



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS

ANÁLISIS EMPÍRICO DEL IMPACTO DEL CAMBIO
CLIMÁTICO EN EL RENDIMIENTO DE MAÍZ Y SORGO
EN MÉXICO

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
COMISION DE EXAMENES PROFESIONALES

MAESTRO EN CIENCIAS EN ECONOMIA
AGRÍCOLA Y DE LOS RECURSOS NATURALES

PRESENTA

JOSE GILBERTO CORTES RAMIREZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE: RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ, DR.



CHAPINGO, EDO DE MÉXICO, DICIEMBRE DE 2018

ANÁLISIS EMPÍRICO DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RENDIMIENTO DE MAÍZ Y SORGO EN MÉXICO

Tesis realizada por José Gilberto Cortés Ramírez bajo la dirección del Jurado indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el título de:

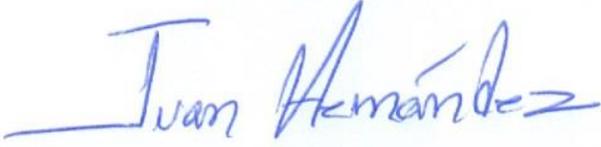
MAESTRO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS RECURSOS NATURALES

DIRECTOR:  _____

DR. RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ

ASESOR:  _____

M.C. JOSÉ MARÍA CONTRERAS CASTILLO

ASESOR:  _____

DR. JUAN HERNÁNDEZ ORTIZ

ASESOR:  _____

DR. FERMÍN SANDOVAL ROMERO

Contenido

I. INTRODUCCIÓN	14
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Objetivo	16
1.3 Hipótesis.....	16
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
III. MARCO TEÓRICO	21
3.1 Cambio climático	22
3.1.1 Causas	23
3.1.2 Consecuencias.....	26
3.1.3 Escenarios futuros ante el incremento de temperatura.....	31
3.2 Efecto invernadero	33
3.2.1 Gases de Efecto Invernadero (GEI).....	34
3.2.2 Dióxido de carbono (CO ₂).....	35
3.3 Procesos bioquímicos relevantes	39
3.3.1 Fotosíntesis	39
3.3.2 Ciclo de Calvin	40
3.3.3 Fotorrespiración	40
3.3.4 Metabolismos fotosintéticos.....	42
3.4 Teoría económica de la producción	44
3.4.1 La función de producción	44
IV. GENERALIDADES DE LOS CULTIVOS	49
4.1 Maíz	49
4.1.1 Características	49
4.1.2 Requerimientos	51
4.1.3 Panorama actual	52
4.2 Sorgo.....	56
4.2.1 Características	56

4.2.2	Requerimientos	57
4.2.3	Panorama actual	59
IV.	METODOLOGÍA	64
4.1	Modelos de ecuaciones simultáneas	64
4.1.1	Métodos de ecuaciones simultáneas	65
4.2	La elasticidad de la producción.....	67
4.3	Modelo para el sorgo.....	68
4.3.1	Formas funcionales y signos esperados	69
4.4	Modelo para el maíz	70
4.4.1	Formas funcionales y signos esperados	70
V.	RESULTADOS	72
5.1	Sorgo.....	72
5.1.1	Resultados estadísticos del modelo estructural	72
5.1.2	Resultados del modelo reducido	74
5.1.3	Análisis de los resultados en forma de elasticidades	74
5.1.4	Elasticidades de la forma reducida	75
5.2	Maíz	76
5.2.1	Resultados estadísticos del modelo estructural	76
5.2.2	Resultados del modelo reducido	77
5.2.3	Elasticidades de la forma reducida	78
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
VII.	BIBLIOGRAFIA Y SITIOS CONSULTADOS.....	81
VII.	ANEXOS	85
Anexo 1.	Modelo econométrico del maíz	85
Anexo 2.	Salida del modelo de maíz en SAS	86
Anexo 3.	Modelo econométrico del sorgo.....	91
Anexo 4.	Salida del modelo de sorgo en SAS	92

Anexo 5. Estimación de las elasticidades en la forma reducida del modelo de maíz	97
Anexo 6. Estimación de las elasticidades en la forma reducida del modelo de sorgo	98

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones mundiales de GEI antrópogenos	24
Figura 2. Forzamiento radiativo por emisiones e impulsores.	26
Figura 3. Anomalía de la temperatura.....	29
Figura 4. Cambio observado en la temperatura en superficie, 1901-2012.	30
Figura 5. Cambio observado en la precipitación anual sobre tierra.....	31
Figura 6. Concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO ₂) en Mauna Loa.	36
Figura 7. presión parcial de CO ₂ disuelto en el océano superficial	36
Figura 8. Función clásica de producción.....	45
Figura 9. El efecto de la mejora tecnológica.	46
Figura 10. Producción conjunta.	48

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efectos globales del cambio climático de acuerdo con el aumento de temperatura	32
Tabla 2. Variables utilizadas en la estimación del modelo	68
Tabla 3. Fuente de datos para modelo del sorgo	68
Tabla 4. Fuente de datos para modelo del maíz	70
Tabla 5. Estadísticos descriptivos de las variables	73
Tabla 6. Efecto de las variables climáticas sobre el rendimiento del sorgo	73
Tabla 7. Parámetros estimados del modelo reducido	74

Tabla 8. Elasticidades en el modelo reducido	75
Tabla 9. Estadísticas descriptivas de las variables	76
Tabla 10. Efecto de las variables climáticas sobre el rendimiento del maíz	77
Tabla 11. Parámetros estimados del modelo reducido	78
Tabla 12. Elasticidades en el modelo reducido	78

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Principales países productores de maíz	52
Gráfica 2. Principales países importadores de maíz	53
Gráfica 3. Principales países exportadores de maíz	53
Gráfica 4. Principales estados productores de maíz en México	55
Gráfica 5. Principales Estados por superficie sembrada de maíz (Ha).....	55
Gráfica 6. Principales países productores de sorgo	60
Gráfica 7. Principales países importadores de sorgo	60
Gráfica 8. Principales países exportadores de sorgo	61
Gráfica 9. Principales Estados productores de sorgo en México.....	62
Gráfica 10. Principales Estados por superficie sembrada de sorgo (Ha).....	62

SIGLAS Y ABREVIATURAS

CINU = Centro de Información de las Naciones Unidas

CMNUCC/ UNFCCC = Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

CAM = Metabolismo ácido de las crasuláceas (*Crassulacean Acid Metabolism*)

CO₂ = Dióxido de carbono

C₃ = Plantas en las que el CO₂ se integra en un compuesto de tres carbonos

C₄ = Plantas en las que el CO₂ se integra en un compuesto de cuatro carbonos

FAO = Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

GEI = Gases de Efecto Invernadero

INE = Instituto Nacional de Ecología

IPCC = Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

MC2E = Mínimos cuadrados en dos etapas

Mm = Milímetros

NOAA = Administración Nacional Oceánica y Atmosférica

OMM = Organización Mundial de Meteorología

ONU = Organización de las Naciones Unidas

PNUMA = Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

PMA = Precipitación media anual

Ppm= partes por millón

RENDMAI = Rendimiento del maíz

RENDSOR = Rendimiento del sorgo

SIAP = Servicio de Información Agrícola y Pesquera

SIAMI= Sistema de Información Arancelaria Vía Internet

SAGARPA = Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

DEDICATORIA

A mi familia en especial a mi madre y hermanos:

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su cariño y confianza.

A mis amigos Diego Belmonte, Abraham León, Francisco Mendoza, Omar Escobedo y Miriam Bautista:

Quienes a través del tiempo fuimos fortaleciendo una amistad y creando una familia, muchas gracias por toda su colaboración, por convivir todo este tiempo conmigo, por compartir experiencias, alegrías, frustraciones, tristezas, peleas, celebraciones y múltiples factores que ayudaron a que hoy seamos como una familia.

AGRADECIMIENTOS

- | | |
|--|---|
| <i>Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)</i> | <i>Por el apoyo económico otorgado para la realización y culminación de mis estudios de posgrado.</i> |
| <i>A la Universidad Autónoma Chapingo y a la División de Ciencias Económico-Administrativas (DICEA)</i> | <i>Por ser mi alma mater y permitir desarrollarme como profesionalista dentro de sus instalaciones.</i> |
| <i>Al Dr. Ramón Valdivia Alcalá</i> | <i>Por sus sabios y atinados consejos en mi estancia en el posgrado, quien con su conocimiento y su guía fue una pieza clave para que pudiera desarrollar cada etapa de esta investigación.</i> |
| <i>A todos los miembros del jurado</i> | <i>Por su participación y colaboración desinteresada en la revisión del documento final del presente trabajo de investigación.</i> |

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: JOSE GILBERTO CORTES RAMIREZ

Fecha de nacimiento: 02 de agosto de 1992

Lugar de nacimiento: Monterrey, N.L, México

CURP: CORG920802HNLRML09

Profesión: Licenciado en Economía

Cédula profesional: 10919138

Desarrollo académico

Preparatoria Agrícola, en Universidad Autónoma Chapingo, Edo. México

Licenciatura en Economía, en Universidad Autónoma Chapingo, Edo. México

Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales, en Universidad Autónoma Chapingo, Edo. De México.

RESUMEN GENERAL

ANÁLISIS EMPÍRICO DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RENDIMIENTO DE MAÍZ Y SORGO EN MÉXICO

Uno de los grandes desafíos que enfrenta la humanidad es el del cambio climático, el cual ha traído una serie de consecuencias como son el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, que a su vez se asocia a variaciones extremas de precipitación pluvial y al incremento de la temperatura media global.

La idea predominante es que las altas concentraciones de CO₂ atmosférico provocan efectos negativos en el rendimiento de los cultivos, sin embargo, existe cierto tipo de plantas que lejos de ser afectadas aprovechan muy bien el CO₂ y son más tolerantes a altas temperaturas, lo que incrementa su rendimiento en la producción. Es por ello, que el objetivo de esta investigación fue medir el impacto del dióxido de carbono en dos cultivos que pertenecen a la clase C₄, el maíz y el sorgo.

La producción agrícola depende del rendimiento y superficie del cultivo, a su vez, el rendimiento o productividad está asociado a una serie de variables, de las cuales dos son climáticas: la temperatura y la precipitación. Por lo cual, para analizar el impacto del cambio climático en el rendimiento de maíz y sorgo en México, se utilizaron modelos de ecuaciones simultáneas, específicamente el método de mínimos cuadrados en dos etapas (MC2E).

La información utilizada fue: el rendimiento de maíz y sorgo como variable endógena y la precipitación media anual, temperatura media anual y concentración de CO₂ atmosférico como variables exógenas. Todas ellas en el periodo de 1959-2015. Los resultados obtenidos en forma de elasticidades fueron que, en el caso del maíz, si se incrementa un 1% la concentración de CO₂ atmosférico el rendimiento incrementará en 5.09%, mientras que el sorgo incrementará su rendimiento en tan sólo 1.68%.¹

Palabras clave: CO₂, C₄, rendimiento, cambio climático, ecuaciones simultáneas

Tesis de Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales,
Universidad Autónoma Chapingo
Autor: José Gilberto Cortés Ramírez
Director de tesis: Dr. Ramón Valdivia Alcalá

GENERAL ABSTRACT

EMPIRICAL ANALYSIS OF THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON MAIZE AND SORGHUM YIELD IN MEXICO

One of the great challenges facing humanity is that of climate change, which has brought a series of consequences such as the increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere, which in turn is associated with extreme variations in rainfall and the increase in global average temperature.

The predominant idea is that high concentrations of atmospheric CO₂ cause negative effects on crop yield, however, there are certain types of plants that, far from being affected, take advantage of CO₂ very well and are more tolerant to high temperatures, which increases its performance in production. That is why, the objective of this research was to measure the impact of carbon dioxide on two crops that belong to class C₄, corn and sorghum.

The agricultural production depends on the yield and surface of the crop, in turn, the yield or productivity is associated to a series of variables, of which two are climatic: the temperature and the precipitation. Therefore, to analyze the impact of climate change on the yield of maize and sorghum in Mexico, simultaneous equation models were used, specifically the two-stage least squares method (MC2E).

The information used was: the yield of corn and sorghum as endogenous variable and the annual average precipitation, annual average temperature and concentration of atmospheric CO₂ as exogenous variables. All of them in the period 1959-2015. The results obtained in the form of elasticities were that, in the case of corn, if the concentration of atmospheric CO₂ increases by 1%, the yield will increase by 5.09%, while the sorghum will increase its yield by only 1.68%.²

Keywords: CO₂, C₄, yield, climate change, simultaneous equations.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, uno de los grandes desafíos que enfrenta la humanidad es el del cambio climático, el cual ha traído una serie de consecuencias como son el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmosfera, que a su vez se asocia a variaciones extremas de precipitación pluvial y al incremento de la temperatura media global. De acuerdo con informes del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) y el Convenio Marco de las Naciones Unidas para Cambio Climático (CMNUCC) (IPCC, 2007), la quema de combustibles de carbono desde la Revolución Industrial en el siglo XIX, ha incrementado la concentración de dióxido de carbono en la atmosfera, lo que ha dado lugar al calentamiento global.

Según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), México incrementó su emisión de CO₂ en 50% en los últimos 25 años. Por lo que surge la preocupación no sólo de México sino también de todos los países, de cómo afectará el cambio climático a la productividad de su agricultura. El cambio climático, particularmente el calentamiento global, puede afectar a la agricultura de muchas maneras, por ejemplo, se incrementarían los casos de plagas y enfermedades en lugares donde antes no había, el clima sería menos previsible lo que afectaría la planificación agrícola, las zonas climáticas y agroecológicas se modificarían, etc. Lo que conlleva a una disminución en el rendimiento y la calidad de los productos agrícolas.

La producción agrícola depende del rendimiento y superficie del cultivo, a su vez, el rendimiento o productividad está asociado a una serie de variables, de las cuales dos son climáticas: la temperatura y la precipitación. Por lo que el impacto del calentamiento global sobre la productividad de la agricultura en México o cualquier parte del mundo, puede realizarse a través del análisis de largo plazo y comportamiento histórico de las variables temperatura y precipitación.

Por lo general, las consecuencias del cambio climático sobre la productividad de la agricultura es negativo, sin embargo, existen cultivos capaces de asimilar mejor el CO₂, tal es el caso de los cultivos tipo C₄, llamados así porque el producto inmediato de la fijación de CO₂ es una molécula de cuatro carbonos. En este grupo se encuentran cultivos como el maíz, la caña de azúcar, remolacha azucarera, sorgo, entre otros. Debido a sus características fisiológicas, genéticas y evolutivas el incremento de la concentración de dióxido de carbono en la atmosfera tiene un “efecto de fertilización” en tales cultivos incrementando su productividad, por lo que el cambio climático en ese aspecto podría ser incluso favorable.

De los cultivos indicados como C₄ el maíz y sorgo son muy importantes en México, ya que el maíz es el componente principal en la dieta de los mexicanos, por lo que garantizar la seguridad alimentaria de este producto básico a la población es de carácter estratégico. Por otro lado, el sorgo es muy importante debido a su uso como materia prima para la elaboración de alimentos balanceados para distintos tipos de ganado, por lo que asegurar su producción es asegurar la oferta de carne en el país.

1.1 Planteamiento del problema

El cambio climático como consecuencia del incremento de gases efecto invernadero generados por un acelerado desarrollo económico asociado a un aumento de la población puede amenazar la sostenibilidad socioambiental en un futuro. Aunque el cambio climático no afecta directamente la agricultura, puede hacerlo de manera indirecta a través de inundaciones y deslizamientos en terrenos cultivados, proliferación de plagas y expansión de enfermedades, cambios en los ciclos vegetativos de los cultivos, cambios en los ciclos de plagas, mayor estacionalidad de la producción, etc. Lo que amenaza la capacidad de los agricultores para producir y mantener cultivos de calidad en forma sostenible.

1.2 Objetivo

Determinar el impacto que tiene el calentamiento global expresado en la emisión de CO₂ en el rendimiento de Maíz y Sorgo en México.

1.3 Hipótesis

En los cultivos del tipo C₄ las altas concentraciones de CO₂ atmosférico resultan benéficas para incrementar el rendimiento y mejorar la seguridad alimentaria.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

En la actualidad, uno de los grandes desafíos que enfrenta la humanidad es el del cambio climático provocado por el incremento en la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO₂), de acuerdo con Mendelsohn, R. (2008), el mayor impacto económico conocido del cambio climático es sobre la agricultura debido al tamaño y la sensibilidad del sector. El calentamiento causa el mayor daño a la agricultura en los países en desarrollo principalmente porque muchas granjas en las latitudes bajas ya soportan climas que son demasiado calientes, sin embargo, aclaró que los impactos del cambio climático no serán los mismos para todos los países en desarrollo o incluso para cada región dentro de un país y mencionó que pese a que habrá daños también puede haber efectos beneficiosos.

