

Análisis del Cambio Climático sobre los Cultivos C4. El Caso de la Caña de Azúcar en México

Analysis of Climate Change on Crops C4.
The Case of Sugar Cane in México.

Francisco Pérez Soto.

RESUMEN:

Una de las consecuencias de las actividades antropogénicas del hombre sobre el medio ambiente, ha sido el incremento sostenido de la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera causando trastornos en las variables climáticas como son la temperatura y la precipitación. Esto ha conducido al llamado cambio climático y al calentamiento global. No obstante, hay cultivos como los llamados C4, a los que pertenecen el maíz y la caña de azúcar, que dada su fisiología y genética molecular podrían salir beneficiados del incremento en la temperatura y condiciones de relativa escasas disponibilidad de agua. El objetivo de la presente investigación ha sido determinar el efecto de la temperatura, precipitación y concentración de dióxido de carbono sobre el rendimiento de la caña de azúcar. La metodología utilizada para dicho propósito ha sido la utilización de un modelo de ecuaciones simultáneas, tanto en su forma estructural como en su forma reducida. Los resultados muestran que, en el modelo estructural estimado, dos de los tres principales parámetros fueron significativos estadísticamente, excepto el asociado a la temperatura media anual.

Los parámetros del modelo reducido permitieron determinar que al menos en el largo plazo para la caña de azúcar, como una planta C4, existe una relación directa entre el incremento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, así como también con el incremento de la temperatura.

Palabras clave: plantas C4, caña de azúcar, cambio climático, calentamiento global.

ABSTRACT:

One of the consequences of man's anthropogenic activities on the environment has been the sustained increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere, causing disturbances in climatic variables such as temperature and the precipitation. This has led to so-called climate change and global warming, whose effects on agriculture in general are assumed to have been negative. However, there are crops such as C4, to which corn and sugarcane belong, which, given their molecular physiology and genetics, could benefit from the increase in temperature and conditions of relative scarcity of water. The objective of the present investigation was to determine the effect of temperature, precipitation and concentration of carbon dioxide on the performance of sugarcane. The methodology used for this purpose has been the use of a model of simultaneous equations, both in its structural form and in its reduced form. The results show that in the estimated structural model, two of the three main parameters were statistically significant, except for the one associated with the annual mean temperature. The parameters of the reduced model allowed to determine that at least in the long term for sugarcane, as a C4 plant, there is a direct relationship between the increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere as well as the increase in temperature.

Keywords: C4 plants, sugarcane, climate change, global warming.

Introducción.

Una de las consecuencias del cambio climático a nivel global es el incremento de la temperatura en el largo plazo, las variaciones extremas de las precipitaciones y el incremento de la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera. El cambio climático se atribuye a las actividades antropogénicas del hombre, sobre todo desde finales de la Revolución Industrial del siglo XIX. Esto puede afirmarse de acuerdo con las referencias obligadas para el estudio del cambio climático que son los informes del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) y el Convenio Marco de las Naciones Unidas para Cambio Climático (CMNUCC) (IPCC, 2006; IPCC 2007). Una preocupación de los distintos países es el cómo afectará el cambio climático a la productividad de su agricultura. Las expresiones concretas del cambio climático son, como se hizo referencia en el párrafo anterior, el calentamiento global por incremento en la temperatura y las variaciones extremas de las precipitaciones pluviales que a nivel del globo resultará en zonas donde las sequías serán la regla y áreas geográficas donde las precipitaciones serán extremas.

El impacto sobre la productividad de la agricultura en una zona geográfica específica, delimitada por fronteras políticas, puede realizarse a través del análisis de largo plazo e histórico comportamiento de dos variables climáticas, para las cuales se cuenta con una serie de tiempo de más de 100 años; las cuales son la temperatura y la precipitación.

Si bien las consecuencias del cambio climático sobre la productividad de la agricultura en general son negativas, en el caso de los cultivos C4 como son la caña de azúcar y el maíz, el cambio climático podría ser incluso favorable.

Existe evidencia documentada acerca de que los rendimientos de la caña de azúcar y la remolacha azucarera se han incrementado debido al incremento en la temperatura a lo largo de las décadas en las que el calentamiento global se ha manifestado (OIA, 2013).

De esta manera la presente investigación tiene como objetivos analizar el efecto de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, temperatura y precipitación sobre los rendimientos de la caña de azúcar en el largo plazo y así como determinar la relación econométrica entre el incremento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera y el rendimiento de la caña de azúcar.

