendimiento de dicho cultivo bajo la modalidad de temporal en Tamaulipas. Dicho estado ocupó el primer lugar en producción de este grano (riego y temporal) (SIAP, 2022). Las variables explicativas fueron precipitación, temperatura

CO2 Program. Atmospheric CO2. Disponible en:
http://scrippsco2.ucsd.edu/data/atmospheric_co2.html (Consulta: julio 2021).

máxima y CO₂. Se utilizó el acumulado de lluvias de los meses de julio a diciembre de cada año en el estado de Tamaulipas y el promedio de la temperatura máxima en °C durante los meses de julio a diciembre del mismo estado.

Con el fin de determinar la bondad de ajuste del modelo econométrico se utilizó el coeficiente de determinación (R^2), para observar en qué medida la recta de regresión muestral se ajustó a los datos. Adicionalmente, para validar los parámetros estimados por el modelo econométrico se comparó el estadístico t y el p -valor ≤ 0.05 . Los coeficientes estimados se interpretaron como elasticidades: cuando el CO₂ varía en 1 %, la producción agrícola varía en promedio un β_1 % y de igual manera para la temperatura y precipitación con sus respectivos estimadores.

Análisis de datos

Los rendimientos de maíz a nivel nacional durante el periodo 1985-2020 tuvieron una tendencia creciente, el promedio fue 2.8 ton ha⁻¹. En 1988 se obtuvo el menor rendimiento con 1.6 ton ha⁻¹, mientras que el mayor fue en 2019 con 4.07 ton ha⁻¹. En el año 2020 los estados con el mayor rendimiento fueron Sonora, Baja California y Sinaloa, con 11.6, 11.3 y 11 ton ha⁻¹. El promedio fue 3.83 ton ha⁻¹.

En el mismo año, el 50.5 % del total de la producción de maíz se obtuvo bajo condiciones de temporal y el 49.5 % bajo riego. Jalisco fue el estado con la mayor producción bajo condiciones de temporal con el 26 % del total de la producción nacional en esa modalidad y obtuvo un rendimiento de 6.54 ton ha⁻¹. En el periodo de estudio tuvo un rendimiento promedio de 4.5 ton ha⁻¹ y una tendencia creciente. En 1985 el rendimiento fue de 2.73 ton ha⁻¹, y en el año 2020 se incrementó a 6.54.

Los rendimientos de caña de azúcar a nivel nacional durante el periodo 1985-2020 ha sido variable, con un rendimiento promedio de 72.6 ton ha⁻¹, en 1985 se obtuvo el menor rendimiento con 65 ton ha⁻¹, y en el 2013 se obtuvo el mayor con 78 ton ha⁻¹. En 2020 los estados con mayor rendimiento fueron Puebla, Morelos y el Estado de México con 112, 105 y 103 ton ha⁻¹. La producción nacional fue de 53.8 millones de toneladas., de las cuales el 48.4 % se obtuvo bajo temporal y el 51.6 % bajo sistema de riego. Veracruz es el estado con la mayor producción en ambas modalidades, en el año 2020 aportó el 38 % del total nacional y obtuvo un rendimiento de 69.38 ton ha⁻¹. El rendimiento de caña de azúcar en Veracruz presenta la misma tendencia que a nivel nacional. Se observan variaciones a lo largo del periodo. El mayor rendimiento se obtuvo en 1995 con 82 toneladas por hectárea, este rendimiento fue mayor al rendimiento nacional del mismo año. El menor rendimiento se obtuvo en 1980 con cerca de 58 ton ha⁻¹, de 1980 a 1991 se observa una tendencia creciente, sin embargo, en 1992 se observó una disminución y a partir de ese año los rendimientos han sido variables.

El rendimiento de sorgo tanto a nivel nacional como para Tamaulipas no presenta una tendencia. El promedio a nivel Nacional fue de 3.4 ton ha⁻¹ y para Tamaulipas fue de 2.6 ton ha⁻¹. Para el año 2020, los estados con mayor productividad fueron Morelos con un rendimiento de 6.1 ton ha⁻¹, le siguieron Querétaro y Baja California Sur con 5.8 ton ha⁻¹.

En lo que respecta al dióxido de carbono, según registros del Scripps Institution of Oceanography (2021), en el año 1010 la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera fue de 279 partes por millón por volumen (ppmv), durante la

época preindustrial se mantuvo alrededor de 280 ppmv y en el año 2020 fue de 414 ppmv. Se observa una tendencia creciente (Figura 1).

[Insertar Figura 1]

En los tres estados analizados se observaron variaciones en los patrones de precipitación y representan una alteración del sistema climático. Estas variaciones no han seguido un patrón claro de cambio: en algunos años muestran un aumento, mientras que en otros años disminuye, a nivel nacional se presentan las mismas variaciones (SEMARNAT, 2016) (Figura 2A).

[Insertar Figura 2]

La temperatura mínima en los estados de Jalisco, Veracruz y Tamaulipas siguen la misma tendencia durante el periodo 1985-2020 (Figura 2B). Cabe mencionar que Veracruz y Tamaulipas tuvieron temperaturas mínimas promedio muy similares.

Se observó una tendencia creciente en la temperatura media para los tres estados (Figura 2C). Jalisco tuvo la mayor temperatura media en el año 2019 con 21.8 °C, para Veracruz fue el año 2005 con 26.5 °C y Tamaulipas el año 2017 con 25.4 °C.