Existen muchas iniciativas en pro del medio ambiente como reducir las emisiones de CO₂, generar menos residuos sólidos, etc. Sin embargo, pese a que se minimicen las emisiones estas siguen siendo un problema, por lo que una solución es la propuesta por Nogia, P., Sidhu, G., et al. (2016), la cual consiste en fijar el carbono mediante métodos biológicos y no biológicos. Dentro de los biológicos se encuentran fenómenos naturales que incluyen procesos oceánicos, geológicos y químicos que suceden en la tierra. La retención de carbono del suelo y la fotoabsorción lumínica también han contribuido a la fijación del carbono atmosférico. La fotoabsorción se realiza principalmente mediante diversos mecanismos fotosintéticos, como C₃, C₄ y las vías del metabolismo del ácido crasuláceo (CAM) de las plantas, los carboxisomas de las cianobacterias y los pirenoides de las microalgas.

Robert, M (2002), en su estudio sobre la captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra, encontró que todos los resultados experimentales demuestran que un aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera induce un incremento de la biomasa o de la Red Primaria de Producción por

medio de la fertilización con carbono, con un papel muy importante sobre la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas. La ganancia en la fijación de CO_2 podría ser importante. El incremento en la productividad medido a causa de la duplicación de la concentración del CO_2 -predicha para el año 2100- es de cerca del 30 por ciento para las plantas C_3 . Otro efecto importante del aumento del CO_2 es la disminución de la transpiración de las plantas a través de los estomas lo cual redundaría en una mayor eficiencia en el uso del agua, sobre todo en las plantas C_4 . En lo que se refiere al agua, hay un efecto neto favorable del CO_2 sobre la reducción de la transpiración de las plantas.

Jansson, C., Wullschlegel, S., et al. (2010), estudiaron la asimilación fotosintética del dióxido de carbono atmosférico por las plantas terrestres, llegaron a la conclusión de que los cultivos de bioenergía (ej. maíz) cumplen la doble función de proporcionar biocombustibles que compensan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de combustibles fósiles y la captación de C en el suelo a través de sistemas de raíces extensivos. De hecho, Bourgeon, J. & Tréquer, D. (2010) hicieron un estudio en el cual explicaron cómo los Estados Unidos y la Unión Europea han estado implementando programas considerables de apoyo a los biocombustibles desde el comienzo de la década. Ya que apoyar a la industria de los biocombustibles aumenta el precio de la materia prima agrícola y, por lo tanto, aumenta los ingresos de los agricultores y reduce la necesidad de apoyo directo a los ingresos.

Marcos, B., et al. (2015), hicieron un estudio en México de cuatro variedades de maíz para determinar cuál es mayor fijador de CO_2 , las variedades fueron maíz blanco, amarillo, negro y cacahuacintle; se sembraron en tres ambientes distintos: montaña, valle y planicie. Después de la cosecha hicieron estudios químicos para determinar cuál tenía mayor presencia de CO_2 en su biomasa. Encontraron que el maíz amarillo es el que fijó más dióxido de carbono, mientras que los menos fijadores fueron el maíz negro y el cacahuacintle. El ambiente que mejor fijó carbono fue el de montaña y la parte de la planta con la mayor presencia de CO_2 fue el tallo.

Hace medio siglo, Hatch & Slack (1966) (citado en Sage, R. 2016) publicaron el primer informe de una vía de fijación de CO₂ de cuatro carbonos identificada en la caña de azúcar. En las siguientes cinco décadas, se ha aprendido mucho sobre las plantas C₄, de modo que ahora es posible colocar casi todas las especies C₄ en sus respectivos linajes evolutivos. A partir de entonces han surgido investigaciones que estudian los beneficios que pueden traer las altas concentraciones de dióxido de carbono en este tipo de plantas.

De acuerdo con Schlüter, U. & Weber, A. (2016), la fotosíntesis en plantas del tipo C₄ permite una alta eficiencia de conversión de energía fotosintética, así como una alta eficiencia de uso de agua y nitrógeno. Dada la multitud de cambios bioquímicos, estructurales y moleculares en comparación con la fotosíntesis C₃, parece poco probable que un rasgo tan complejo evolucione en un solo paso. Es por ello que centraron su investigación en la reconstrucción de la secuencia de los eventos evolutivos, ya que es de suma importancia en la ingeniería genética para así poder comprender y mejorar el rendimiento de otros cultivos que no sean del tipo C₄.

Urban, D., Sheffield, J. & Lobell, D. (2015) afirmaron que: “los modelos estadísticos que explican explícitamente las interacciones entre calor y humedad, que no han sido representados en modelos empíricos previos, conducen a una mejora significativa del modelo y una variabilidad del rendimiento proyectada significativamente mayor bajo tendencias de calentamiento y secado que cuando se tiene en cuenta cada factor independientemente”.

McGrath, J. & Lobell, D. (2011) presentaron un nuevo método para estimar el efecto de la fertilización de CO₂ en condiciones secas, basado en una combinación de rendimiento, datos climáticos y experimentos de campo que no requieren elevación de CO₂. Estimaron que aproximadamente 50 años de aumento de CO₂ (es decir, un aumento de 73 ppm) dio como resultado una mejora del 9% y 14% del rendimiento en condiciones secas para maíz y soya,

respectivamente, que son similares a las estimaciones derivadas de estudios de enriquecimiento de CO₂ al aire libre.

Por su parte, Muluneh, A., Biazin, B., et al. (2015) evaluaron los impactos potenciales del cambio climático en los rendimientos de maíz y trigo en el Valle Central del Rift (CRV) de Etiopía. Su objetivo fue medir, a través del generador meteorológico diario MarkSimGCM, los efectos del dióxido de carbono atmosférico elevado y los cambios en la precipitación durante los dos períodos futuros (2020-2049 y 2066-2095). Encontraron que el efecto combinado de elevado CO₂ y los factores climáticos proyectados aumentan el rendimiento del maíz hasta en un 59% en las áreas subhúmedas / húmedas del CRV, pero podrían resultar en una disminución de hasta el 46% en las áreas semiáridas bajo el modelo ECHAM5. Sin embargo, el rendimiento de maíz aumenta en todas las partes del CRV bajo la media del conjunto de modelos. El rendimiento del trigo no muestra una respuesta significativa a los cambios proyectados de la lluvia, pero aumenta hasta en un 40% debido a la elevación del CO₂.

Autores como Long, S., Marshall-Colon, A., et al. (2015), buscaron satisfacer la demanda mundial de alimentos en el futuro, incrementando el rendimiento de los cultivos mediante la fotosíntesis. Afirmaron que: “la fotosíntesis, que se ha mejorado poco en cultivos y está muy por debajo de su límite biológico, emerge como la ruta clave para aumentar el potencial de rendimiento genético de nuestros principales cultivos. Por lo tanto, existe una necesidad oportuna de acelerar nuestra comprensión del proceso fotosintético en cultivos para permitir mejoras informadas y guiadas a través de la ingeniería genética asistida por silicio”. Dejando claro la importancia que tienen los cultivos del tipo C₄, ya que estos son más tolerantes a las altas temperaturas y son buenos fijadores de CO₂.

Un claro ejemplo de la importancia de las plantas C₄, fue presentado por Driever, S. & Kromdijk, J. (2013), quienes buscaron potenciar el rendimiento en cultivos tipo C₃ utilizando el mecanismo fijador de dióxido de carbono de las plantas C₄. Llegaron a la conclusión de que la estrategia de mejorar el

rendimiento de los cultivos mediante la introducción de un fotorespirador en cultivos C_3 es sin duda, muy prometedora para aumentar la eficiencia máxima de conversión de energía de la irradiación solar interceptada en biomasa. Sin embargo, es necesario estudiar una serie de factores adicionales para determinar hasta qué punto esta mejora puede utilizarse para incrementar el rendimiento.

III. MARCO TEÓRICO

Desde sus orígenes, la humanidad ha dependido de la energía para satisfacer sus necesidades como sociedad; aunque en principio sólo se requería de la fuerza animal, es decir, animales de carga, así como la propia fuerza muscular del hombre. Sin embargo, con el paso del tiempo la humanidad se fue expandiendo y modernizando, por lo que la fuerza animal ya no era suficiente y era necesario encontrar otras fuentes de energía. Cuando aparecieron los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas) rápidamente se convirtieron en la principal fuente de energía para la humanidad.

Observaciones efectuadas en todos los continentes y en la mayoría de los océanos evidencian que numerosos sistemas naturales están siendo afectados por cambios del clima regional, particularmente por un aumento de la temperatura que, a su vez, se debe a las emisiones mundiales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por efecto de actividades humanas. Las concentraciones atmosféricas mundiales de CO₂, metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) han aumentado notablemente por efecto de las actividades humanas desde 1750, y son actualmente muy superiores a los valores preindustriales, pues han incrementado en un 70% entre 1970 y 2004. (IPCC, 2007)

El dióxido de carbono (CO₂) es el GEI antropógeno más importante. Entre 1970 y 2004, sus emisiones anuales han aumentado en aproximadamente un 80%, pasando de 21 a 38 gigatoneladas (Gt), y en 2004 representaban un 77% de las emisiones totales de GEI antropógenos. (IPCC, 2007, p.36)

3.1 Cambio climático

De acuerdo con la contribución del Grupo de Trabajo II al V Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), se define al cambio climático como: “Variación del estado del clima, identificable (mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente

decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo”. (IPCC, 2014)

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido 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 durante períodos de tiempo comparables” (IPCC, 2014).

3.1.1 Causas

El cambio climático se debe principalmente al incremento mundial de temperatura, la mayor parte del aumento observado del promedio mundial de temperatura desde mediados del siglo XX se debe muy probablemente al aumento observado de las concentraciones de GEI antropógenos. Es probable que se haya experimentado un calentamiento antropógeno apreciable en los últimos cincuenta años, en promedio para cada continente (exceptuada la región antártica). La variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles en la atmósfera, y las variaciones de la cubierta terrestre y de la radiación solar, alteran el equilibrio energético del sistema climático. Las emisiones mundiales de GEI por efecto de actividades humanas han aumentado, desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004. (IPCC, 2007)

El hombre ha ido desechando CO₂ a la atmósfera con mayor velocidad de la que los sumideros de carbono de la Tierra necesitan para eliminarlo, esto implica que se ha excedido la capacidad de absorción y almacenamiento del océano y biosfera terrestre (capacidad de carga de los sumideros de carbono) y ha alterado su funcionamiento (Arellano, 2017). El Presupuesto de Carbono Mundial (PCM) de las últimas décadas, muestra que la cantidad de CO₂ que emite el hombre a la atmósfera rebasa la capacidad de carga de los sumideros

de carbono, lo cual está contribuyendo al calentamiento de la tierra (IPCC, 2007). Dicho calentamiento influye en el sistema atmosférico y puede cambiar las condiciones climáticas regional o global, muy probablemente aumentará la frecuencia de los valores extremos cálidos, de las olas de calor y de las precipitaciones intensas, puede incrementar la intensidad de los ciclones tropicales; las precipitaciones en latitudes altas, y probablemente disminuirán en la mayoría de las regiones terrestres subtropicales, como continuación de las tendencias recientemente observadas, lo que se conoce como cambio climático.

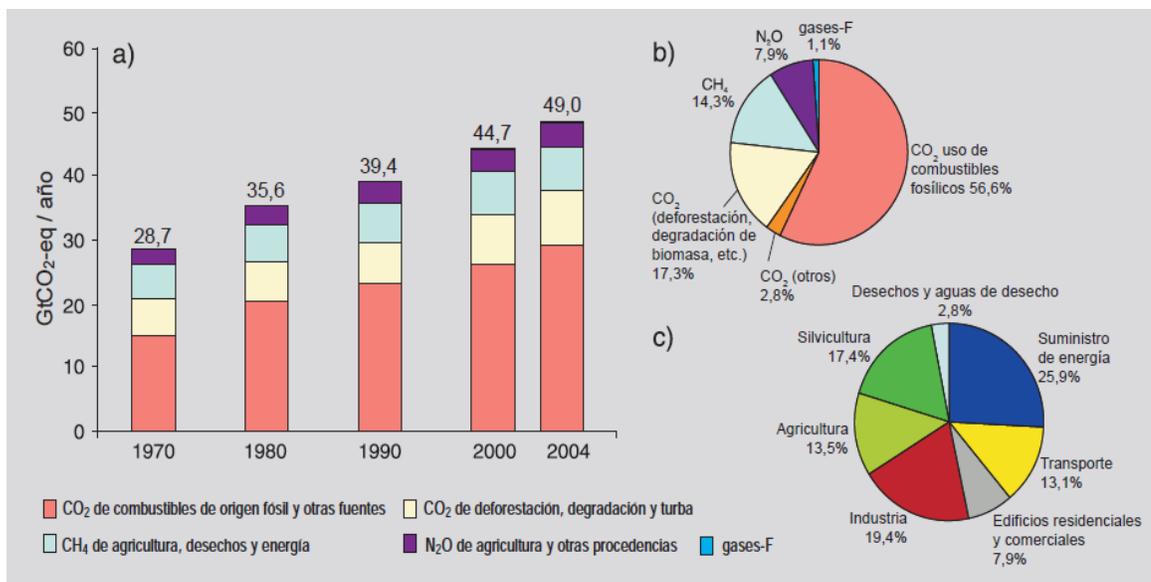


Figura 1. Emisiones mundiales de GEI antropógenos. En el sector silvicultura se incluye la deforestación. Fuente: IPCC, 2007, p.5

Lo que se observa en la figura 1, es: a) Emisiones anuales mundiales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004.5 b) Parte proporcional que representan diferentes GEI antropógenos respecto de las emisiones totales en 2004, en términos de CO₂ equivalente. c) Parte proporcional que representan diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropógenos en 2004, en términos de CO₂ equivalente. De acuerdo con Magaña, V. (2004), la Tierra absorbe radiación solar (radiación de onda corta), principalmente en la superficie, y la redistribuye por circulaciones atmosféricas y oceánicas para intentar compensar los contrastes térmicos, principalmente del ecuador a los polos. La energía

recibida es re-emitada al espacio (radiación de onda larga) para mantener un balance entre energía recibida y re-emitada en el largo plazo. Cualquier proceso que altere dicho balance, ya sea por cambios en la radiación o en su distribución en la Tierra, se reflejará como cambios en el clima. A esos cambios en la disponibilidad de energía radiativa se les conoce como forzamientos radiativos. Cuando son positivos dichos cambios, tienden a calentar la superficie de la Tierra. Por el contrario, sí el forzamiento radiativo es negativo tiende a enfriarla.

Con el incremento de los GEI en la atmosfera se reduce la eficiencia con la cual la tierra re-emite la energía recibida al espacio, por lo que una parte de la radiación saliente de onda larga hacía el espacio es re-mitada en la superficie terrestre. Dicho de otro modo, si las concentraciones de GEI continúan incrementando, la temperatura en el planeta tenderá a aumentar también, es decir, tendrá una tendencia positiva.