Ahora bien, en el presente trabajo no se parte de presuponer a priori una relación directa o inversa entre el rendimiento de la caña de azúcar y las variables climáticas de temperatura, precipitación y concentración de dióxido de carbono en la atmósfera; pues este es uno de los objetivos del presente estudio.

Revisión de literatura.

En el planeta todas las plantas acuáticas y terrestres son fijadoras de carbono a través del mecanismo de la fotosíntesis. La fotosíntesis es el proceso mediante el cual la energía luminosa se transforma en energía química. Se denominan plantas C3 a las plantas en las que el primer compuesto orgánico fabricado en la fotosíntesis tiene tres átomos de carbono (C3) y en las C4 el primer compuesto tiene cuatro carbonos. El 85% de las plantas superiores son C3 y casi el restante 15% son del tipo C4.

Las plantas C4 se encuentran principalmente en los trópicos y entre ellas están la caña de azúcar y el maíz.

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 fotorrespiración. Esta ruta se denomina ruta C4. Las plantas C4 poseen en sus hojas dos clases de células fotosintéticas: células mesófilas y células de la vaina del haz. En las plantas C3, la fotosíntesis tiene lugar en las células mesófilas. La mayoría de las células mesófilas en ambas clases de plantas se encuentran en contacto directo con el aire cuando las estomas de las hojas están abiertas. En las plantas C4, el CO₂ se capta en células del mesófilo especializadas que lo incorporan al oxalacetato. La carboxilasa de fosfoenol- piruvato cataliza esta reacción, que es una manera indirecta de fijar carbono porque el CO₂ debe convertirse primero en bicarbonato.

Dado que la carboxilasa del PEP tiene más baja para el CO₂ (esto es, mayor afinidad) que la rubisco, y a que el oxígeno es un sustrato deficiente, las plantas C4 son más eficaces en capturar CO₂ que las C3.

Las plantas C4 también uso más eficiente del agua que las C3, porque pueden cerrar sus estomas cuando la temperatura ambiente es elevada, con lo cual reducen la evapotranspiración (McKee and McKee, 2009; p. 491; Rein, 2012).

La OIA en su estudio de 2012 uno de sus objetivos fue examinar la relación entre cambio climático o, más concretamente, los cambios a largo plazo en las precipitaciones y temperaturas, y los rendimientos remolacheros y rendimientos cañeros. Utilizando una regresión Cobb-Douglas en dicho estudio se obtienen las elasticidades entre temperatura y rendimientos de la remolacha azucarera. De esta manera se obtiene que un incremento de 1% en la temperatura local para cada país se obtiene, por ejemplo, un incremento del 2.7% en el rendimiento de la remolacha cañera en Francia; 1.99% Suffolk, Reino Unido; en un 1,47% en Países Bajos; en un 0,88% en Fargo, Estados Unidos, por ejemplo.

Entre otras metodologías que estudian los cambios en los rendimientos de los cultivos de importancia económica, por su papel en la seguridad alimentaria de los países están los modelos de simulación de cultivos (CSM).

Un modelo de simulación describe los procesos de crecimiento y desarrollo de cultivos en función de las condiciones climáticas, las condiciones del suelo y el manejo de cultivos. Típicamente, dichos modelos estiman los tiempos de etapas de crecimiento específicas, biomasa de componentes de cultivos (por ejemplo, hojas, tallos, raíces y productos cosechables) a medida que cambian con el tiempo, y de manera similar, los cambios en la humedad del suelo y el estado de nutrientes. Estos modelos se clasifican en tres tipos: modelos estadísticos, modelos mecanicistas y modelos funcionales. (USDA, 2014).

El modelo utilizado en la presente investigación puede catalogarse como un modelo funcional. Estos usan formas funcionales cerradas simplificadas para simular procesos complejos. Son computacionalmente más fáciles que los modelos mecanísticos, y a menudo pueden dar resultados que son de una menor precisión.

La ecuación de Penman es un ejemplo de una ecuación que podría usarse como un componente de un modelo funcional. Los modelos funcionales normalmente se ejecutan utilizando un paso de tiempo diario y los datos se actualizan diariamente.

Materiales y métodos.