La temperatura máxima ha tenido una tendencia similar para Jalisco, Veracruz y Tamaulipas (Figura 2D). Se observa una tendencia creciente. Tamaulipas tuvo temperaturas extremas más altas en comparación con Jalisco y Veracruz. La

temperatura máxima más alta en Jalisco fue en el año 2019 con 30.2 °C, para Veracruz fue el año 2005 con 30.4 °C y para Tamaulipas fue en el año 2017 con 31.6 °C.

Resultados

Según resultados de la estimación 1 para el rendimiento del maíz (R_M) de temporal en el estado de Jalisco, la variable CO_2 junto con las variables climáticas precipitación (P), temperatura mínima (TMIN) y temperatura máxima (TMAX) explican el 23 % del rendimiento para dicho cultivo.

[Insertar Tabla 1]

De la estimación 1 se obtuvo la siguiente función de producción:

$$LNY = \alpha + \beta_1 LNCO_2 + \beta_2 LNP + \beta_3 LNTMIN + \beta_4 LNTMED$$

$$LNR_M = -4.90 + 0.19LNCO_2 + 0.82LNP + 0.38LNTMIN - 0.69LNTMED$$

Para obtener la función de producción tipo Cobb-Douglas correspondiente al rendimiento del maíz se calculó el antilogaritmo en ambos lados de la función.

$$ANTLN(LNR_M = -4.90 + 0.19LNCO_2 + 0.82LNP + 0.38LNTMIN - 0.69LNTMED)$$

$$R_M = 0.0074CO_2^{0.19}P^{0.82}TMIN^{0.38}TMED^{-0.69}$$

De las variables utilizadas en el modelo, la que más influye de manera inversa en el rendimiento del maíz es la temperatura media, por lo tanto, se mantuvieron constantes las demás variables (con los valores correspondientes al año 2020) para obtener la función univariada de producción.

$$R_M = 14.41TMED^{-0.69}$$

[Insertar Figura 3]

Según resultados de la estimación 2 para el rendimiento de caña de azúcar (R_C) de temporal en el estado de Veracruz, las variables CO_2 , P , $TMAX$ y $TMED$, en conjunto explican el 17 % del rendimiento para dicho cultivo.

[Insertar Tabla 2]

De la estimación 2, se obtuvo la siguiente función de producción:

$$LNY = \alpha + \beta_1 LNCO_2 + \beta_2 LNP + \beta_3 LNTMAX + \beta_4 LNTMED$$

$$LNR_C = 3.96 - 0.04LNCO_2 + 0.03LNP - 0.10LNTMAX + 0.21LNTMED$$

Para despejar R_C se obtuvo el antilogaritmo en ambos lados de la función

$$ANTLN(LNR_C = 3.96 - 0.04LNCO_2 + 0.03LNP - 0.10LNTMAX + 0.21LNTMED)$$

$$R_C = 52.51CO_2^{-0.04}P^{0.03}TMAX^{-0.10}TMED^{0.21}$$

La función univariada de producción manteniendo constante CO_2 , P y $TMAX$ es la siguiente:

$$R_C = 34.64TMED^{0.21}$$

[Insertar Figura 4]

Según el R^2 ajustado de la estimación 3 correspondiente al rendimiento de sorgo de temporal en Tamaulipas, el CO_2 , la P y la TMAX en conjunto explican el 38 % del rendimiento de dicho grano.

[Insertar Tabla 3]

De la estimación 3 se obtuvo la siguiente función de producción:

$$LNR_S = \alpha + \beta_1 LNCO_2 + \beta_2 LNP + \beta_3 LNTMAX$$

$$LNR_S = -0.97 + 0.09LNCO_2 + 0.24 LNP + 0.37LNTMAX$$

Para despejar R_S se obtuvo el antilogaritmo en ambos lados de la función

$$ANTLN(LNR_S = -0.97 + 0.09LNCO_2 + 0.24 LNP + 0.37LNTMAX)$$

$$R_S = 0.38CO_2^{0.09}P^{0.24}TMAX^{0.37}$$

La función univariada de producción del sorgo manteniendo constante el dióxido de carbono y la precipitación es la siguiente:

$$R_S = 2.58TMAX^{0.37}$$

[Insertar Figura 5]

Discusión

En la estimación 1 correspondiente al rendimiento de maíz de temporal en el estado de Jalisco los β son interpretados como elasticidades, en el modelo se observa que

las variables dióxido de carbono, precipitación y temperatura mínima tienen una relación directa con el rendimiento de maíz de temporal en el estado de Jalisco, mientras que la temperatura media tiene una relación inversa con este rendimiento.

En el modelo estimado el valor de β_1 es 0.19, este coeficiente indica que, si el dióxido de carbono a nivel global, *ceteris paribus*, aumenta en 1 %, el rendimiento del maíz de temporal en el estado de Jalisco se incrementará en 0.19 %. Por su parte, Flores, Arzola, Ramírez & Osorio (2012) estimaron que en un escenario de duplicación de CO₂, se espera incrementos en el rendimiento del maíz en las zonas áridas y semiáridas y disminuciones en las zonas húmedas y semihúmedas. El 68% de la superficie de Jalisco presenta clima cálido subhúmedo y el 18% templado subhúmedo (INEGI, 2022), por lo tanto, se espera que en un futuro el rendimiento de maíz se vea afectado ante el incremento del CO₂.