El forzamiento radiativo total es positivo y ha dado lugar a la absorción de energía por el sistema climático. La principal contribución al forzamiento radiativo total proviene del aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera que se viene produciendo desde 1750. (IPCC, 2013, p.11)

En la figura 2 de forzamiento radiactivo se aprecia lo siguiente: Estimaciones de forzamiento radiativo en 2011 respecto de 1750, e incertidumbres agregadas de los principales impulsores del cambio climático. Los valores son el forzamiento radiativo medio global, dividido de acuerdo con los compuestos emitidos o procesos que resultan en una combinación de impulsores. Las mejores estimaciones del forzamiento radiativo neto se indican mediante rombos negros con los correspondientes intervalos de incertidumbre; los valores numéricos se indican a la derecha de la figura, junto con el nivel de confianza en el forzamiento neto (MA: muy alto, A: alto, M: medio, B: bajo, MB: muy bajo). El forzamiento por albedo, debido al carbono negro sobre la nieve y el hielo, se incluye en la barra de aerosoles de carbono negro. No se muestran los forzamientos pequeños por estelas de condensación (0,05 W/m², incluidos los

cirrus originados por estelas de condensación) y los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF6) (total de 0,03 W/m²). Los forzamientos radiativos correspondientes a las distintas concentraciones de gases se pueden obtener sumando las barras del mismo color. El forzamiento volcánico no se incluye, ya que su carácter episódico hace difícil la comparación con otros mecanismos de forzamiento. Se proporciona el forzamiento radiativo antropógeno total para tres años diferentes, en relación con 1750. (IPCC, 2013, p.12)

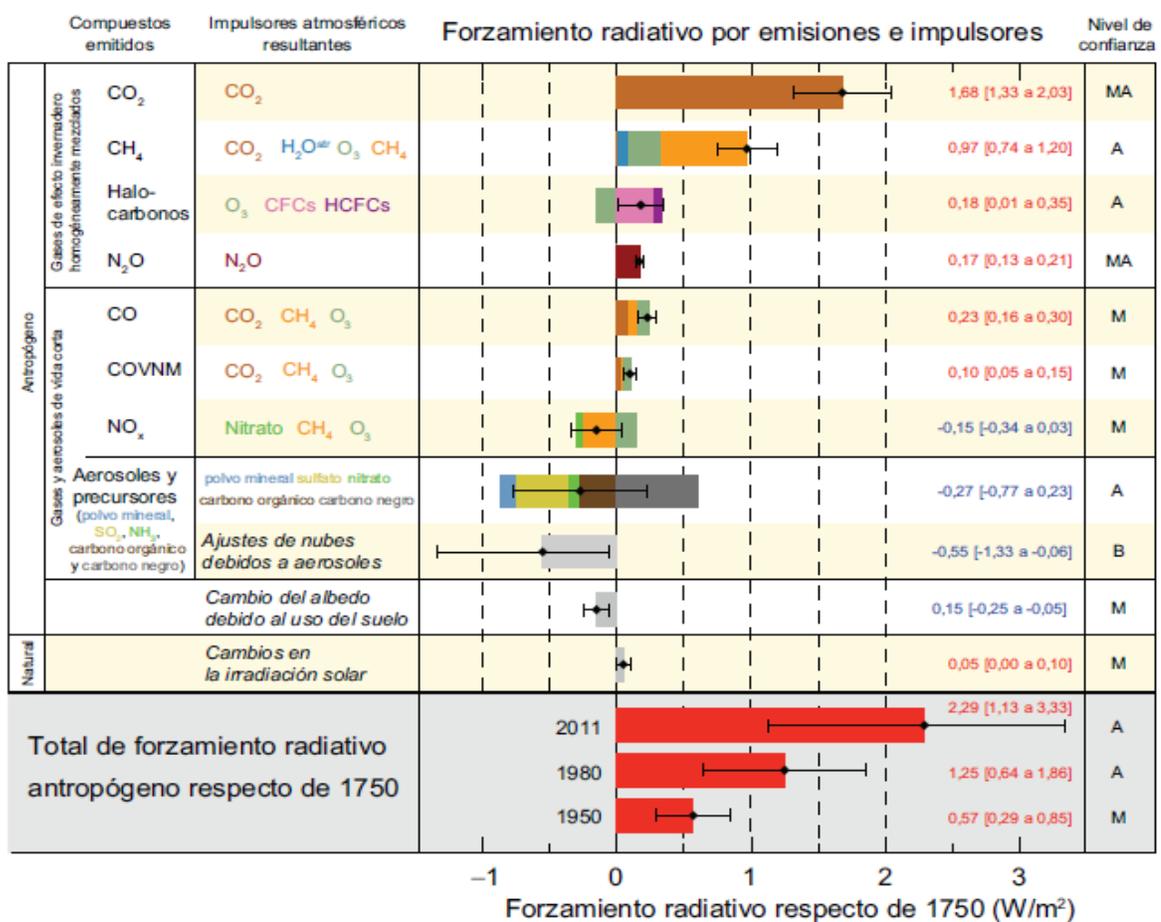


Figura 2. Forzamiento radiativo por emisiones e impulsores. Fuente: IPCC, 2013, p.12

3.1.2 Consecuencias

De acuerdo con el IPCC (2007), los cambios a escala regional abarcan:

- un calentamiento máximo sobre tierra firme y en la mayoría de las latitudes septentrionales altas, y mínimo sobre el océano austral y partes del Atlántico Norte, como continuación de recientes tendencias observadas.
- La contracción de la superficie de las cubiertas de nieve, en la mayor profundidad de deshielo en la mayoría de las regiones de permafrost, y en la menor extensión de los hielos marinos; en algunas proyecciones basadas en escenarios IEEE, los hielos marinos de la región ártica desaparecerían casi completamente al final de los veranos en los últimos años del siglo XXI.
- Muy probablemente aumentará la frecuencia de los valores extremos cálidos, de las olas de calor y de las precipitaciones intensas.
- Probablemente aumentará la intensidad de los ciclones tropicales; menor confianza en que disminuya el número de ciclones tropicales en términos mundiales.
- Desplazamiento hacia los polos de las trayectorias de las tempestades extratropicales, con los consiguientes cambios de las pautas de viento, precipitación y temperatura.
- Muy probablemente aumentarán las precipitaciones en latitudes altas, y probablemente disminuirán en la mayoría de las regiones terrestres subtropicales, como continuación de las tendencias recientemente observadas.

Cambios en sistemas y sectores:

- los ecosistemas siguientes:
 - terrestres: tundra, bosques boreales y regiones montañosas, debido a su sensibilidad al calentamiento; ecosistemas de tipo Mediterráneo, debido a la disminución de las lluvias; y bosques pluviales tropicales en que la precipitación disminuye;
 - costeros: manglares y marismas, debido a múltiples factores de estrés;

- marinos: arrecifes de coral, debido a múltiples factores de estrés; el bioma de los hielos marinos, debido a su sensibilidad al calentamiento;
- Los recursos hídricos de ciertas regiones secas de latitudes medias¹³ y en los trópicos secos, debido a la alteración de las precipitaciones de lluvia y de la evapotranspiración, y en áreas dependientes de la nieve y del deshielo;
- La agricultura en latitudes medias, debido a una menor disponibilidad de agua;
- Los sistemas costeros bajos, debido al peligro de aumento del nivel del mar y al mayor riesgo de fenómenos meteorológicos extremos;
- La salud humana, en poblaciones con escasa capacidad adaptativa.

Regiones:

- La región ártica, debido a los impactos de la gran rapidez del proyectado calentamiento sobre los sistemas naturales y las comunidades humanas;
- África, debido a su escasa capacidad adaptativa y a los impactos del cambio climático proyectados
- Las islas pequeñas en que las poblaciones y las infraestructuras estarían muy expuestas a los impactos del cambio climático
- Los grandes deltas de Asia y África, por ser regiones muy pobladas y muy expuestas al aumento del nivel del mar, a las mareas de tempestad y a las crecidas fluviales.

Desde 1950, aproximadamente, se han observado cambios en numerosos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. Es muy probable que el número de días y noches fríos haya disminuido y que el número de días y noches cálidos haya aumentado a escala mundial, y es probable que en gran parte de Europa, Asia y Australia haya aumentado la frecuencia de las olas de calor. Es probable que existan más regiones en las que haya aumentado el número de sucesos de precipitaciones intensas que en las que haya disminuido, y es probable que la frecuencia o intensidad de las precipitaciones intensas haya aumentado en América del Norte y Europa (IPCC, 2013).

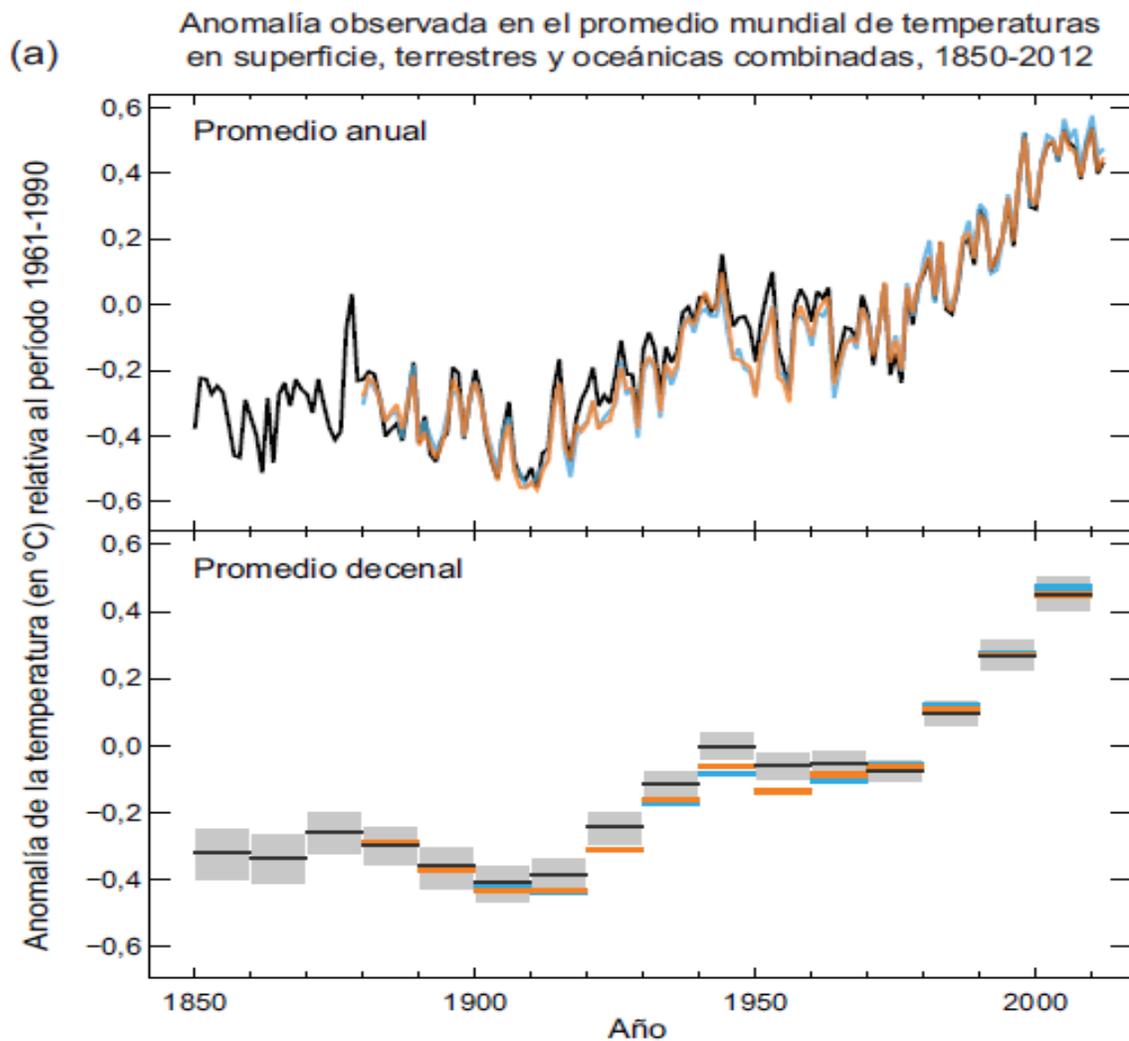


Figura 3. Anomalía de la temperatura. Fuente: IPCC, 2013, p.4

En la figura 3 se describen las anomalías observadas en el promedio mundial de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas combinadas, desde 1850 hasta 2012, a partir de tres conjuntos de datos. Imagen superior: valores medios anuales. Imagen inferior: valores medios decenales, incluida la estimación de la incertidumbre para un conjunto de datos (línea negra). Las anomalías son relativas a la media del período 1961-1990 (IPCC, 2013).

(b) Cambio observado en la temperatura en superficie, 1901-2012

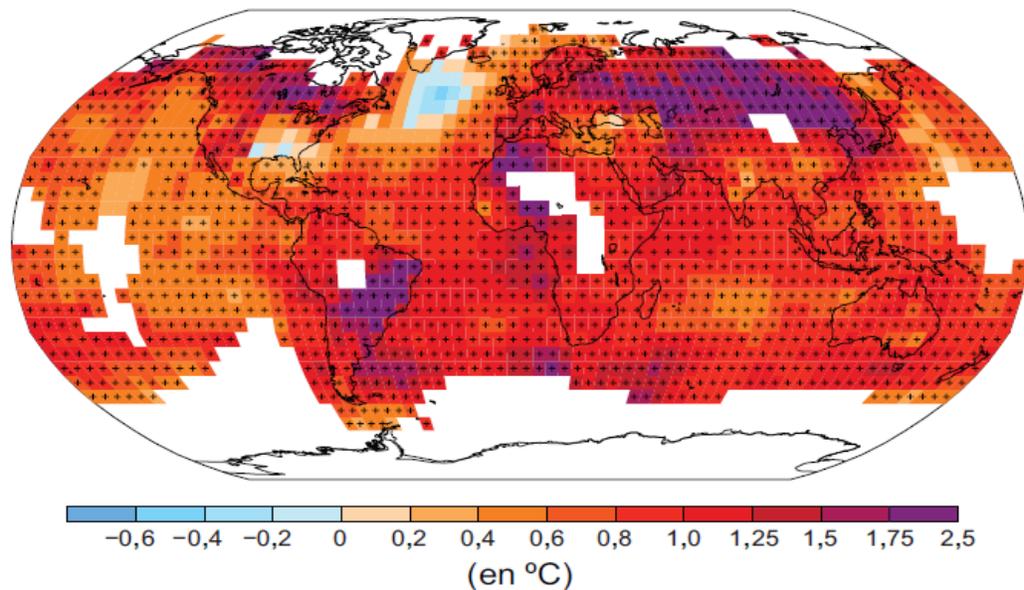


Figura 4. Cambio observado en la temperatura en superficie, 1901-2012. Fuente: IPCC, 2013, p.4

En la figura 4 se aprecia el mapa de los cambios observados en la temperatura en superficie entre 1901 y 2012, derivado de las tendencias en la temperatura determinadas por regresión lineal de un conjunto de datos (línea naranja en la imagen a). Se han calculado las tendencias en los casos en que la disponibilidad de datos ha permitido efectuar una estimación fiable (es decir, solo para cuadrículas con más del 70% de registros completos y más del 20% de disponibilidad de datos en el primer y último 10% del período de tiempo). Las demás áreas se muestran con color blanco. Las cuadrículas que muestran que la tendencia es significativa al nivel del 10% se indican con un signo + (IPCC, 2013).

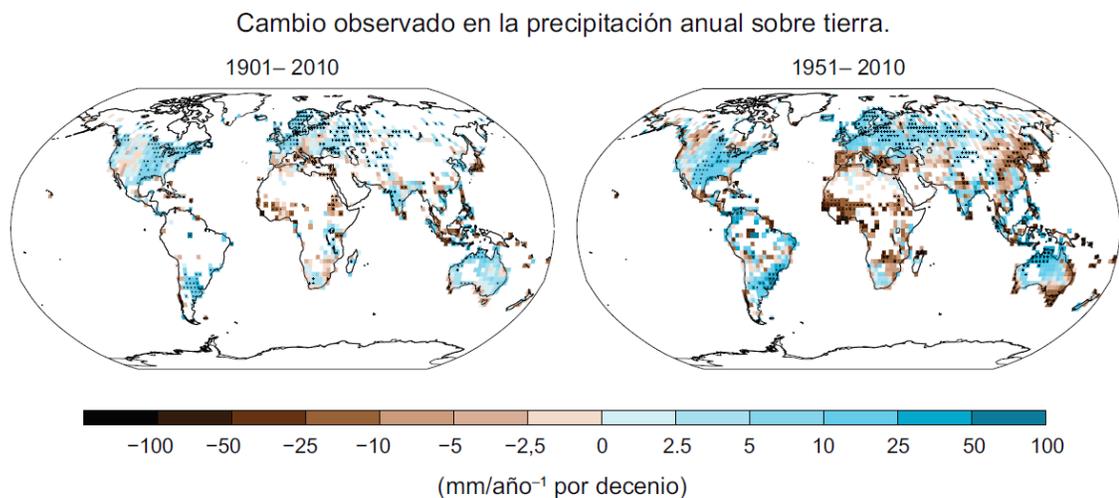


Figura 5. Cambio observado en la precipitación anual sobre tierra. Fuente: IPCC, 2013, p.6

Lo que se observa en la figura 5 son los mapas de los cambios observados en la precipitación, entre 1901 y 2010, y entre 1951 y 2010 (tendencias en la acumulación anual, calculadas de acuerdo con los mismos criterios empleados anteriormente).

3.1.3 Escenarios futuros ante el incremento de temperatura

El Informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones (IEEE, 2000) proyecta un aumento de las emisiones mundiales de GEI de entre 25% y 90% (CO₂-eq) entre 2000 y 2030, suponiendo que los combustibles de origen fósil mantengan su posición dominante en el conjunto mundial de fuentes de energía hasta 2030 como mínimo. Otros escenarios más recientes, que no contemplan medidas de mitigación de las emisiones adicionales, arrojan resultados similares.

Para una mejor comprensión de los impactos que puede tener el cambio climático provocado por incrementos en la temperatura, a continuación se muestra una tabla presentada en el informe stern, 2006 (citado en Arellano, A. 2017).