El alcance del estudio es para todo México para un periodo de 52 años. El periodo de estudio para el que se contó originalmente con información para analizar la relación entre cambio climático y el rendimiento de la caña de azúcar, en el largo plazo, fue del año 1901 a 2016; es decir la base de datos para temperatura, precipitación y concentraciones de dióxido de carbono en la atmosfera, contenía originalmente 114 observaciones anuales. No obstante, se decidió utilizar solo información para el periodo de 1959 a 2015; es decir, 54 observaciones dado que fue en la década de los años cincuenta del siglo XX cuando se comenzó a registrar formalmente las concentraciones de dióxido de carbono en la atmosfera en el observatorio de Mauna Loa, Hawái, Estados Unidos. Esta variable es utilizada como un indicador de la concentración de este gas de efecto invernadero a nivel global. Las variables utilizadas en el estudio se muestran en el Cuadro 1.

Variable	Descripción	Escala	Unidades
RENDCAZ	Rendimiento de caña de azúcar	Continua	ton/ha
CO₂	Dióxido de carbono	Continua	ppm
PMA	Precipitación media anual	Continua	mm/año
TEMP	Temperatura media anual	Continua	Grados centígrados

Cuadro 1. Variables utilizadas en la estimación del modelo

NOTA: ppm= parte por millón; mm= milímetros.

Fuente: Elaboración propia.

El sistema de ecuaciones propuesto para estimar el efecto de las variables climáticas y la concentración del dióxido de carbono sobre el rendimiento de la caña de azúcar es el descrito a por las dos siguientes formas funcionales.

$$\text{RENDCAZ} = \beta_{11} + \beta_{12} \cdot \text{PMA} + \beta_{13} \cdot \text{TEMP} + \varepsilon_1$$

$$\text{TEMP} = \beta_{21} + \beta_{22} \cdot \text{CO}_2 + \varepsilon_2$$

Donde adicionalmente a las definiciones de las variables dadas en el Cuadro 1, en la respectiva ecuación se adiciona un término de error aleatorio.

La dirección de la relación causal es del dióxido de carbono hacia la temperatura y de la temperatura hacia el rendimiento de la caña de azúcar. La determinación de la causalidad se estableció en base al análisis exploratorio de las relaciones entre variables.

Al insertar directamente la variable de dióxido de carbono como variable exógena sobre el rendimiento de la caña de azúcar como variable endógena, no habla significancia estadística del parámetro estimado asociado al dióxido de carbono; sin embargo, al analizar la relación la causalidad entre la temperatura como variable endógena y la concentración de dióxido de carbono como variable exógena se observó una alta significancia estadística del parámetro estimado como el porcentaje de variabilidad explicado por el dióxido de carbono en el modelo.

Resultados y discusión.

El periodo de estudio para el que se contó originalmente información para analizar la relación entre cambio climático y el rendimiento de la caña de azúcar, en el largo plazo, es del año 1901 a 2016; es decir la base de datos para temperatura, precipitación y concentraciones de dióxido de carbono en la atmosfera, contenía 114 observaciones anuales; y para el caso de los rendimientos de la caña de azúcar se disponía de observaciones desde 1898 hasta 2017. No obstante, se decidió utilizar solo información para el periodo de 1959 a 2012; es decir, 54 observaciones dado que fue en la década de los años cincuenta del siglo XX cuando se comenzó a registrar formalmente las concentraciones de dióxido de carbono en la atmosfera en el observatorio de Mauna Loa, Hawái, Estados Unidos. Esta variable es utilizada como un 9 indicador de la concentración de gas de efecto invernadero a nivel global. Las variables utilizadas en el estudio se muestran en el Cuadro 1.

Los estadísticos descriptivos de las variables utilizadas son los mostrados en el Cuadro 2.

Las unidades para cada variable son las mismas que las descritas en la última columna del Cuadro 1.

Variable	Media	Desviación estándar	Valor máximo	Valor mínimo
RENDCAZ	68.47	5.47	77.65	55.14
CO₂	351.60	25.42	400.88	315.98
PMA	746.46	61.86	912.73	631.86
TEMP	20.80	0.44	21.65	19.90
Cuadro 2. Estadísticos descriptivos de las variables.			Fuente: Elaboración propia.	

Los resultados del modelo estructural de ecuaciones simultáneas recursivo, estimado mediante mínimos cuadrados en dos etapas, se presentan en el Cuadro 3.

Variable dependiente:	Intercepto	PMA	TEMP	CO ₂	R ² ajust	DW
RENDCAZ						
Coefficiente	-132.758	0.013664	9.18166		0.29934	0.659
Error estándar	39.5789	0.010686	1.823758			
Razón de t	-3.35	1.28	5.03			
Variable dependiente:						
TEMP						
Coefficiente	16.03223			0.013574		1.5320
Error estándar	0.497222			0.001411		
Razón de t	32.24			9.62		

Cuadro 3. Estimación de los efectos del clima sobre la caña de azúcar.