El valor de β_2 es 0.82, e indica que, si la precipitación en el estado de Jalisco durante el ciclo primavera-verano se incrementa en 1 % y las variables restantes del modelo se mantienen constantes, el rendimiento del maíz de temporal en el estado de Jalisco se incrementará en 0.82 %; así mismo, Benítez (2022) encontró que se tendrá un mayor rendimiento de maíz en la región oeste de México si la precipitación promedio anual se incrementa en una unidad, esto implicaría un aumento de 124 kg/ha. Ramírez, Ordaz, Mora, Acosta y Serna (2010) encontraron que la precipitación incentiva la producción en niveles bajos y la desincentiva a niveles altos en Belice. En Belice la precipitación promedio anual es de 181 mm, mientras que en Jalisco fue de 127, por lo que se concluye que la precipitación de Jalisco se encuentra por debajo de la precipitación óptima para el Maíz y un incremento en los niveles de precipitación trae consigo incrementos en los rendimientos del cultivo.

β_3 es igual a 0.38, significa que, si la temperatura mínima se incrementa en 1 % en promedio durante el ciclo primavera-verano, *ceteris paribus*, el rendimiento de maíz de temporal en el estado de Jalisco se incrementará en 0.38 %. El resultado es el esperado, puesto que temperaturas mínimas extremas afectan la productividad agrícola. Flores *et al.* (2012) menciona que, en el año 2011, el descenso brusco en la temperatura en Sinaloa provocó un siniestro del 61% del total de las hectáreas sembradas.

Finalmente, β_4 es igual a -0.69, lo que indica que si la temperatura media se incrementa 1 % durante el ciclo primavera- verano, y las demás variables, permanecen constantes, el rendimiento de maíz de temporal en el estado de Jalisco disminuirá en 0.69 %; esto concuerda con los resultados de Benítez (2022), afirma que, para la región oeste de México, si la temperatura primavera-verano se incrementa en 1 °C, el rendimiento del maíz disminuye en 67 kg/ha.

En la estimación 2 correspondiente al rendimiento de la caña de azúcar se observa que las variables precipitación y temperatura media tienen una relación directa con el rendimiento de caña de temporal en el estado de Veracruz, mientras que las emisiones de dióxido de carbono y la temperatura máxima tienen una relación inversa con éste rendimiento.

En el modelo estimado el valor de β_1 es - 0.04, este coeficiente indica si el CO₂ a nivel global aumenta en 1 %, *ceteris paribus*, el rendimiento de la caña de azúcar bajo condiciones de temporal en el estado de Veracruz disminuirá en un 0.04 %. Éste resultado concuerda con lo que plantea Sindhu (2011), donde los cultivos C₄ no se benefician del incremento del CO₂, dado que éstos cultivos se cultivan en los trópicos y señala el hecho de que sólo la producción agrícola en zonas templadas,

será parcialmente compensado por los efectos beneficiosos del enriquecimiento del CO₂. Por su parte, Black *et al.* (2012) estimaron la producción de caña de azúcar bajo un escenario de cambio climático con aumento de temperatura. Mostraron que duplicar el CO₂ mitiga el grado de estrés hídrico asociado con un aumento de temperatura de 4 °C.

El valor de β_2 es 0.03, e indica que, si la precipitación en Veracruz durante el periodo junio-octubre se incrementa en 1 % y las variables restantes del modelo, el rendimiento de la caña de azúcar bajo condiciones de temporal en el estado de Veracruz se incrementará en 0.03 %. Este cultivo requiere un mínimo de 1500 mm de precipitación anual (FIRA, 2010). Veracruz tuvo un promedio anual de 1559 mm, por lo tanto, las variaciones en la precipitación como consecuencia del cambio climático no han tenido un efecto negativo sobre la caña de azúcar.

β_3 es igual a -0.10, significa que, si la temperatura máxima se incrementa en 1 % en promedio durante los meses junio-octubre, y las demás variables se mantienen constantes, el rendimiento de la caña de azúcar de temporal en el estado de Veracruz disminuirá un 0.10 %. Contrario a este resultado Bravo *et al.* (2012) encontró que el aumento en los valores de esta variable, tendría efectos positivos sobre la producción de este cultivo en un ingenio particular del estado de Oaxaca. Por su parte Ramírez *et al.* (2010) determinaron que en Panamá la temperatura máxima óptima para el cultivo de caña de azúcar es 32.5 °C, por lo que el cambio climático podría tener efectos positivos sobre la producción de este cultivo, los cuales podrían revertirse en el largo plazo. Sin embargo, para nuestro caso particular en el estado de Veracruz es posible que ya se haya alcanzado la temperatura que permite

lograr los mayores rendimientos, por lo tanto, se observan los efectos negativos del cambio climático sobre la caña de azúcar.

Finalmente, β_4 es igual a 0.21, lo que indica que, si la temperatura media se incrementa 1 % en promedio, *ceteris paribus*, el rendimiento de la caña de azúcar de temporal en el estado de Veracruz se incrementará en un 0.21 %. El resultado es el esperado, puesto que las temperaturas óptimas para la brotación oscilan entre 24 a 37 °C, en el amacollamiento cercana a 30 °C, en el crecimiento sobre los 30 °C (FIRA, 2013), durante el periodo de estudio la temperatura media se encontró entre 23 y 26.5 °C. El incremento de la temperatura media tiene un efecto positivo sobre el rendimiento de la caña de azúcar.

De la estimación 3 se deduce que, las variables dióxido de carbono, precipitación y temperatura máxima, tienen una relación directa con el rendimiento de sorgo de temporal en el estado de Tamaulipas.