Tabla 1. Efectos globales del cambio climático de acuerdo con el aumento de temperatura

Aumento de temperatura	Impactos sobre el agua	Impactos sobre la salud	Impactos sobre los ecosistemas	Otros impactos
1°C	Los glaciares andinos desaparecen totalmente, amenazando el suministro de agua de 50 millones de personas.	Al menos 300.000 personas adicionales por año mueren de enfermedades relacionadas con el cambio climático, por ejemplo, malaria, dengue y malnutrición.	Al menos 10% de especies de la flora y la fauna continentales enfrentan la extinción.	Más intensidad de eventos extremos, como las olas de calor.
2°C	El suministro de agua en regiones como el Mediterráneo podría bajar entre 20% y 30%.	Hasta 10 millones más de personas se verán afectadas por inundaciones costeras por año.	La reducción en la disponibilidad de agua afecta negativamente la productividad agrícola en los países tropicales. Alto riesgo de extinción de las especies árticas, incluso el oso polar y el caribú. Se presenta un blanqueamiento más frecuente de los corales, de los que dependen cerca de 500 millones de personas en el mundo para alimentos, ingresos y defensa costera.	La capa de hielo que cubre a Groenlandia puede empezar a derretirse sin reversa. Es un fenómeno que aumentaría el nivel del mar. Su desaparición final, después del siglo veintiuno, produciría un aumento eventual de siete metros en el nivel del mar.
3°C	Entre mil y cuatro mil millones más de personas sufren de escasez de agua, mientras que entre mil y cinco mil millones reciben más agua con riesgos posibles de inundaciones.	Entre 1 millón y 170 millones más de personas se verían afectadas por las inundaciones.	Entre 20% y 50% de las especies en riesgo de extinción, incluso hasta 60% de los mamíferos.	Aumento del riesgo de cambios abruptos en la circulación atmosférica (por ejemplo, los monzones).
4°C	El suministro de agua en	Hasta 80 millones más de	Declive de entre 15% y 30% de la	Aumento del riesgo del

	regiones como el Mediterráneo podría bajar entre 30% y 50%.	personas en riesgo de malaria en África.	productividad agrícola en África. Regiones enteras, incluso partes de Australia, ya no son propicias para la producción.	colapso de la capa de hielo occidental del Antártico. Aumento del riesgo del colapso de la corriente del Atlántico.
5°C	Posible desaparición de glaciares en el Himalaya, afectando a un cuarto de la población de China y a cientos de millones en India.	Se agudizan los problemas de salud anotados en los intervalos de temperatura anteriores.	Aumento en la acidez de los océanos, con graves efectos para los ecosistemas marinos, entre ellos los manglares. Extinción de más especies.	Aumento en el nivel del mar amenaza ciudades como Nueva York, Londres y Tokio.

Fuente: Informe Stern (2006).

3.2 Efecto invernadero

De acuerdo con Garduño, R. (2004), Todos los cuerpos emiten radiación que son ondas electromagnéticas que no necesitan ningún medio material para propagarse, más bien la materia dificulta su avance. Como cualquier onda, las electromagnéticas se caracterizan por su longitud de onda o por su frecuencia, siendo ambas inversamente proporcionales: una onda larga es de baja frecuencia y una corta es de alta frecuencia. La radiación emitida depende de la temperatura del cuerpo emisor en dos aspectos: por un lado, conforme aumenta la temperatura la cantidad de radiación también aumenta y, por otro, cuando la temperatura sube la longitud de onda disminuye.

En la atmósfera y el clima actúan dos tipos de radiaciones distintos: la luz visible originada en el Sol y la radiación infrarroja (invisible) emitida por la Tierra. Por la diferencia en su longitud de onda, a la radiación solar se le llama de onda corta, y a la terrestre, de onda larga.

El efecto invernadero es resultado de que el aire es demasiado transparente para la radiación de onda larga y muy opaco para la radiación de onda corta, es

decir, la atmosfera funge como un filtro radiativo que deja pasar los rayos solares, de los cuales una parte es absorbida por la superficie terrestre (mares, continentes, plantas, etc.) que se calienta y por consiguiente emite radiación de onda corta (infrarroja) que es atrapada (absorbida) por la atmosfera y las nubes.

Es por ello que se le conoce como efecto invernadero, ya que funciona de manera similar a las instalaciones construidas para cultivar plantas en ambientes más cálidos que el exterior, ya que el techo de un invernadero deja entrar la radiación solar y bloquea la radiación terrestre generada en su interior. Aunque hay autores que están en desacuerdo con el nombre de efecto invernadero, ya que un invernadero se calienta más por impedir la convección que por atrapar radiación, y sugieren que se le llame efecto atmosférico.

3.2.1 Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Ruíz, L. y Cruz, X. (2004), definen a los gases de efecto invernadero como aquellos que son capaces de atrapar la radiación infrarroja que sale de la superficie de la tierra al espacio y transferirla, en forma de calor, al resto de los gases que forman la atmosfera.

Los gases de efecto invernadero se dividen en dos grupos, los de efecto directo y los de efecto indirecto, dentro de los primeros se encuentran aquellos que tienen la capacidad de influir en la concentración atmosférica de otros gases de efecto invernadero; por ejemplo, el ozono, que además de su carácter oxidante en la atmosfera baja, puede también atrapar radiación infrarroja y filtrar radiación ultravioleta.

Dentro de los gases de efecto invernadero directos se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y los halocarbonos. Por su parte, en los gases de efecto indirecto se encuentran los óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), el bióxido de azufre y los compuestos orgánicos volátiles no metánicos.

Ya que el dióxido de carbono (CO_2) es el Gas de Efecto Invernadero (GEI) antropógeno más importante y es también objeto de la presente investigación, sólo se abundará sobre él.

3.2.2 Dióxido de carbono (CO_2)

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro compuesto por un átomo de carbono y dos de oxígeno en enlaces covalentes. El CO_2 forma parte de la naturaleza y es indispensable para la vida en la tierra, de no existir, las plantas no existirían, ya que éstas lo necesitan para realizar la fotosíntesis. El CO_2 no es realmente un tóxico, en el sentido de daño o envenenamiento por inhalación, ya que es un gas que los seres vivos exhalan en su respiración y se encuentra en el aire gracias a los pulmones de los animales (incluyendo a los seres humanos) y en el agua, debido a las branquias de los peces. En la atmósfera, el carbono existe predominantemente en forma oxidada: el dióxido de carbono. Este gas forma parte del ciclo global del carbono y su tiempo de vida en la atmósfera es de 5 a 200 años. (Cuatecontzi y Gasca, 2004).

También se puede encontrar al dióxido de carbono, como resultado del proceso de descomposición de materiales orgánicos, las emisiones de gases volcánicos, los géiseres, los cuales surgen por la liberación de dióxido de carbono contenido en una acumulación de agua subterránea, otro lugar muy común donde se encuentra en grandes cantidades es en yacimientos petroleros y gas natural.

La primera causa de la creciente presencia del dióxido de carbono en la atmósfera, se le adjudica al excesivo uso del petróleo, gas y carbón, para proporcionar suficiente combustible a las fuentes energéticas, que satisfacen las demandas del ser humano; se debe también a las descontroladas deforestaciones, puesto que las plantas son las encargadas de convertir el CO_2 en oxígeno (Cuatecontzi y Gasca, 2004).

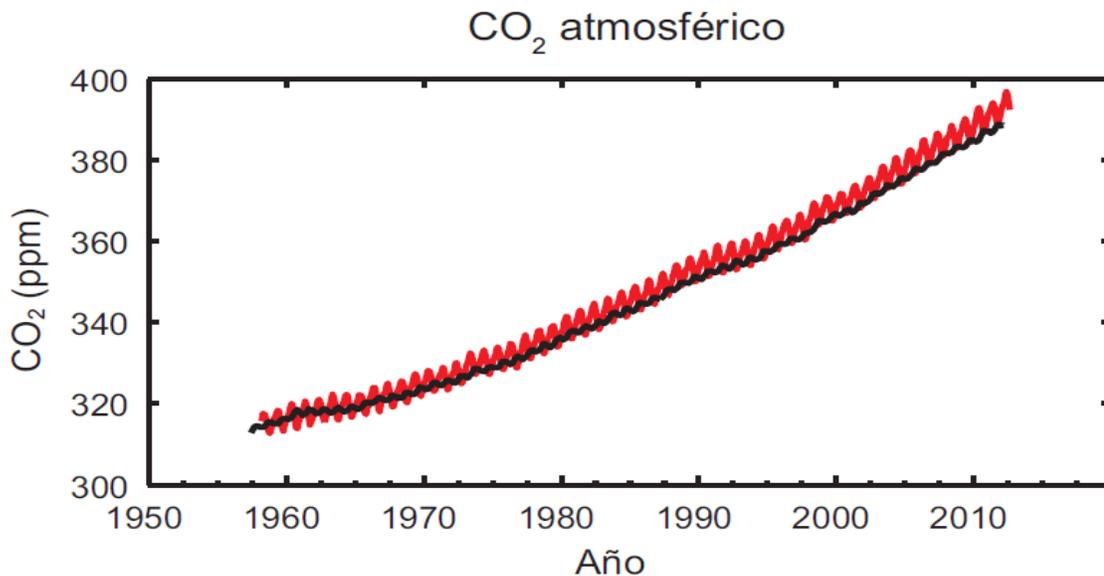


Figura 6. Concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂) en Mauna Loa (19°32 N, 155°34 W, en rojo) y en el Polo Sur (89°59 S, 24°48 W, en negro), desde 1958. Fuente: IPCC, 2013, p.10.

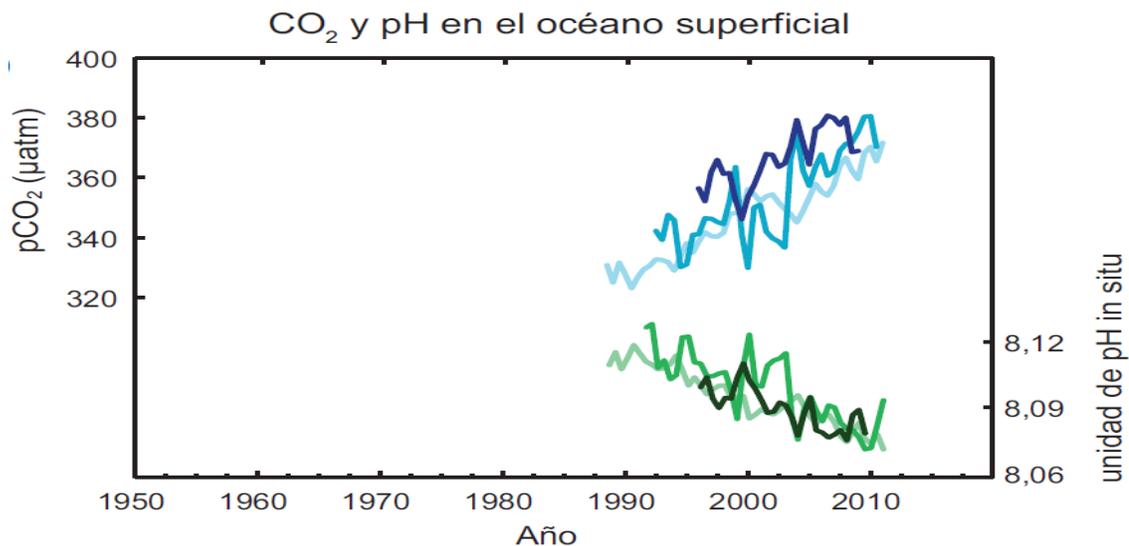


Figura 7. presión parcial de CO₂ disuelto en el océano superficial (líneas azules) y pH in situ (líneas verdes), medición de la acidez del agua del océano. Las mediciones proceden de tres estaciones situadas en los océanos Atlántico (29°10 N, 15°30 W, azul oscuro/verde oscuro; 31°40 N, 64°10 W, azul/verde) y Pacífico (22°45 N, 158°00 W, celeste/verde claro). Fuente: IPCC, 2013, p.10

3.2.2.1 El ciclo del carbono

El carbono existe en el aire mayoritariamente como dióxido de carbono gaseoso, el cual se disuelve en el agua y reacciona con las moléculas de esta para producir bicarbonato (HCO_3). La fotosíntesis que llevan a cabo las plantas terrestres, las bacterias y las algas, convierten el dióxido de carbono o el bicarbonato en moléculas orgánicas. Las moléculas orgánicas producidas por los organismos fotosintetizadores pasan a través de las cadenas alimenticias, y la respiración celular convierte nuevamente el carbono orgánico en dióxido de carbono gaseoso. (Cuatecontzi y Gasca, 2004).

Dentro del ciclo de carbono, se pueden dividir a su vez dos ciclos que interactúan: Uno que comprende el intercambio rápido de carbono entre los organismos vivos y otro que se encarga del ciclo del carbono a través de los procesos geológicos a largo plazo. Cabe mencionar que estos ciclos están enlazados entre sí. Por ejemplo, las reservas de CO_2 atmosférico y oceánico que son utilizadas por los organismos vivos son las mismas que los procesos geológicos reciclan.

3.2.2.1.1 El ciclo biológico del carbono

En este ciclo dominan grandes transferencias de C: el flujo de CO_2 de la atmosfera a las plantas como resultado de la fotosíntesis, y el regreso de CO_2 a la atmosfera como resultado de la descomposición de materia orgánica. El carbono entra en todas las redes tróficas, tanto terrestres como acuáticas, a través de los autótrofos, organismos que producen su propio alimento. Casi todos estos autótrofos son fotosintetizadores, como las plantas o las algas.

Los autótrofos capturan el dióxido de carbono del aire o los iones de bicarbonato del agua y lo usan para producir compuestos orgánicos como la glucosa. Los heterótrofos, como los humanos, que se alimentan de otros seres,

consumen las moléculas orgánicas y así el carbono orgánico pasa a través de las cadenas y redes tróficas.

3.2.2.1.2 El ciclo geológico del carbono

En este ciclo, el CO₂ atmosférico se disuelve en el agua de lluvia y forma ácido carbónico que reacciona con los minerales expuestos sobre la superficie terrestre, generando lo que se conoce como intemperismo de la roca. Los ríos acarrean los productos disueltos al océano. En el océano se forma el carbonato de calcio; éste se deposita en los sedimentos marinos que por el proceso de subducción entran a la corteza baja de la tierra. En este proceso se reincorporan elementos a los minerales primarios de las rocas y el carbono regresa a la atmosfera como CO₂ por las emisiones volcánicas hidrotermales. (Jaramillo, V. 2004, p.79)

3.2.2.1.3 Alteraciones al ciclo del carbono y sus efectos

La demanda mundial por las limitadas reservas de combustibles fósiles de la Tierra ha aumentado desde el inicio de la revolución industrial. Los combustibles fósiles se consideran como un recurso no renovable porque se agotan mucho más rápido de lo que los procesos geológicos pueden producirlos.

El aumento en el uso de los combustibles fósiles ha provocado niveles elevados de CO₂ atmosférico, la deforestación también contribuye de manera importante a elevar los niveles de carbono atmosférico. Los árboles y otras partes de los ecosistemas boscosos así como el océano captan parte del CO₂ producido por la actividad humana, sin embargo, estos procesos no contrarrestan completamente el aumento, por lo que los niveles de CO₂ se elevan cada vez más.

De acuerdo con Jaramillo, V. (2004), las perturbaciones del ciclo global del carbono amenazan de diversas formas el funcionamiento del planeta e incluyen varios procesos y fenómenos íntimamente ligados. Según él, un cambio global se define a partir de dos fenómenos: A) aquel que altera las capas de fluidos del sistema de la tierra (atmosfera u océanos), y que, por lo tanto, es experimentado a escala planetaria. Por ejemplo, el cambio climático, la destrucción de la capa de ozono en la estratosfera, el incremento de incidencia de rayos ultravioleta, etc.

Y B) aquel que ocurre en sitios discretos pero tan ampliamente distribuidos que constituyen un cambio global. Por ejemplo, pérdida de biodiversidad, cambio de uso de suelo (provocado por deforestación para uso agrícola), lluvia ácida, etc.

3.3 Procesos bioquímicos relevantes

Los procesos bioquímicos son todas las reacciones químicas del metabolismo celular que se dan en las células de los organismos vivos. Para fines de la presente investigación se abordaron solamente algunos procesos para obtención y transformación de la energía como son respiración celular, fotosíntesis, entre otros.