Fuente: Elaboración propia

El análisis econométrico permite observar que a nivel individual los parámetros estimados son estadísticamente distintos de cero excepto el parámetro asociado a la precipitación media anual cuyo valor de t fue de 1.28 siendo significativo solo al 79.35% de confianza. El coeficiente de determinación fue de 0.299 y 0.62 respectivamente.

Ahora bien, no obstante, la utilidad del modelo estructural para estudiar la relación de las variables climáticas y del dióxido de carbono con el rendimiento de la caña de azúcar, en el mismo no es posible observar directamente cual es el efecto del incremento de la concentración de carbono orgánico en la atmosfera sobre el rendimiento de la caña de azúcar. Esto es posible a través del modelo reducido de ecuaciones simultáneas. Los parámetros estimados de este modelo son los indicados en el Cuadro 4.

Variable exógena	Intercepto	PMA	CO ₂
RENDCAZ	14.44436	0.013664	0.124635
TEMP	16.03223	0	0.013574
Cuadro 4. Parámetros estimados del modelo de red		Fuente: Elaboración propia	

El análisis de los parámetros de la forma reducida permite observar que en el largo plazo el incremento de una parte por millón en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera incrementará el rendimiento de la caña de azúcar en aproximadamente 0.125 toneladas por hectárea. Análogamente, en el largo plazo, un incremento de un grado centígrado en la temperatura media anual incrementará el rendimiento de la caña de azúcar en 0.0137 toneladas por hectárea. En la forma reducida también es posible observar que en largo plazo el incremento de una parte por millón del dióxido de carbono incrementará la temperatura media anual en 0.013 grados centígrados.

Estos resultados están en línea en otras investigaciones como las realizadas por la Organización internacional del Azúcar (OIA, 2013) que, si bien no hace una estimación puntual del incremento en el rendimiento de la caña de azúcar debido a la temperatura y dióxido de carbono, si encuentra una relación positiva entre el rendimiento y las misma. Los resultados están en línea también a los hallazgos de Bravo et al (2012) quienes también encontraron una relación positiva.

Conclusiones.

En la presente investigación se ha encontrado que, en el largo plazo, existe una relación directa entre el rendimiento de la caña de azúcar el incremento de la temperatura, el incremento de la concentración de dióxido de carbono en la atmosfera. Es decir, el fenómeno del calentamiento global, al menos para México, ha tenido un efecto favorable para la caña de azúcar. Esto puede explicarse por el hecho de que la caña de azúcar es una planta C4 que debido a su fisiología y genética molecular la hacen un cultivo eficiente ante condiciones climáticas de un incremento en temperaturas, relativa escases de agua e incremento sostenido de la concentración de dióxido de carbono en la atmosfera.

Referencia.

- ❖ Bravo Mosqueda, E., Medina García, G., Ruíz Corral, J. A., Báez González, A. D. y Mariles Flores, V. (2012). Cambio climático y su impacto potencial en el sistema producto caña de azúcar en el área de abasto del ingenio Adolfo López Mateos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Publicación Especial Núm. 11, ISBN: 978-607-425-758-8, Pabellón de Arteaga, Ags., México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114328/1._Cambio_clim_tico_y_cultivos_azucareros.pdf Consultado 15 de marzo de 2018.
- ❖ IPCC (2006). Guidelines for national greenhouse gas inventories. Methodologies applicable to multiple land use categories. Chapter 2 in Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use. -IPCC (2007). Climate change 2007. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate
- ❖ Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- ❖ McKee, Trudy and McKee James (2009). Bioquímica. Las bases moleculares de la vida. McGraw Hill, 4ª edición, México, D.F.
- ❖ Moore, Paul, H. and Frederik C. Botha, Frederick, C. (2013). Sugarcane: physiology, biochemistry, and functional biology, John Wiley & Sons, Inc.
- ❖ Organización Internacional del Azúcar (2013). Cambio climático y cultivos azucareros. Londres,
- ❖ UK. Rein, Peter (2012).
- ❖ Ingeniería de la caña de azúcar. Editado por Verlag Dr. Albert Bartens KG – Berlin.
- ❖ USDA (2018). What Are Crop Simulation Models? <https://www.ars.usda.gov/northeast-area/beltsville-md-barc/beltsville-agricultural-research-center/adaptive-cropping-systems-laboratory/docs/what-are-crop-simulation-models/>. Consultado 3 de mayo de 2011