El valor de β_1 es 0.09, esto indica que, si las emisiones de dióxido de carbono a nivel global se incrementan en 1 %, el rendimiento del sorgo en Tamaulipas bajo condiciones de temporal se incrementará en 0.09 %, manteniendo las demás variables constantes.

El valor de β_2 igual a 0.24 indica que si la precipitación en Tamaulipas durante el periodo julio-diciembre, se incrementa en 1 %, el rendimiento del sorgo en dicho estado bajo condiciones de temporal se incrementará en 0.24 %. Por su parte, *Hossain, Islam, Rahman, Golam & Rahman (2022)* aseveran que el sorgo puede adaptarse a diversos ambientes, especialmente en condiciones de deficiencia de agua y este es el cultivo por excelencia para las zonas áridas por su tolerancia a la sequía.

El valor de β_3 igual 0.37 indica que, si la temperatura máxima se incrementa en 1 % en promedio durante los meses de julio a diciembre, el rendimiento de sorgo se incrementará en 0.37 %. Concuerta con lo que afirmado por *Okosun, Allen, Glover & Reddy (2021)*, aseveran que el sorgo es extremadamente adaptable a tolerar diversas temperaturas y al mismo tiempo producir altos rendimientos.

Conclusiones

Se observó un incremento de las temperaturas mínima, media y máxima en Jalisco, Tamaulipas y Veracruz, al igual que variaciones en los patrones de precipitación, estos factores son indicadores de la existencia del cambio climático.

Los rendimientos de los tres cultivos C_4 han variado durante el periodo de estudio. El rendimiento de Maíz en Jalisco se ha incrementado considerablemente; se observaron variaciones en los rendimientos de la caña de azúcar en Veracruz, aunque sigue una tendencia creciente. El rendimiento de sorgo en Tamaulipas no tiene una tendencia creciente.

La temperatura media es una de las variables climáticas que tiene el mayor efecto en el rendimiento de los cultivos estudiados, en el caso del maíz la temperatura media tiene una relación inversa, mientras que en el rendimiento de la caña de azúcar y sorgo tiene una relación directa.

Las emisiones globales de CO_2 tienen una relación directa con el rendimiento del maíz y sorgo, mientras que en la caña de azúcar tiene efectos negativos. La precipitación tiene un efecto positivo sobre los tres cultivos, aunque el efecto es

mayor en el maíz. El cambio climático ya evidenció efectos adversos sobre los cultivos de maíz y caña de azúcar.

Referencias

Adams, R. M., Hurd, B. H. & Reilly, J. (1999). *A review of impacts to U.S. agriculture resources. Agriculture.*

https://www.c2es.org/site/assets/uploads/1999/02/env_argiculture.pdf

Benítez L, O. B. (2022). *Influencia de los factores climáticos en la producción de maíz en México. El semestre de las especializaciones 3 (2), 83-112.*

https://www.depfe.unam.mx/especializaciones/revista/3-2-2022/03_EAE_Benitez-Lopez_2022.pdf

Black, E., Vidale, P. L., Verhoef, A., Cuadra, S. V., Osborne, T., & Van Den Hoof, C. (2012). *Cultivating C4 crops in a changing climate: Sugarcane in Ghana. Environmental Research Letters, 7(4).* <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044027>

Bravo-Mosqueda E.; G. Medina-García; J. A. Ruíz-Corral, A. D. Báez-González y V. Mariles-Flores. (2012). *Cambio Climático y su Impacto Potencial en el Sistema Producto Caña de Azúcar en el Área de Abasto del Ingenio Adolfo López Mateos. INIFAP. Publicación Especial Núm. 11. Sto. Domingo Barrio Bajo, Etla, Oaxaca, México. 43 p.*

Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcoholera (CNIAA). (2021). *Directorio de ingenios.* <http://www.cniaa.mx/> Recuperado: noviembre 2021.

Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2010). *Producción sostenible de caña de azúcar en México. FIRA Boletín informativo. Nueva época. Núm. 11.* <https://www.fira.gob.mx>

Flores C., L. M., Arzola G., J. F., Ramírez

S., M. & Osorio P., A. (2012). *Repercusiones del cambio climático global en el estado de Sinaloa, México. Cuadernos de geografía: Revista colombiana de geografía*, 21(1), 115-129.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-215X2012000100009&lng=en&tlng=es.

Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (FONADE) e Instituto de Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2013). *Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de cultivos por sectores*
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Efectos+del+Cambio+Climatico+en+la+agricultura.pdf/3b209fae-f078-4823-afa0-1679224a5e85>

Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC). (2019). *El cambio climático y la tierra*.

Hossain, S., Islam, N., Rahman, M., Golam M., M. & Rahman K., A. (2022). *Sorghum: A prospective crop for climatic vulnerability, food and nutritional security*, *Journal of Agriculture and Food Research* 8.
<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100300>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022a). *Sistema de cuentas nacionales de México. Banco de Información Económica (BIE)*.
<https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?tm=0>

INEGI (2022). *Cuéntame de México. Clima Jalisco*.
<https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/jal/territorio/clima.aspx?tema=me&e=14#:~:text=Jalisco&text=El%2068%25%20de%20la%20superficie,norte%20y%20noreste%20del%20estado>.

IPCC. (2014). *Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambio climático 2014: Informe de Síntesis. Ginebra, Suiza.