3.3.1 Fotosíntesis

La fotosíntesis es el mecanismo bioquímico usado por las plantas mediante el cual producen energía química a partir de la energía lumínica solar. Gracias a esta energía del sol, las plantas convierten el agua del suelo y el dióxido de carbono del aire en glucosa, un nutriente esencial que les provee energía y permite la fabricación de la celulosa. La fotosíntesis tiene lugar en los cloroplastos donde se encuentran las proteínas especializadas llamadas “Centros de Reacción fotosintético” que absorben la luz solar y cuentan con un pigmento llamado clorofila. Éste interviene en el proceso fotosintético y dota del característico color verde a las plantas. La energía de la luz es usada para

desprender electrones de algunas sustancias involucradas en el proceso como el hidrógeno que se toma de una molécula de agua (H₂O) para usarlo en la síntesis de la glucosa, quedando como desecho el oxígeno que es descartado en forma de gas. Antes de convertirlo en glucosa, el hidrógeno es usado para crear dos compuestos intermedios empleados para almacenar energía e impulsar el proceso como el NADPH (Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato) y el ATP (Adenosín Trifosfato) (McKee & McKee, 2009).

3.3.2 Ciclo de Calvin

La incorporación de CO₂ al carbohidrato en los organismos eucariotas fotosintéticos es un proceso que ocurre en el estroma del cloroplasto y a menudo se conoce como ciclo de Calvin (McKee & McKee, 2009). Como las reacciones del ciclo de Calvin pueden ocurrir sin luz si se aportan ATP y NADPH suficientes, a menudo se llaman *reacciones en la oscuridad*. Sin embargo, el término es engañoso. Por lo general, las reacciones del ciclo de Calvin sólo ocurren cuando la planta está iluminada, ya que el ATP y NADPH se producen mediante las reacciones con luz. Por lo tanto, un término más apropiado es reacciones independientes de la luz. Debido a los tipos de reacciones que ocurren en el ciclo de Calvin, también se conoce como ciclo de fosfato de pentosa reductor (ciclo RPP, reductive pentose phosphate) y ciclo de reducción fotosintética del carbono (ciclo PCR, photosynthetic carbon reduction). En síntesis, el ciclo de Calvin es una serie de reacciones independientes de la luz en la que el CO₂ se incorpora en moléculas orgánicas, las reacciones del ciclo de Calvin ocurren en tres fases: fijación, reducción y regeneración de carbono.

3.3.3 Fotorrespiración

La fotorrespiración es un proceso en el que las células fotosintéticas generan CO₂. El ritmo de la fotorrespiración depende de varios parámetros, que incluyen las concentraciones de CO₂ y O₂ a las que se exponen las células que realizan

la fotosíntesis. La fotorrespiración se reduce con concentraciones de CO_2 mayores de 0.2%. (Como la fotorrespiración y la fotosíntesis ocurren al mismo tiempo, el CO_2 se libera durante la fijación de CO_2 . Cuando el ritmo de liberación y fijación de CO_2 son iguales, se alcanza el punto de compensación de CO_2 , y mientras más bajo sea éste, es menor la fotorrespiración. (McKee & McKee, 2009)

Las plantas con base en la fotosíntesis se clasifican en C_3 , C_4 y CAM, las primeras reciben ese nombre ya que el bióxido de carbono primero se incorpora en un compuesto de carbono-3 y mantiene las estomas abiertas durante el día, aquí la fotosíntesis se lleva a cabo a través de la hoja. Por otro lado, las C_4 se llaman así porque el CO_2 primero es incorporado a un compuesto de carbono-4; se lleva a cabo en las células internas y mantiene las estomas abiertas durante el día, requiere de una anatomía especializada llamada "Anatomía de Kranz". Por último, las plantas CAM se llaman así en honor a la primera familia de plantas en las que se descubrió "Crassulaceae" y porque el CO_2 es almacenado en forma de ácido antes de ser usado en la fotosíntesis.

Muchas plantas C_3 tienen puntos de compensación de CO_2 entre 0.02 y 0.03% de CO_2 en el aire ambiental cercano a las células fotosintéticas.) En cambio, las concentraciones altas de O_2 y las temperaturas elevadas favorecen la fotorrespiración. Por consiguiente, este proceso se intensifica cuando las plantas se exponen a altas temperaturas y a cualquier condición que genere concentraciones bajas de CO_2 , o altas de O_2 , o ambas situaciones. Por ejemplo, la fotorrespiración es un problema grave para las plantas C_3 en ambientes cálidos y secos. Para conservar el agua, estas plantas cierran sus estomas, lo que reduce la concentración de CO_2 dentro del tejido de la hoja. (Los *estomas* son poros en la superficie de las hojas. Cuando se abren, el CO_2 , O_2 y vapor de agua difunden con facilidad en favor de sus gradientes de concentración entre el interior de la hoja y el ambiente externo.) Conforme la fotosíntesis continúa, la concentración de O_2 se eleva. (McKee & McKee, 2009).

En resumen, la fotorrespiración es una vía metabólica derrochadora que ocurre cuando la enzima rubisco del ciclo de Calvin actúa sobre el oxígeno en vez del dióxido de carbono. La mayoría de las plantas son tipo C_3 y no cuentan con características especiales para combatir la fotorrespiración. Según la gravedad de las circunstancias, puede perderse 30 a 50% de la producción de carbono fijo de la planta, lo que afecta gravemente a varias plantas del tipo C_3 , por ejemplo, el frijol y la soya, los cuales son cultivos alimentarios cruciales.

3.3.4 Metabolismos fotosintéticos

Las plantas son organismos sésiles, están anclados al sitio en el que nacen, por lo que tienen que adaptarse a los distintos ecosistemas terrestres en los que crecen y evolucionan. La fotosíntesis es uno de los procesos básicos de la vida de las plantas y como tal las etapas clave del mismo están altamente conservadas en todas las especies; y de esta función depende el resto de las formas vivientes en la Tierra. La asimilación del CO_2 atmosférico por las plantas se realiza mediante las reacciones del Ciclo de Calvin que es común a todos los organismos fotosintéticos. Sin embargo, se han encontrado distintas variantes al mecanismo molecular de fijación y asimilación del CO_2 que están estrechamente relacionadas con procesos de adaptación a entornos más o menos hostiles. Estas variaciones se manifiestan en cambios en la anatomía foliar que, en algunas ocasiones, sólo se hacen patentes después de un estudio ultraestructural de los cloroplastos de estas especies.

3.3.4.1 Plantas C_3

Una planta "normal" —que no tiene adaptaciones fotosintéticas para reducir la fotorrespiración— se llama planta C_3 . El primer paso del ciclo de Calvin es la fijación de dióxido de carbono mediante el rubisco, y las plantas que utilizan sólo este mecanismo "estándar" de fijación de carbono se llaman plantas C_3 , por el compuesto de tres carbonos (3-PGA) que produce la reacción. Casi

85% de las especies de plantas del planeta son C₃, como arroz, trigo, soya y todos los árboles.

3.3.4.2 Plantas C₄

Las plantas C₄ crecen en los trópicos y toleran con éxito las condiciones de sequía y temperaturas altas. El nombre plantas C₄ indica la función prominente de una molécula de cuatro carbonos (oxaloacetato) en una vía bioquímica que evita la fotorrespiración. Esta vía se llama metabolismo C₄, la *vía C₄* o la *vía de Hatch-Slack* (en honor a sus descubridores). Las hojas de las plantas C₄ tienen dos tipos de células fotosintéticas: las células mesófilas y las células de la vaina del haz. (En las plantas C₃, la fotosíntesis ocurre en las células mesófilas.) La mayoría de las células mesófilas de ambos tipos de plantas están dispuestas del tal forma que quedan en contacto directo con el aire cuando los estomas de la hoja se abren. En las plantas C₄, el CO₂ se captura en las células mesófilas especializadas, donde se convierte en bicarbonato y luego se incorpora al oxaloacetato. La fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEP carboxilasa) cataliza esta reacción, que es una forma indirecta de fijación de carbono. Como la PEP carboxilasa tiene menor K_m por CO₂ (es decir, mayor afinidad) que rubisco, y como el O₂ es un sustrato deficiente, las plantas C₄ son más efectivas para capturar CO₂ que las plantas C₃.

3.3.4.3 Plantas CAM

El metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM, *crassulacean acid metabolism*) es un mecanismo que conserva agua en las plantas que viven en desiertos y otras regiones con luz muy intensa y suministro de agua muy limitado. (Las crasuláceas son una familia de plantas en las que se investigó la vía CAM por primera vez.) Las plantas CAM, que en su mayoría son suculentas, abren sus estomas sólo por la noche, cuando la temperatura del aire ya descendió y el riesgo de pérdida de agua es bajo. El CO₂ entra a las células mesófilas, donde se incorpora de inmediato en una molécula de oxaloacetato por carboxilación

del fosfoenolpiruvato catalizado por la PEP carboxilasa. Luego, el oxaloacetato se reduce a malato, que se almacena durante la noche en las vacuolas de las células mesófilas. Durante el día, las moléculas de malato se degradan hasta piruvato y el sustrato de rubisco CO_2 . La separación temporal de la fijación de carbono y el ciclo de Calvin permiten que las plantas CAM cierren sus estomas durante el día, lo que disminuye la pérdida de agua por transpiración. (McKee & McKee, 2009).

3.4 Teoría económica de la producción

La teoría económica es, en gran medida, acerca de los costos, precios, mercados, rentabilidad de la inversión, ganancias y conceptos económicos similares. Este es también el caso para la teoría de la economía de la producción. Sin embargo, para Rasmussen, S. (2011), la teoría de la economía de la producción es especial porque los límites del comportamiento económico están definidos por las posibilidades técnicas de producción. La tecnología, en su forma más general, es una descripción de la relación entre los insumos y el producto. La descripción de las relaciones técnicas de producción se basa en la observación empírica de las relaciones entre recursos y productos.

3.4.1 La función de producción

La función de producción señala las relaciones técnicas que muestran la máxima cantidad que se puede producir con una cantidad determinada de insumos dada el estado de la tecnología, en este caso, los insumos a considerar no son dados por el hombre sino por la naturaleza, estos insumos son: precipitación pluvial, CO_2 y temperatura. La función de producción agregada es representada por la expresión:

$$Y = F(K, L) \dots \dots \dots (1)$$

Dónde: Y= producción agregada, K= capital y L= trabajo.

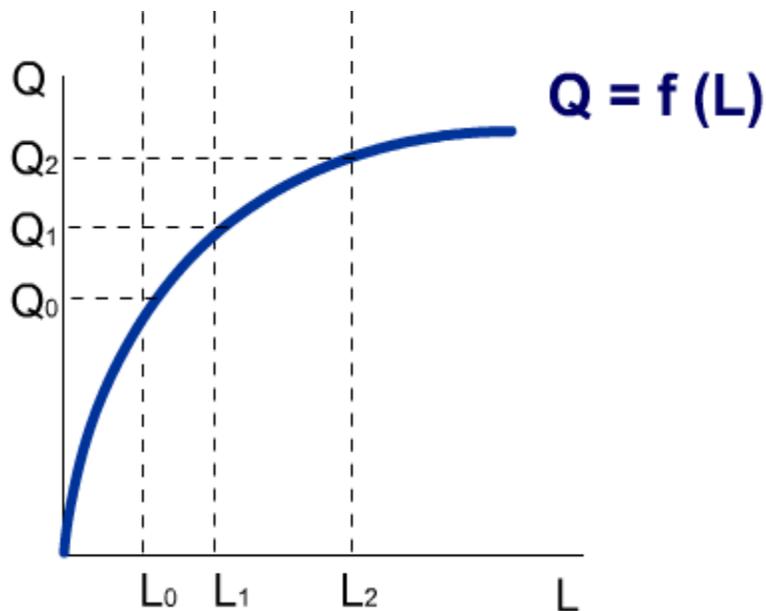


Figura 8. Función clásica de producción. Fuente: Rasmussen, 2011.

La figura 8 es la típica función de producción, la cual muestra los diferentes niveles de producción con diferentes niveles de insumo (en este caso, trabajo), por ejemplo, con L_0 se produce Q_0 , con L_2 se produce Q_2 y así sucesivamente. El trabajo puede ser sustituido por cualquier otro insumo o recurso.

3.4.1.1 La tecnología

La tecnología de la producción es el factor decisivo, con respecto a la cantidad producida y cómo se puede producir. Por lo tanto, una parte muy importante de la teoría de la economía de la producción consiste en describir la tecnología de producción que define el marco para el comportamiento económico.

Dentro de la tecnología no sólo se incluye a la maquinaria, fertilizantes, semillas, etc. Sino ahora también se está apostando mucho por la ingeniería genética. Por ejemplo, Long, S., Marshall-Colon, A., et al. (2015), buscan satisfacer la demanda mundial de alimentos en el futuro, incrementando el rendimiento de los cultivos mediante la fotosíntesis.

Por ejemplo, En el mundo, el país que dedica más superficie fértil para el sorgo es la India con 7.7 millones de hectáreas, a pesar de que India es el país con mayor superficie sembrada de sorgo, los mayores rendimientos por hectárea se concentran en tres lugares: Jordania, Argelia e Israel con 13, 9 y 6 ton/Ha respectivamente (FAOSTAT, 2011).

Driever, S. & Kromdijk, J. (2013), buscan potenciar el rendimiento en cultivos tipo C_3 , que son casi todas las plantas, utilizando el mecanismo fijador de dióxido de carbono de las plantas C_4 .

Además de describir la tecnología de producción como una tabla con relaciones numéricas, entre insumos y productos es posible expresar estas relaciones a nivel local mediante la llamada elasticidad de producción.

La elasticidad de la producción expresa el cambio relativo en la producción a través de un cambio relativo en una unidad adicional de insumo. Es decir, si se incrementa en 1% determinado factor (ej. CO_2 , mm de precipitación, $^{\circ}C$, etc.) cuánto incrementará el rendimiento (Kg o ton) de maíz y sorgo.

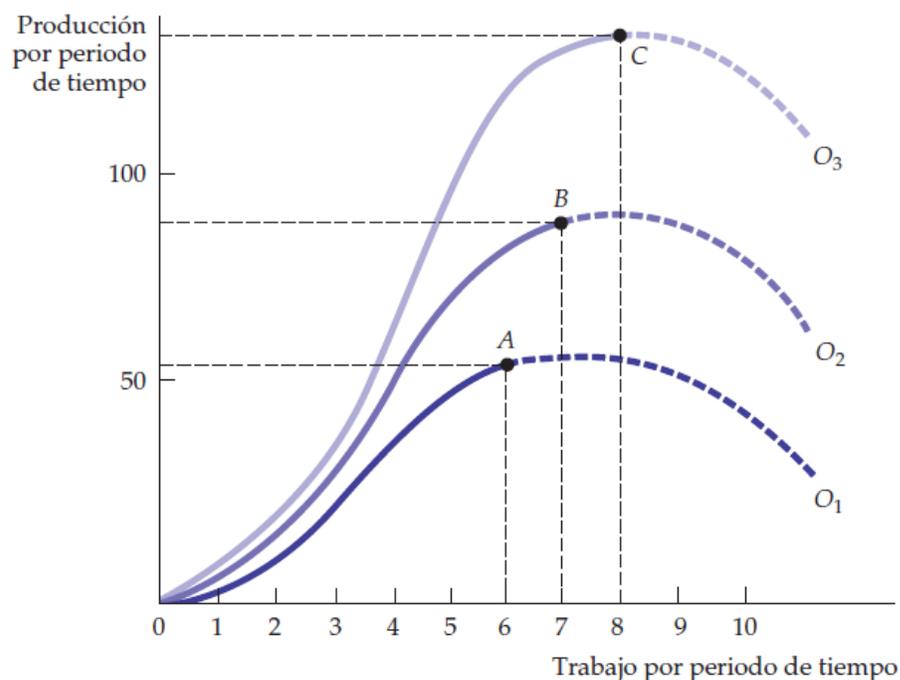


Figura 9. El efecto de la mejora tecnológica. Fuente: Pyndick, R., & Rubinfeld, D., 2009, p.226

A diferencia de la figura 8, en la 9 se observa como la producción por unidad de trabajo puede aumentar si mejora la tecnología, aunque el trabajo muestre rendimientos decrecientes en un determinado proceso de producción. Cuando se desplaza del punto A de la curva O_1 al B de la curva O_2 y al C de la curva O_3 con el paso del tiempo, la productividad del trabajo aumenta.

3.4.1.2 La producción conjunta

La producción de múltiples productos describe cómo los productores deben asignar recursos fijos a varios productos cuando el productor tiene la oportunidad de producir más productos o de producir de diferentes maneras. El análisis se basa en el supuesto de que el productor tiene un insumo x disponible en una cantidad fija limitada x^0 , y que el productor puede producir dos productos Y_1 y Y_2 utilizando ese insumo.

Si un producto no puede producirse sin la producción de otro producto, se denomina producción conjunta. La relación entre los dos productos es, por lo tanto, dada por los puntos discretos como se muestra en la figura 7. Los ejemplos clásicos de la agricultura incluyen la producción de carne y cuero, carne y lana, y leche y carne. A veces es posible variar la combinación de los dos productos, de modo que sea un caso de sustitución dentro de un marco determinado en lugar de puntos discretos. La relación entre la leche y la carne puede, por lo tanto, variar de acuerdo con la elección de la raza del ganado.