Maddison, D. J., Manley, M. & Kurukulasuriya, P. (2007). *The economic impact of climate change on Kenyan crop agriculture: A Ricardian approach*. Policy Research Working Paper 4306.

Mckee, T. & Mckee, J. R. (2003). *Bioquímica, base molecular de la vida*. Tercera edición, U. MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. Madrid, España.

Mora, J., Ramírez, D., Ordaz, J. L., Acosta, A. & Serna, B. (2010). *Panamá: Efectos Del Cambio Climático Sobre La Agricultura*. México.
<https://www.cepal.org/es/publicaciones/25926-panama-efectos-cambio-climatico-la-agricultura>

Naciones Unidas. (2021). *Cambio climático*.
<https://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html#:~:text=Nos encontramos en un momento,nuestro tiempo%3A el cambio climático.&text=Los efectos del cambio climático,sus efectos en el futuro>.

Okosun, O. O. Allen, K. C., Glover, J. P. & Reddy, G. V. P. (2021). *Biology, Ecology, and Management of Key Sorghum Insect Pests*, *Journal of Integrated Pest Management*, 12 (1), 1-18. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmaa027>

Organización Internacional del Azúcar (OIA). (2013). *Cambio climático y cultivos azucareros*. Canadá. www.isosugar.org

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2020). *Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2019*.

<https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Declaracion de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2014.pdf>.

Ramírez, D., Ordaz, J. L., Mora, J., Acosta, A. & Serna, B. (2010). *Belice efectos del cambio climático sobre la agricultura*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/25918>

Scripps Institution of Oceanography. (2021). "Scripps CO2 Program. Atmospheric CO2". Daily CO2 Data. <https://scrippsco2.ucsd.edu/cosub2sub-data.html>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2016. *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2015*. <http://www.gob.mx/semarnat>.

SEMARNAT (2018) *Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* <https://www.gob.mx/inecc/articulos/sexta-comunicacion-nacional-ante-la-cmnucc?idiom=es#:~:text=La%20Sexta%20Comunicaci%C3%B3n%20Nacional%20de,dar%20cumplimiento%20a%20las%20Contribuciones>

SEMARNAT. (2019). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2018*. México. file:///C:/Users/youhe/Downloads/kdoc_o_00042_01.pdf.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Sindhu, J. S. (2011). *Potential impacts of climate change on agriculture*. *Indian Journal of Science y Technology*, 4(3), 348-353. <https://doi.org/10.17485/ijst/2011/v4i3.32>

Taiz, L. & Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal*, Tercera edición, Castellon de la Plana, España.

Tabla 1: Estimación del rendimiento de Maíz de temporal en el estado de Jalisco

Variables	Coeficientes	Estadístico t	Probabilidad
Constante	-4.8999	-2.521231955	0.017241512
LN CO ₂	0.1915	1.112290876	0.274847232
LN P	0.8156	2.737595058	0.010305192
LN TMIN	0.3794	2.106558626	0.043627
LN TMED	-0.6876	-2.227468979	0.033565514

Fuente: Elaboración propia con información arrojada por el SAS

Tabla 2: Estimación del rendimiento de caña de azúcar de temporal en el estado de Veracruz

Variables	Coeficientes	Estadístico t	Probabilidad
Constante	3.960966437	39.41145364	2.12411E-27
LN CO ₂	-0.043928916	-1.545033856	0.132822808
LN P	0.029441328	1.750324701	0.090284795
LN TMAX	-0.103971345	-1.98250006	0.056646885
LN TMED	0.206576356	2.224849767	0.033759302

Fuente: Elaboración propia con información arrojada por el SAS

Tabla 3: Estimación del rendimiento de sorgo de temporal en el estado de Jalisco

Variables	Coeficientes	Estadístico t	Probabilidad
Constante	-0.9681	-1.336810471	0.191012952
LN CO ₂	0.0893	2.121330755	0.041992772
LN P	0.2388	1.093357587	0.282660531
LN TMAX	0.3685	4.892594837	2.9214E-05

Fuente: Elaboración propia con información arrojada por el SAS

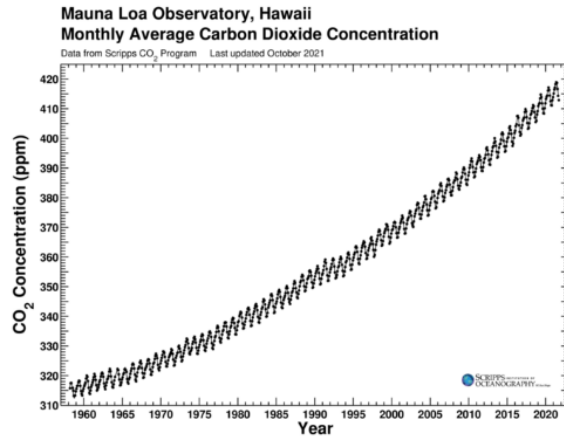


Figura 1: Concentración global de CO₂

Fuente: Scripps Institution of Oceanography (2021)

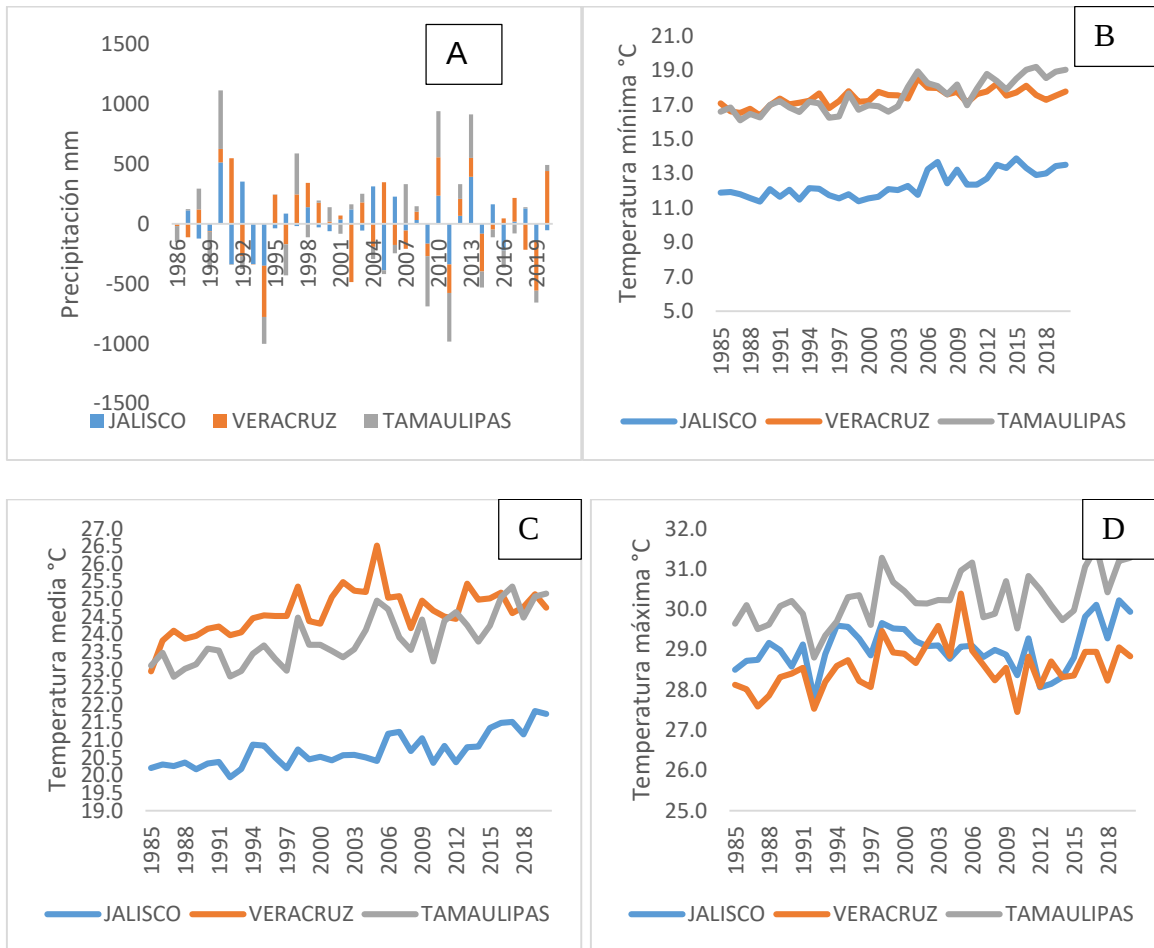


Figura 2: A. Anomalías en la precipitación, B. Temperatura mínima, C. Temperatura media y D. Temperatura máxima (1980-2020)