Los sistemas agrícolas, además de ser una fuente de alimento, han demostrado tener capacidad de captura de CO_2 (Robert, 2002). En el presente trabajo se utiliza este principio ya que además de producir cereales, se está fijando CO_2 atmosférico, lo que representa un bien o externalidad positiva para la población, ya que con ello se obtiene un aire más limpio y se contribuye a la reducción de la temperatura media global y por ende del calentamiento global y cambio climático. Ejemplo de ello es presentado por Jansson, C. (2010), quien llegó a la conclusión de que los cultivos de bioenergía (ej. maíz) cumplen la doble función de proporcionar biocombustibles que compensan las emisiones de gases de

efecto invernadero (GEI) de combustibles fósiles y la captación de C en el suelo a través de sistemas de raíces extensivos.

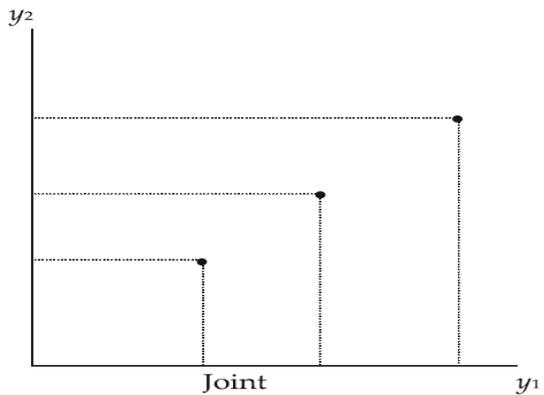


Figura 10. Producción conjunta. Fuente: Rasmussen, 2011, p.186

IV. GENERALIDADES DE LOS CULTIVOS

4.1 Maíz

El maíz y sus parientes silvestres los teocintles, se clasifican dentro del género *Zea* perteneciente a la familia Gramínea o Poaceae, que incluye también a importantes cultivos agrícolas como el trigo, arroz, avena, sorgo, cebada y caña de azúcar. Con base en caracteres de la espiga o inflorescencia masculina, el género *Zea* se ha dividido en dos secciones luxuriantes y anuales (Doebley & Iltis, 1980).

Con base en diversos hallazgos, como cerámica y lítica principalmente, así como al estudio de sedimentos y depósitos de restos vegetales en contextos arqueológicos, se cree que el maíz fue domesticado hace aproximadamente 8000 años. Su evolución es producto de la interacción de los procesos biológicos y factores ecológicos con la dinámica cultural y los intereses del hombre (Benz, 1997).

Las investigaciones sobre la constitución de los nudos cromosómicos de varias razas de maíz de México han confirmado que ocurrieron eventos independientes de domesticación del maíz, en cuatro centros localizados en México (dos en la región de Oaxaca-Chiapas, una en las tierras altas y una en las tierras medias al norte del estado de Morelos y Guerrero). Estos sitios son considerados como los lugares donde el germoplasma original del maíz fue domesticado de las poblaciones de Teocintle donde ya había ocurrido citogenéticamente la diversificación (Kato, 1984).

4.1.1 Características

La planta del maíz es de porte robusto de fácil desarrollo y de producción anual.

Tallo: el tallo es simple erecto, de elevada longitud pudiendo alcanzar los cuatro metros de altura, es robusto y sin ramificaciones. Por su aspecto recuerda al de

una caña, no presenta entrenudos y si una médula esponjosa si se realiza un corte transversal.

Inflorescencia: el maíz es de inflorescencia monoica con inflorescencia masculina y femenina separada dentro de la misma planta.

En cuanto a la inflorescencia masculina presenta una panícula (vulgarmente denominadas espigón o penacho) de coloración amarilla que posee una cantidad muy elevada de polen en el orden de 20 a 25 millones de granos de polen. En cada florecilla que compone la panícula se presentan tres estambres donde se desarrolla el polen. En cambio, la inflorescencia femenina marca un menor contenido en granos de polen, alrededor de los 800 o 1000 granos y se forman en unas estructuras vegetativas denominadas espádices que se disponen de forma lateral. (OCDE, 2003)

Hojas: las hojas son largas, de gran tamaño, lanceoladas, alternas, paralelinervias. Se encuentran abrazadas al tallo y por el haz presenta vellosidades. Los extremos de las hojas son muy afilados y cortantes.

Raíces: las raíces son fasciculadas y su misión es la de aportar un perfecto anclaje a la planta. En algunos casos sobresalen unos nudos de las raíces a nivel del suelo y suele ocurrir en aquellas raíces secundarias o adventicias.

Desarrollo vegetativo del maíz: desde que se siembran las semillas hasta la aparición de los primeros brotes, transcurre un tiempo de 8 a 10 días, donde se ve muy reflejado el continuo y rápido crecimiento de la plántula.

Genética del maíz: el maíz se ha tomado como un cultivo muy estudiado en investigaciones científicas en los estudios de genética. Continuamente se está estudiando su genotipo y por tratarse de una planta monoica aporta gran información ya que posee una parte materna (femenina) y otra paterna (masculina) por lo que se pueden crear varias recombinaciones (cruces) y crear nuevos híbridos para el mercado. Los objetivos de esto cruzamientos van encaminados a la obtención de altos rendimientos en producción. Por ello, se

selecciona en masa aquellas plantas que son más resistentes a virosis, condiciones climáticas, plagas y que desarrollen un buen porte para cruzarse con otras plantas de maíz que aporten unas características determinadas de lo que se quiera conseguir como mejora de cultivo. También se selecciona según la forma de la mazorca de maíz, aquellas sobre todo que posean un elevado contenido de granos sin deformación.

4.1.2 Requerimientos

Suelo: el maíz se adapta muy bien a todos tipos de suelo, pero suelos con pH entre 6 a 7 son a los que mejor se adapta. También requiere suelos profundos, ricos en materia orgánica, con buena circulación del drenaje para no producir encharques que originen asfixia radicular.

Fertilización: el maíz necesita para su desarrollo unas ciertas cantidades de elementos minerales. Las carencias en la planta se manifiestan cuando algún nutriente mineral está en defecto o exceso.

Se recomienda un abonado de suelo rico en Potasio (K) y Fósforo (P). En cantidades de 0.3 kg de P en 100 Kg de abonado. También un aporte de nitrógeno N en mayor cantidad sobre todo en época de crecimiento vegetativo.

Los primeros estadios de desarrollo del maíz son muy sensibles a la falta de agua y nutrientes por lo que la consolidación del cultivo demanda una buena inversión en insumos y labores culturales. Los suelos donde se cultiva el maíz, por lo general no tienen la capacidad para proporcionar los nutrientes necesarios para el crecimiento eficiente de las plantas o no otorgan el rendimiento adecuado, para ello se debe recurrir al empleo de fertilizantes. El estudio de los factores que determinan la capacidad de absorción de nutrientes como el nitrógeno, el fósforo, el potasio y algunos micronutrientes es un tema de actualidad enfocado a incrementar la producción especialmente en suelos ácidos y alcalinos, los cuales representan la mayor superficie cultivable del planeta (López-Bucio *et al.*, 2003).

4.1.3 Panorama actual

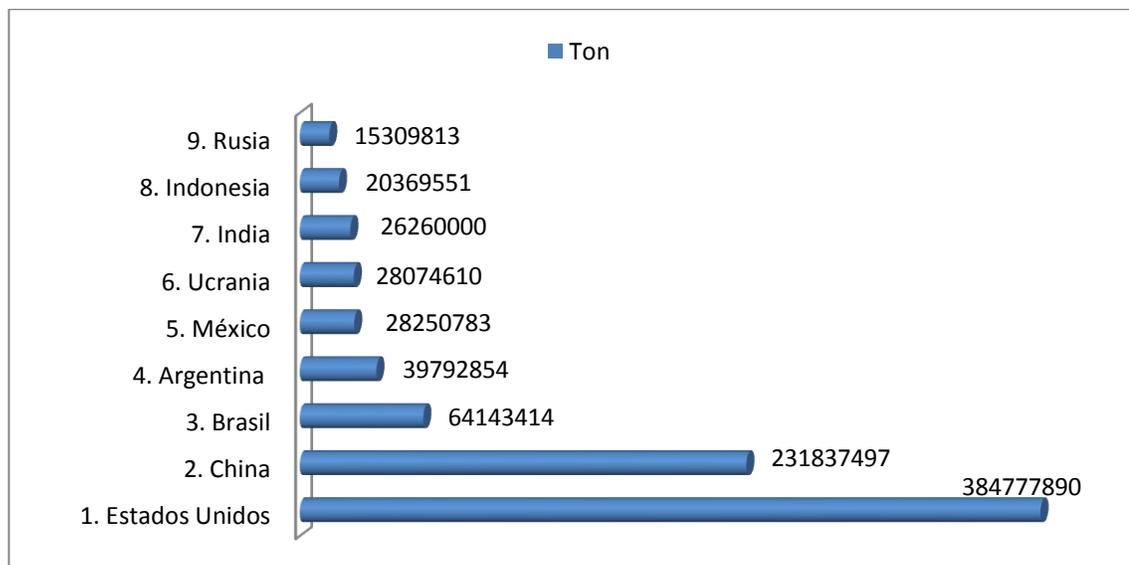
El maíz hoy en día se produce en todos los continentes excepto en la Antártida y es altamente valorado debido a que brinda mayor rendimiento que muchos otros granos, por lo tanto no es costoso. Es uno de los tres cultivos más importantes del mundo, junto con el trigo y el arroz.

4.1.3.1 Panorama internacional

Según datos aportados por la FAO (2016) son 168 los países que cultivan maíz y 51 los que obtuvieron más de un millón de toneladas en el promedio de los años 2000/10.

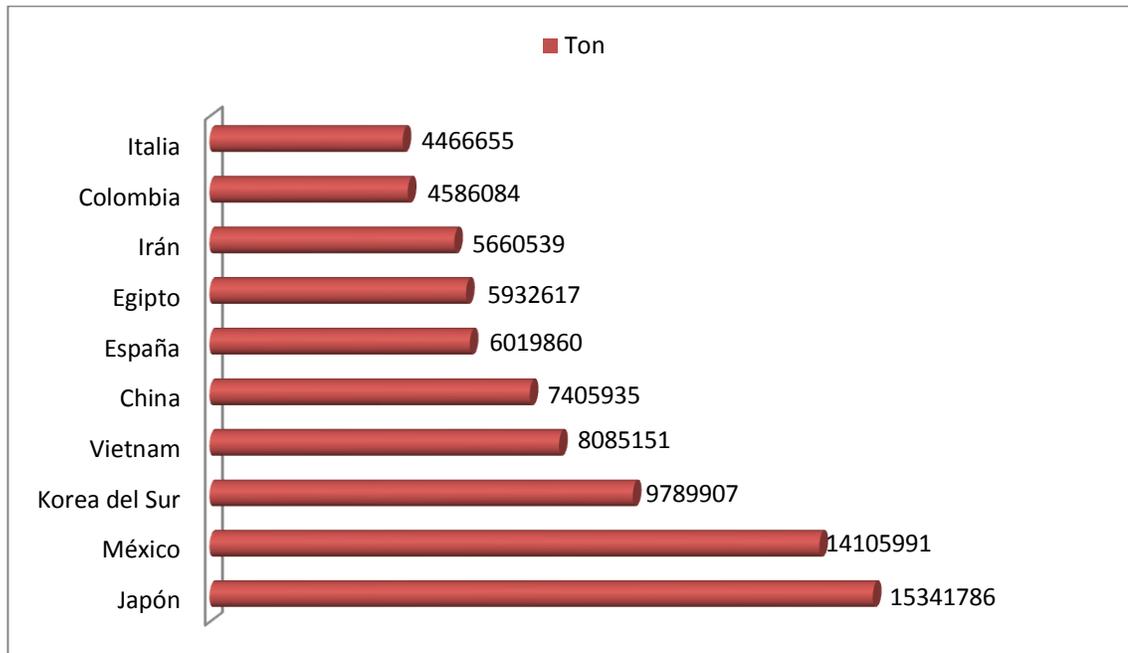
A continuación se muestran una serie de gráficas sobre los principales países productores, importadores y exportadores de maíz en el mundo.

Gráfica 1. Principales países productores de maíz



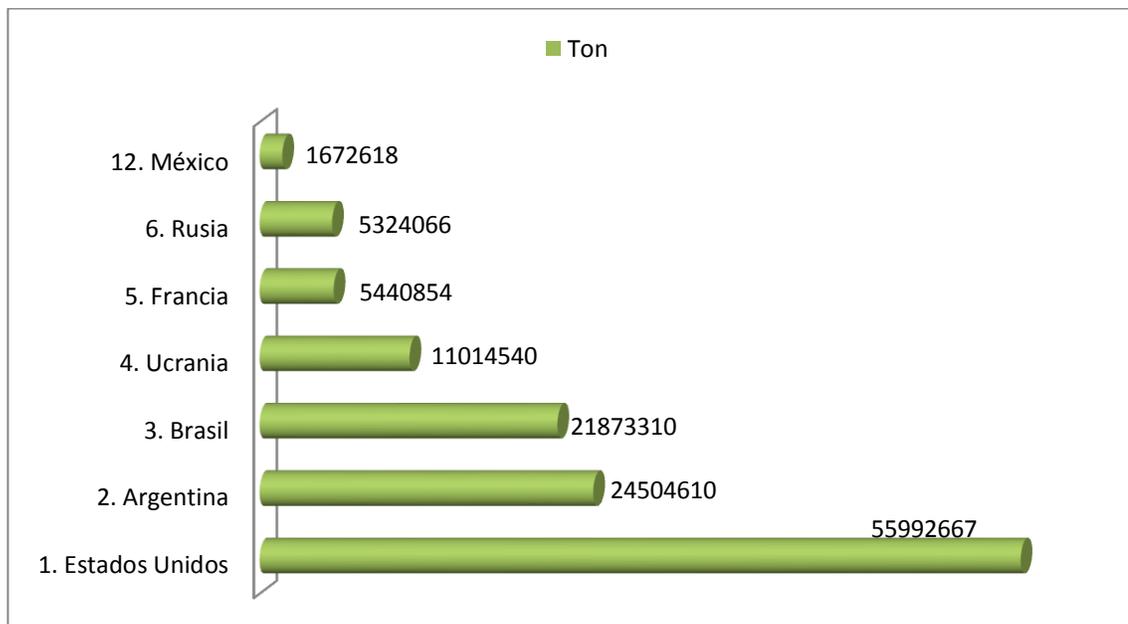
Fuente: Elaboración propia con datos de FAOSTAT, 2016.

Gráfica 2. Principales países importadores de maíz



Fuente: Elaboración propia con datos de FAOSTAT, 2016.

Gráfica 3. Principales países exportadores de maíz



Fuente: Elaboración propia con datos de FAOSTAT, 2016.

En la gráfica uno se observa que México ocupa el quinto lugar a nivel mundial en producción de maíz, sin embargo, también es uno de los principales importadores como se muestra en la gráfica dos y en la gráfica tres se puede

ver que está en el décimo segundo lugar en exportación. Esto se debe a que México satisface su demanda interna de maíz blanco, que es el más utilizado para consumo humano, mientras que en otras variedades como maíz amarillo se tiene un gran déficit.