Fuente: CONAGUA (2022). SMN. Resúmenes mensuales de Temperaturas y Lluvia

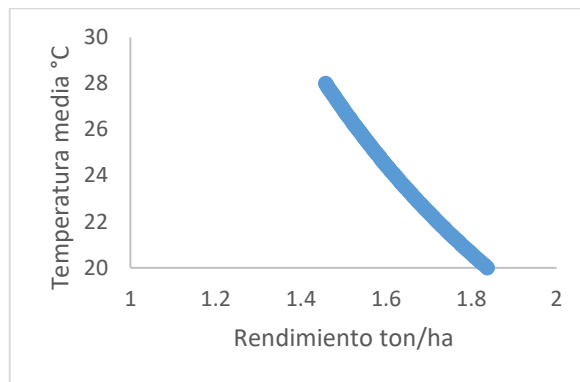


Figura 3: Función de producción de Maíz

Fuente: Elaboración propia con información arrojada por el SAS

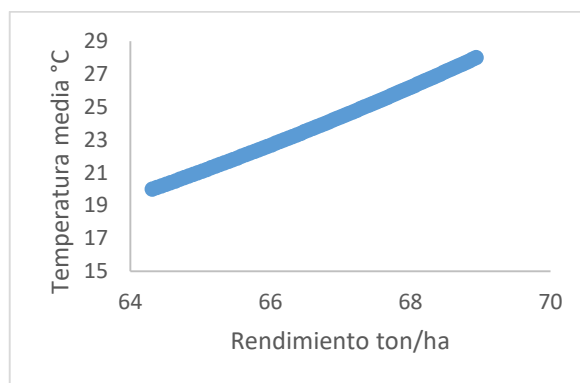


Figura 4: Función de producción de caña de azúcar y sorgo

Fuente: Elaboración propia con información arrojada por el SAS

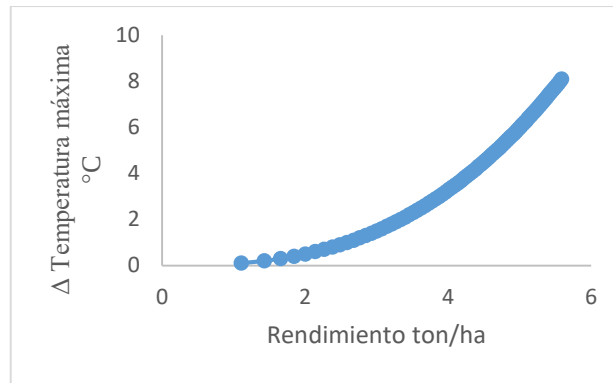


Figura 5: Función de producción de sorgo

Fuente: Elaboración propia con información arrojada por el SAS

5. CONCLUSIONES

Las estadísticas a nivel global y nacional muestran que en el periodo de estudio se han incrementado las emisiones de CO₂ en la atmósfera, lo cual ha repercutido en el aumento de la temperatura y cambios en los patrones de precipitación. En los estados de Jalisco, Tamaulipas y Veracruz se observó un incremento de las temperaturas mínima, media y máxima, al igual que variaciones en los patrones de precipitación, estos factores son indicadores de la existencia del cambio climático.

Al realizar el estudio de los efectos del cambio climático sobre la agricultura en México, de manera general utilizando índices de producción agrícola, se observó que ésta actividad se ha visto beneficiada de los niveles altos del dióxido de carbono y la elevación de la temperatura no la ha perjudicado, sin embargo, los cambios en los patrones de la precipitación redujeron su rendimiento. Mientras tanto, al estudiar específicamente tres cultivos C₄ en los estados con la mayor producción, los resultados fueron distintos. La temperatura media fue una de las variables climáticas que tuvo el mayor efecto en el rendimiento, en el caso del maíz la temperatura media tuvo una relación inversa, mientras que para la caña de azúcar y el sorgo tuvo una relación directa. Las emisiones globales de CO₂ incentivan el rendimiento del maíz y sorgo, mientras que en la caña de azúcar tiene un efecto contrario. La precipitación tuvo una relación positiva sobre los tres cultivos, aunque el efecto es mayor en el maíz. El cambio climático ya presentó efectos adversos sobre los cultivos de maíz en Jalisco y caña de azúcar en Veracruz, en el caso del sorgo en Tamaulipas, las variables climáticas no han tenido efectos perjudiciales.

Del año 1985 al 2020 las emisiones de dióxido de carbono por la quema de combustibles a nivel global han aumentado anualmente, si en los próximos años su crecimiento sigue la misma conducta, la temperatura se seguirá incrementando, los patrones de precipitación se modificarán aún más y la producción agrícola se verá afectada. Las consecuencias de este fenómeno varían entre regiones, y más aún en México, que cuenta con una diversidad de climas, por lo tanto, se recomienda realizar estudios específicos para determinar sus efectos.

6. LITERATURA CITADA

Adams, R. M. (1989). Global Climate Change and Agriculture: An Economic Perspective. *American Journal of Agricultural Economics*, 8. <http://ajae.oxfordjournals.org/>

Adams, R. M., Hurd, B. H., & Reilly, J. (1999). A review of impacts to U.S. agriculture resources. *Agriculture*. https://www.c2es.org/site/assets/uploads/1999/02/env_argiculture.pdf

Ahumada, R., Velázquez, G., Flores, E., & Romero, J. (2014). Impactos potenciales del cambio climático en la producción de maíz. *Investigación y ciencia*, 22(61), 48–53.

Asseng, S., Martre, P., Maiorano, A., Rötter, R. P., O’Leary, G. J., Fitzgerald, G. J., ... Ewert, F. (2018). Climate change impact and adaptation for wheat protein. *Global Change Biology*, 25(1), 155–173. <https://doi.org/10.1111/gcb.14481>

Berg, A., Noblet-ducoudré, N. De, Sultan, B., Lengaigne, M., & Guimberteau, M. (2013). Projections of climate change impacts on potential C4 crop productivity over tropical regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 89–102. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.12.003>

Black, E., Vidale, P. L., Verhoef, A., Cuadra, S. V., Osborne, T., & Van Den Hoof, C. (2012). Cultivating C4 crops in a changing climate: Sugarcane in Ghana. *Environmental Research Letters*, 7(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044027>

Bravo, E., Medina, G., Ruíz, J., Báez, A., & Mariles, V. (2012). Cambio climático y su impacto potencial en el sistema producto de caña de azúcar en el área de abasto del ingenio Adolfo López Mateos. Recuperado de [http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/bitstream/handle/123456789/4387/Cambio climático y su impacto potencial en el sistema producto caña de azúcar en el área de abasto del ingenio Adolfo López Mateos.pdf?s](http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/bitstream/handle/123456789/4387/Cambio_climático_y_su_impacto_potencial_en_el_sistema_producto_caña_de_azúcar_en_el_área_de_abasto_del_ingenio_Adolfo_López_Mateos.pdf?s)

Bula, A. (2020). Importancia de la agricultura en el desarrollo. Observatorio Económico Social. <https://observatorio.unr.edu.ar/wp-content/uploads/2020/08/Importancia-de-la-agricultura-en-el-desarrollo-socio-econ%C3%B3mico.pdf>

Burke, M., & Emerick, K. (2016). Adaptation to climate change: Evidence from US agriculture. *American Economic Journal: Economic Policy*, 8(3), 106–140. <https://doi.org/10.1257/pol.20130025>

Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica (CNIAA). (2021). Directorio de ingenios. <http://www.cniaa.mx/> Recuperado: noviembre 2021.