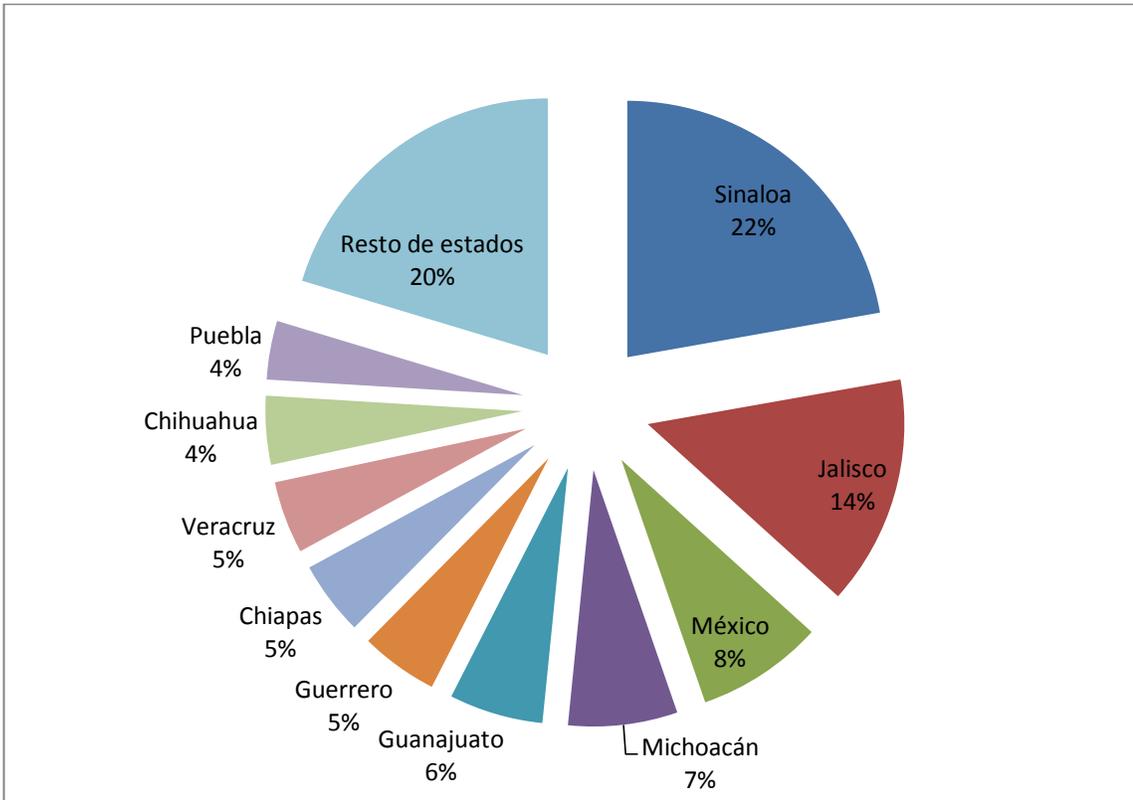
4.1.3.2 Panorama nacional

En México el cultivo de este producto se encuentra distribuido a lo largo de toda la República, donde ocupa poco más del 85% equivalente a la mayor parte de la superficie sembrada de las áreas destinadas para la agricultura, esto permite obtener más de 27 millones de toneladas de maíz al año, de las cuales poco más del 20% del total a nivel nacional se cultiva a través de la modalidad de riego, mientras que el porcentaje restante equivale a la producción de temporal. (SIAP, 2017)

Cabe resaltar que en el país hay más de tres millones de productores dedicados al cultivo del maíz, los cuales se encuentran distribuidos a lo largo de toda la República, donde los estados con mayor producción son Sinaloa, Jalisco, el Estado de México, Michoacán, Guanajuato, Chiapas, Veracruz y Guerrero.

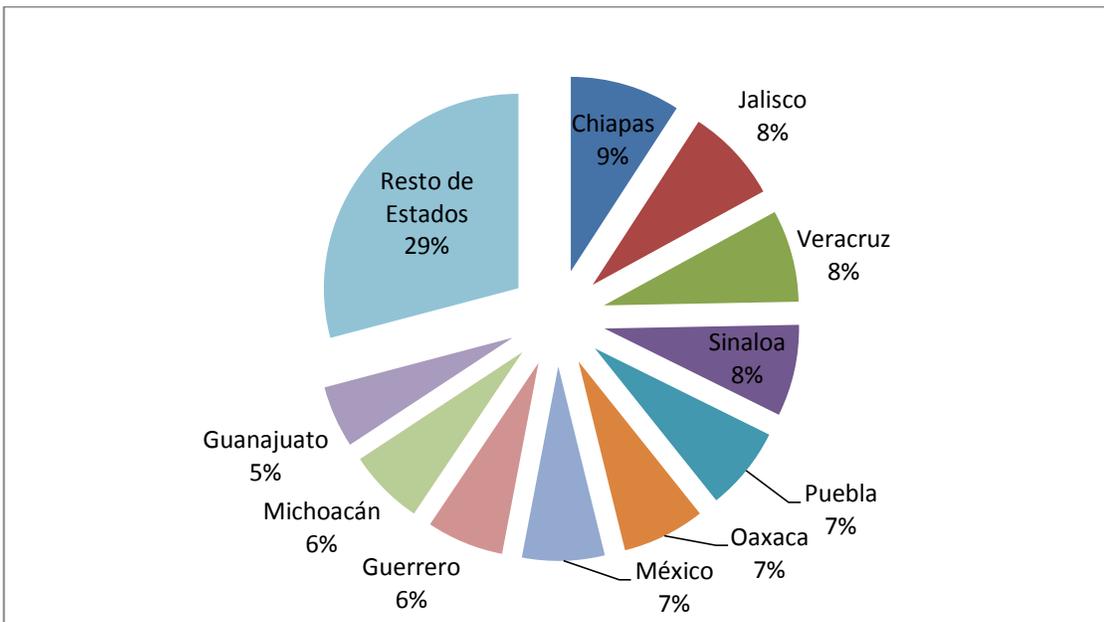
De acuerdo con la SAGARPA la producción nacional de maíz representa el 14.47% del PIB agrícola y el 84.43% de la producción de cereales. El consumo per cápita es de 196.4 Kg de maíz blanco, de los cuales el 20.9% se consume en forma de tortillas.

Gráfica 4. Principales estados productores de maíz en México



Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP, 2017.

Gráfica 5. Principales Estados por superficie sembrada de maíz (Ha)



Fuente: elaboración propia con datos de SIAP, 2017

Gracias a las gráficas cuatro y cinco, queda en evidencia que los estados con mayor superficie sembrada no necesariamente son los que producen más maíz, por ejemplo, Chiapas es el estado con mayor superficie sembrada pero en producción pasa a ocupar la posición siete. Esto se debe principalmente al factor tecnológico, ya que el estado de Sinaloa, principal productor, cuenta con mayor y mejor infraestructura que Chiapas.

Cabe resaltar que la intensificación agrícola o el uso del riego -combinado con un buen drenaje- permiten un incremento de la producción de biomasa, pero las condiciones no son necesariamente compatibles con las requeridas para el almacenamiento de carbono. (Robert, M., 2002).

4.2 Sorgo

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es uno de los cereales que por sus características agronómicas y nutricionales pudiera aportar grandes beneficios en la alimentación, tanto humana como animal, a nivel mundial y nacional.

El origen de este cultivo ha sido discutido a través de los años, ya que se plantea que procede del noreste de África, en la región ocupada por Etiopía, aunque se ubicó inicialmente en la India. Se introdujo en América en el siglo XVIII. Se considera que muchas especies distintas se cultivan de forma esporádica en países de América, y que los sorgos actuales son híbridos de esas introducciones o de mutantes que han aparecido. (Pérez, A. et al.,2010)

Este cultivo tiene gran importancia a escala mundial, pues está comprobado que puede sustituir cereales como el trigo y el maíz en la mayoría de los usos de estos, tanto en la alimentación humana como en la producción de forraje o grano para la ceba de animales, y también en la industria.

A su vez posee alto potencial de producción de granos y buenas perspectivas de contribución al desarrollo de la agricultura.

4.2.1 Características

El sorgo tiene hábito y fisiología vegetal (metabolismo de las plantas C4) similares a los del maíz (*Zea mays*). El género *Sorghum* presenta un sistema radical profuso que le brinda una estructura de soporte muy desarrollada, lo que permite acumular gran cantidad de reservas; además le confiere una mayor capacidad de penetración y mejor persistencia en climas secos, donde la escasez de agua se mantiene por períodos prolongados; su tallo es grueso, con espigas que nacen por pares, y la altura puede oscilar de 1 a 3 m. Los nudos presentan abundantes pilosidades. Las hojas son alternas, aserradas, lanceoladas, anchas y ásperas en su margen; estas tienen la propiedad de quitinización durante los períodos secos, lo que retarda el proceso de desecación (González, 1961; Duke, 1983., citado en Pérez, 2010).

Tiene inflorescencias en panojas; cada panícula puede contener de 400 a 8 000 granos, con un valor energético aproximado de 1,08 Mcal/kg; comparado con el maíz es un poco más rico en proteínas, pero más pobre en materia grasa deficitaria en lisina. El color del grano varía desde un blanco traslúcido hasta un pardo rojizo muy oscuro, con gradaciones de rosado, rojo, amarillo, pardo y colores intermedios; sus semillas son esféricas y oblongas, de aproximadamente 3 mm de tamaño.

Las flores tienen estambres y pistilos, pero se han encontrado en Sudán sorgos dioicos. Su semilla es gruesa, comprimida, oval y desnuda, y presenta varios colores como café, azulado, negro, blanco, rojizo y amarillo, entre otros.

4.2.2 Requerimientos

Las exigencias del sorgo para grano en términos de calor son más elevadas que las del maíz. Es una especie que se desarrolla bien en condiciones de clima cálido, con lluvias moderadas y bien distribuidas.

Para la germinación este cultivo necesita temperaturas de 12 a 13°C y el crecimiento de la planta se activa cuando estas sobrepasan los 15°C, con el óptimo alrededor de los 32°C. Se plantea que los descensos de temperatura en

el momento de la floración pueden reducir el rendimiento del grano, además de producir esterilidad de las espiguillas y afectar también la viabilidad del grano de polen. Las temperaturas muy altas durante los días posteriores a la floración reducen el peso final del grano.

Suelo: crece bien en suelos cuyo pH oscile entre 5,5 y 8,5; sin embargo, el pH ideal está entre 5,5 y 6,5. Soporta la sal y se plantea que las variedades azucaradas exigen la presencia de carbonato cálcico en el suelo, lo que aumenta el contenido en sacarosa de los tallos y las hojas. Prefiere suelos sanos, profundos, no demasiado pesados. No debe utilizarse como cultivo antecedente de los cereales de otoño.

Siembra: la siembra se realiza a chorrillo, con sembradora mecánica o manual, colocando la semilla entre 1 y 3 cm de profundidad. La distancia entre hileras puede ser de 18, 36, 54 ó 72 cm, en dependencia del equipo disponible y de la densidad de siembra. En general, para la época de invierno se recomiendan distancias no menores de 36 cm, y entre hileras en la siembra con riego por gravedad, espaciamientos de 50 cm para facilitar el manejo.

La densidad de siembra, con distancias de 18 y 36 cm, debe ser de 300 000 plantas/ha; y para espaciamientos de 54 y 72 cm, entre 200 000 y 250 000 plantas/ha. Las densidades más altas se recomiendan cuando hay condiciones adecuadas de humedad.

La cantidad de semilla dependerá de las densidades recomendadas y el porcentaje de germinación; esta es aproximadamente de 10-12 kg/ha.

Fertilización: antes de decidir la cantidad de fertilizante que se aplicará es conveniente contar con un análisis del suelo del área, aunque la recomendación general es de 90-60-30 kg de N, P y K por hectárea, respectivamente. Si se utiliza abono de la fórmula 10-30-10, se deben aplicar 184 kg de fertilizante por hectárea en el momento de la siembra y 174 kg de urea, 242 kg de nitrato de amonio o 372 kg de sulfato de amonio por hectárea, 22 días después de la emergencia.

4.2.3 Panorama actual

De acuerdo con la FAO (1997), en la economía mundial del sorgo se pueden distinguir dos grandes sistemas de producción y utilización. En el mundo desarrollado y en partes de América Latina y el Caribe predomina la producción intensiva, objeto de comercialización, destinada principalmente a la alimentación del ganado. En este sistema se utilizan abundantemente las semillas híbridas, los fertilizantes y tecnologías mejoradas de aprovechamiento del agua y los rendimientos oscilan entre las 3 y las 5 toneladas por hectárea. Otro sistema es donde el sorgo se cultiva principalmente para la alimentación humana. Aunque en esos sistemas se están introduciendo variedades mejoradas, particularmente en Asia, por lo general el cultivo es menos intensivo que en los sistemas cuya producción se comercializa. El uso de fertilizantes es escaso y la aplicación de tecnologías mejoradas de conservación de la humedad limitada. Por ello, el rendimiento medio oscila en muchas zonas entre 0.5 y 1 toneladas por hectárea.

4.2.3.1 Panorama internacional

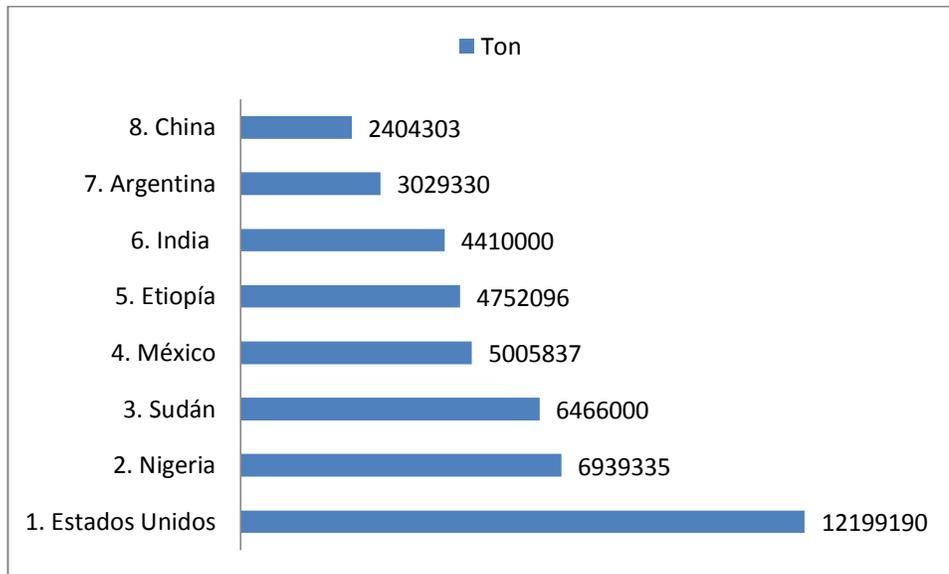
El sorgo es el quinto cereal de mayor importancia en el mundo, después del trigo, el arroz, el maíz y la avena (Pérez, A., 2010) Los principales lugares de producción de sorgo se encuentran en las regiones áridas y semiáridas de los trópicos y subtrópicos (Doggett, 1998)

En África una parte importante se destina al consumo humano, mientras que en América y Oceanía la mayor parte del sorgo producido se emplea para el consumo animal; por ejemplo, en la alimentación del ganado, en aves de corral, además de ser muy utilizado en otros países como materia prima en la almidonería y la industria alcoholera.

El empleo de los cereales para la alimentación animal ha sido un elemento dinámico en el ámbito del consumo global de sorgo. Su demanda constituyó la

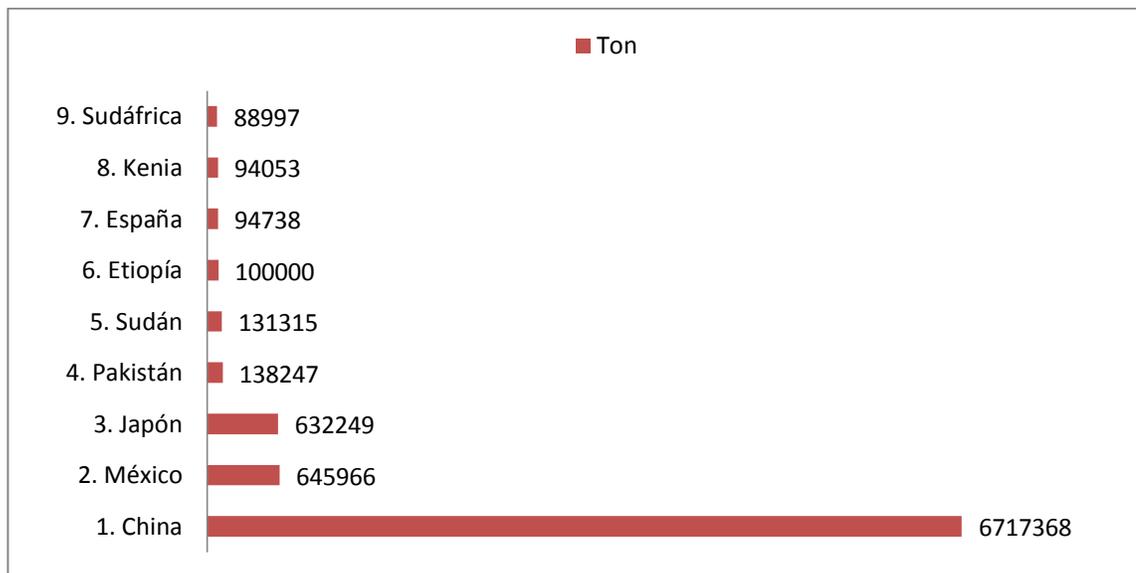
principal fuerza motriz para elevar la producción mundial y el comercio internacional a partir de los años sesenta.