Chen, S., Chen, X., & Xu, J. (2016). Impacts of climate change on agriculture: Evidence from China. *Journal of Environmental Economics and Management*, 76, 105–124. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2015.01.005>

De La Torre, A., Fajnzylber, P., & Nash, J. (2009). Desarrollo con menos carbono respuestas latinoamericanas al desafío del cambio climático (Banco

Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial, Ed.). Recuperado de www.worldbank.org

Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo (FONADE) e Instituto de Hidrología, meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2013). Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de cultivos por sectores Evaluación del riesgo agroclimático por sectores. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Efectos+del+Cambio+Climatico+en+la+agricultura.pdf/3b209fae-f078-4823-afa0-1679224a5e85> Recuperado el 16 de mayo de 2019

Gómez-Oliver, L. (1995). El papel de la agricultura en el desarrollo de México (O. R. de la F. para A. L. y el Caribe, ed.). Santiago de Chile.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2013). Cambio climático 2013 Bases físicas. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf

Hatfield, J. L., Boote, K. J., Kimball, B. A., Ziska, L. H., Izaurralde, R. C., Ort, D., ... Wolfe, D. (2011). Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agronomy Journal*, 103(2), 351–370. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0303>

Huong, N. T. L., Bo, Y. S., & Fahad, S. (2018). Economic impact of climate change on agriculture using Ricardian approach: A case of northwest Vietnam. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(4), 449–457. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.02.006>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). Sistema de cuentas nacionales de México. Banco de Información Económica (BIE). <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?tm=0>

IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de Síntesis. En Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

Maddison, D. (2007). The Perception of and Adaptation to Climate Change in Africa. The World Bank Development Research Group Sustainable Rural and Urban Development Team., (August). Recuperado de <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/7507/wps4308.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Recuperado el 3 de septiembre de 2019

Maddison, D., Manley, M., & Kurukulasuriya, P. (2007). The economic impact of climate change on Kenyan crop agriculture: A Ricardian approach. *Global and Planetary Change*, 57(3–4), 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.01.002>

McCarl, B. A., Adams, R. M., & Hurd, B. H. (2001). Global climate change and its impact on ecosystems. *Encyclopedia of Life Support Systems*, 4(3), 20. <https://agecon2.tamu.edu/people/faculty/mccarl-bruce/papers/879.pdf>

Mendelsohn, R., Arellano-Gonzalez, J., & Christensen, P. (2009). A Ricardian analysis of Mexican farms. *Environment and Development Economics*, 15(2), 153–171. <https://doi.org/10.1017/S1355770X09990143>

Mendelsohn, R., Basist, A., Kurukulasuriya, P., & Dinar, A. (2007). Climate and rural income. *Climatic Change*, 81(1), 101–118. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-9010-5>

Mendelsohn, R., Nordhaus, W. D., & Shaw, D. (1994). The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis. *American Economic Review*, 84(4), 753–771. <https://doi.org/10.2307/2118029>

Mora, J., Ramírez, D., Ordaz, J., Acosta, A., & Serna, B. (2010). Panamá: Efectos Del Cambio Climático Sobre La Agricultura. <https://doi.org/LC/MEX/L.971>

Naciones Unidas. (1992). Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático (Vol. 62301). <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

Nelson, G. C., Rosegrant, M. W., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., ... Lee, D. (2009). Cambio Climático: el impacto en la agricultura y los costos de adaptación. <https://doi.org/10.2499/0896295370>

Ocampo, O. (2011). El cambio climático y su impacto en el agro. *Revista de ingeniería*, *Revista de Ingeniería*, (33), 115-123. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932011000100012

Organización Internacional del Azúcar (OIA). (2013). Cambio climático y cultivos azucareros. Recuperado de www.isosugar.org Recuperado el 3 de octubre de 2020

Orozco, H., Hernández, M., García, G., & Suárez, G. (2019). Cambio climático: Una percepción de los productores de maíz de temporal en el estado de Tlaxcala, México. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 8(16), 1–26. <https://doi.org/10.23913/ciba.v8i16.89>

Raya-Pérez, J. C. & Aguirre-Mancilla, C. L. (2008). Aparición y evolución de la fotosíntesis C₄, *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 14(1), 45-50. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182008000100008&lng=es&tlng=es

Schlenker, W., Hanemann, W. M., & Fisher, A. C. (2006). The impact of global warming on U.S. agriculture: An econometric analysis of optimal growing conditions. *Review of Economics and Statistics*, 88(1), 113–125. <https://doi.org/10.1162/003465306775565684>

SEMARNAT. (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2015. Recuperado de <http://www.gob.mx/semarnat>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2020). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Recuperado el 23 de mayo de 2019, de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Sindhu, J. S. (2011). Potential impacts of climate change on agriculture. *Indian Journal of Science y Technology*, 4(3), 348-353. <https://doi.org/10.17485/ijst/2011/v4i3.32>

Stöckle, C. O., Nelson, R. L., Higgins, S., Brunner, J., Grove, G., Boydston, R., ... Kruger, C. (2010). Assessment of climate change impact on Eastern Washington agriculture. *Climatic Change*, 102(1–2), 77–102. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9851-4>

Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal* (Tercera, Vol. 1). Castellon de la Plana, España.

Zhang, P., Zhang, J., & Chen, M. (2017). Economic impacts of climate change on agriculture: The importance of additional climatic variables other than temperature and precipitation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 83, 8–31. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2016.12.001>