Gráfica 6. Principales países productores de sorgo



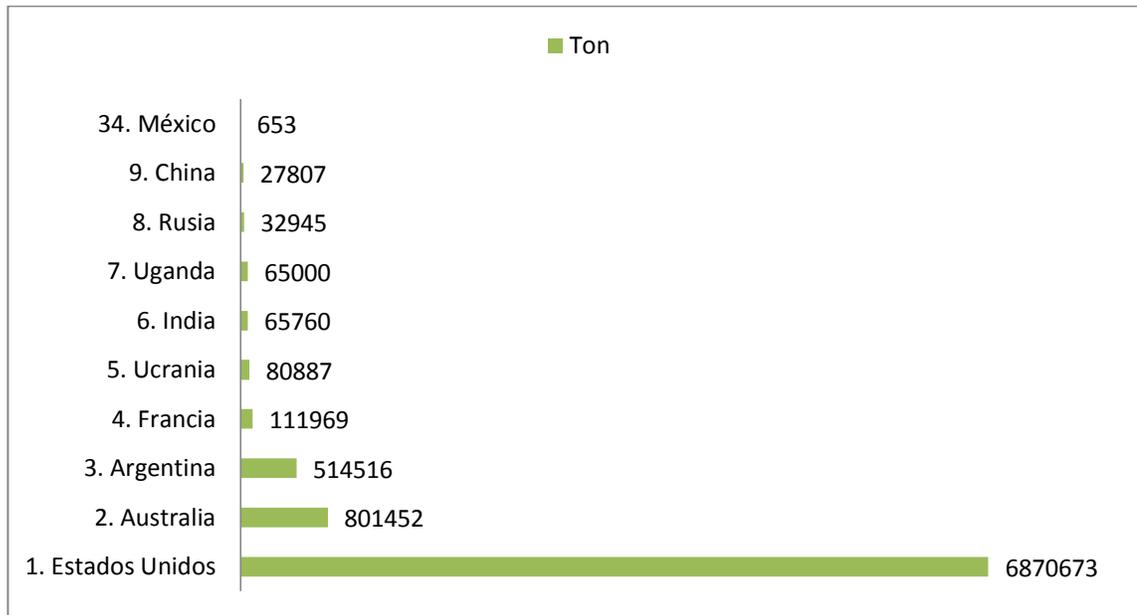
Fuente: Elaboración propia con datos de FAOSTAT, 2016.

Gráfica 7. Principales países importadores de sorgo



Fuente: Elaboración propia con datos de FAOSTAT, 2016.

Gráfica 8. Principales países exportadores de sorgo



Fuente: Elaboración propia con datos de FAOSTAT, 2016.

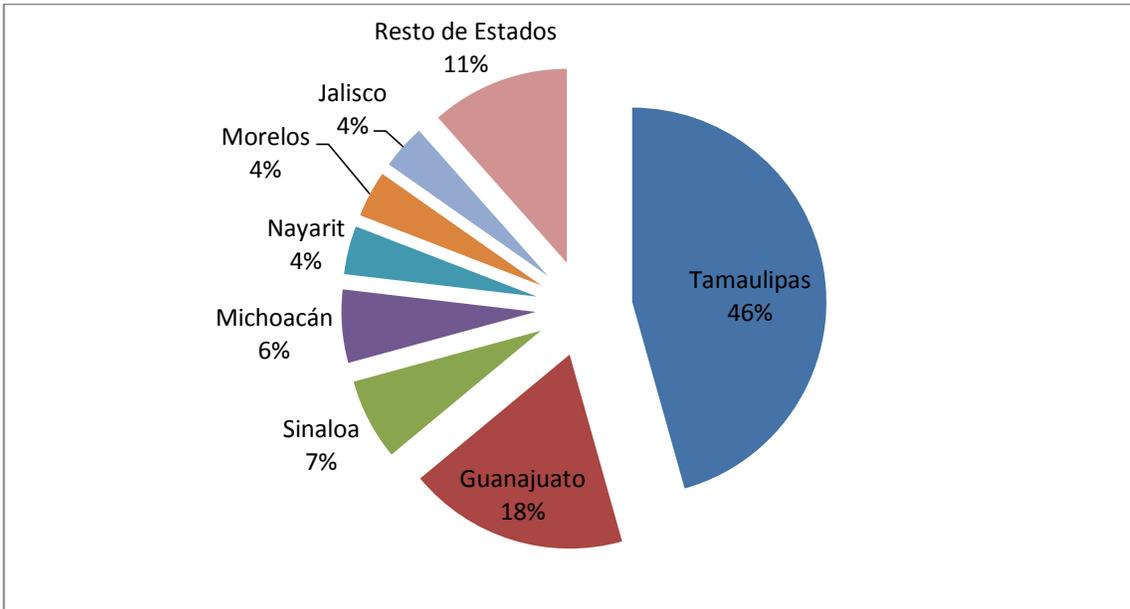
En la gráfica seis se aprecia a México como el cuarto lugar en producción de sorgo a nivel mundial pero en la gráfica 7 se puede ver que es el segundo mayor importador, sus exportaciones son casi nulas como se aprecia en la gráfica 8.

4.2.3.2 Panorama nacional

De acuerdo con la SAGARPA, en 2016 México fue el cuarto productor de sorgo a nivel mundial. Tiene una participación del 2.24% en el PIB agrícola nacional y representa el 4.43% en la producción de forrajes.

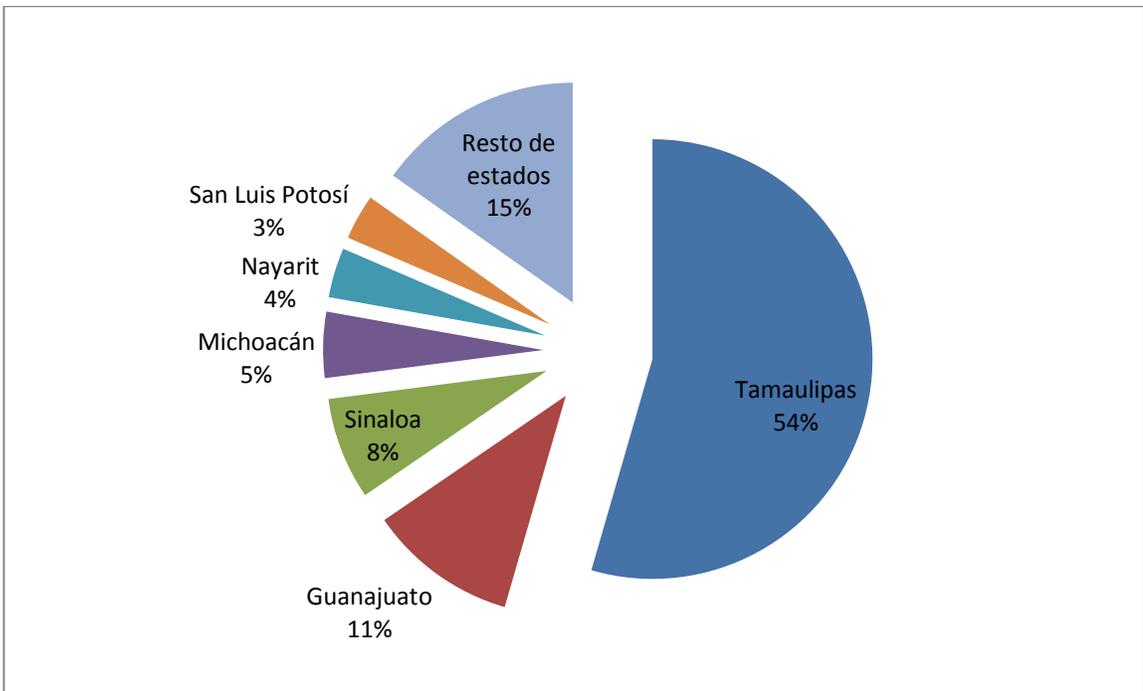
En la actualidad, sólo se satisface el 60.6% de la demanda interna con producción nacional, lo que provoca una dependencia de importaciones de sorgo provenientes de Estados Unidos. Casi el 100% de la producción de sorgo se destina al sector industrial, sólo una pequeña fracción es destinada como semilla para el próximo ciclo. En 2016, el 95.71% se destinó a la industria, 0.38% como semilla y los restantes 3.92% se debieron a mermas.

Gráfica 9. Principales Estados productores de sorgo en México



Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP, 2017.

Gráfica 10. Principales Estados por superficie sembrada de sorgo (Ha)



Fuente: Elaboración propia con datos de SIAP, 2017.

En el caso del sorgo, a diferencia del maíz, los cinco estados con mayor superficie sembrada son también los que presentan mayor producción, tal y como se aprecia en las gráficas 9 y 10. Una posible explicación para ello es que el sorgo es más tolerante a las altas temperaturas y a la escasez de agua que el maíz, por lo que no se requiere de mucha infraestructura para obtener buenos rendimientos por lo que es un cultivo idóneo para el temporal.

IV. METODOLOGÍA

El instrumento metodológico utilizado en la presente investigación fue el de los “modelos de ecuaciones simultáneas”, particularmente el modelo de Mínimos Cuadrados en dos Etapas (MC2E), así como la teoría económica.

4.1 Modelos de ecuaciones simultáneas

De acuerdo con Gujarati, D. (2010), los modelos uniecuacionales son aquellos en los que hay solo una variable dependiente Y y una o más variables explicativas, las X . En tales modelos se centran en la estimación o predicción del valor medio de Y condicional a los valores fijos de las variables X . Por consiguiente, la relación causa-efecto en dichos modelos iba de X a Y .

Sin embargo, en muchas situaciones la relación causa-efecto en un sentido, o unidireccional, no es relevante. Esto sucede cuando Y está determinado por las X y algunas X , a su vez, están determinadas por Y , es decir, una variable que actúa como explicativa en una ecuación puede hacerlo como explicada en otra. En otras palabras, hay una relación en dos sentidos, o simultánea, entre Y y (algunas) X . Por lo tanto, básicamente, la diferencia entre un modelo de ecuaciones simultáneas y otro de regresión consiste en que haya variables explicadas en el segundo miembro de alguna de las ecuaciones.

Se establece entonces la siguiente clasificación de variables:

Variables endógenas: son aquellas variables que vienen explicadas dentro del modelo y que podrán aparecer como explicativas.

Variables predeterminadas o exógenas: son aquellas cuyos valores deben ser previamente conocidos para determinar el valor de las variables endógenas (y por tanto, aparecen como explicativas). Se clasifican en exógenas corrientes, exógenas retardadas y endógenas retardadas.

4.1.1 Métodos de ecuaciones simultáneas

En la práctica, los modelos de ecuaciones simultáneas son difíciles de llevar a cabo por diversas razones, la primera es que la carga computacional es enorme. Segunda, los métodos de sistemas, como el método de máxima verosimilitud con información completa (MVIC), conducen a soluciones que son altamente no lineales en los parámetros y, por tanto, difíciles de determinar. Tercera, si hay un error de especificación (una forma funcional equivocada o la omisión de variables relevantes) en una o más ecuaciones del sistema, dicho error es transmitido al resto de sistema. Por lo tanto, los sistemas de ecuaciones se vuelven muy sensibles a los errores de especificación. En consecuencia, los sistemas uniecuacionales son más utilizados en la práctica. (Gujarati, 2010)

Klein, L. (1974) dijo: “Los métodos uniecuacionales, en el contexto de un sistema simultáneo, pueden ser menos sensibles a errores de especificación en el sentido de que aquellas partes del sistema que tienen una especificación correcta pueden no verse afectadas considerablemente por errores de especificación en otra parte”.

En ese sentido, los métodos más utilizados son los siguientes:

- Mínimos Cuadrados Indirectos (MCI)
- Mínimos Cuadrados en dos Etapas (MC2E)

4.1.1.1 Mínimos Cuadrados Indirectos (MCI)

El método de Mínimos Cuadrados Indirectos se aplica cuando tras el proceso de identificación de la ecuación, esta es exactamente identificada.

Consiste en obtener las estimaciones de los parámetros estructurales a partir de las estimaciones MCO, $\hat{\pi} = (X^T X)^{-1} X^T$ y de los parámetros de la forma reducida, considerando la relación:

$$\hat{X} \begin{pmatrix} -1 \\ \hat{\gamma}_h \\ 0 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \hat{\beta}_h \\ 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

Por tanto, las estimaciones buscadas, $\hat{\gamma}_h$ y $\hat{\beta}_h$, se obtienen al resolver el sistema que queda tras realizar las operaciones pertinentes en la expresión anterior.

Dichos estimadores serán consistentes, y generalmente, sesgados.

4.1.1.2 Mínimos Cuadrados en dos Etapas (MC2E)

El método de Mínimos Cuadrados en dos Etapas es un método de información limitada que se puede aplicar cuando la ecuación en estudio sea exactamente identificada o sobre identificada.

Las dos etapas a las que hace referencia el nombre de este método se puede resumir como sigue:

Primera Etapa: Estimar la forma reducida del modelo, obteniéndose así una combinación lineal de las variables predeterminadas.

Segunda Etapa: Sustituir las variables endógenas que aparecen en el segundo miembro de cada ecuación por sus estimaciones obtenidas a partir de la combinación lineal anterior, y aplicar MCO a la nueva ecuación obtenida.

El estimador por MC2E responde a la siguiente expresión:

$$\hat{\delta}_h, MC2E = (\hat{Z}_h^T \hat{Z}_h)^{-1} \hat{Z}_h^T y_h, \dots\dots\dots(3)$$

Con $\hat{Z}_h^T = (\hat{Y}_h \ X_h)$ y donde \hat{Y}_h contiene las estimaciones de las variables endógenas presentes en el segundo miembro de la ecuación en estudio obtenidas al estimar la forma reducida, Y_h es la variable endógena del primer miembro de dicha ecuación y X_h contiene las variables exógenas de tal

ecuación. Los estimadores así obtenidos son consistentes, aunque por lo general, también son sesgados.

4.2 La elasticidad de la producción

La elasticidad de la producción expresa el cambio relativo en la producción a través de un cambio relativo en unidad adicional de insumo. Si, por ejemplo, se añade un 5% más de insumo y se logra un 4% más en el producto, entonces la elasticidad de producción es $4/5 = 0.80$. Si hay múltiples insumos, es posible calcular la elasticidad de la producción para cada insumo. Formalmente, la elasticidad de producción ε_i para el insumo i se calcula como:

$$\varepsilon_i \equiv \frac{\frac{\delta f(x)}{f(x)}}{\frac{\delta x_i}{x_i}} = \frac{\frac{\delta f(x)}{\delta x_i}}{\frac{f(x)}{x_i}} = \frac{MPP_i}{APP_i}$$

En el cual MPP y APP representan el producto marginal (Marginal Physical Product) y el producto medio (Average Physical Product), respectivamente.

Si no se conoce la expresión de la función de producción, entonces la elasticidad de la producción se puede aproximar reemplazando el cambio marginal (δ) en la expresión anterior por pequeño, cambio numérico (Δ). Por lo tanto, una expresión aproximada para la elasticidad de la producción en el centro del intervalo se logra al calcular lo siguiente:

$$\varepsilon_i \cong \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta x_i}{x_i}}$$

La elasticidad de producción (normalmente) depende del punto de referencia, y la elasticidad disminuye con la adición de entrada. Algunas funciones de

producción tienen elasticidades de producción constantes, como por ejemplo, la función Cobb-Douglas.

$$Y = \alpha X_1^{b_1} X_2^{b_2} \dots\dots\dots (4)$$

Dónde: Y es la producción, α es la productividad (factor tecnológico), X_1 y X_2 son los insumos (ej, trabajo y capital) y b_1 y b_2 son las elasticidades de la producción con respecto a los insumos, siguiendo el ejemplo serían trabajo y capital respectivamente.

4.3 Modelo para el sorgo

Para la elaboración del modelo econométrico del sorgo fue necesario recabar una serie de datos, los cuales se muestran en la tabla tres, para posteriormente procesarlos mediante el MC2E.

Tabla 2. Variables utilizadas en la estimación del modelo

Variable	Descripción	Escala	Unidades
RENSOR	Rendimiento del sorgo	Continua	ton/ha
CO ₂	Dióxido de carbono	Continua	ppm
PMA	Precipitación media anual	Continua	mm/año
TEMP	Temperatura media anual	Continua	grados centígrados

Nota: ppm = partes por millón; mm = milímetros. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Fuente de datos para modelo del sorgo

Rendimiento del sorgo (grano) (ton/ha)	En el periodo 1959 a 1991 esta variable proviene de las “Estadísticas históricas de México” Tomo I página 497 publicado en línea por el INEGI. El periodo 1992 a 2015 se obtuvo del SIAP de la SAGARPA en línea. Para los años 2001 y 2002, se obtuvieron datos de FAOSTAT, ya que el SIAP carecía de ellos.
Dióxido de carbono (ppm)	Esta variable se obtuvo de los data sets disponible para descargar en la página del Laboratorio de Investigación del Sistema Tierra (ESRL) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos. El periodo corresponde a 1959 a 2015.

Precipitación media anual (mm)	Esta variable se obtuvo de los conjuntos de datos disponibles para descarga en la página del Banco Mundial. La serie corresponde al periodo 1959 a 2015.
Temperatura Media Anual (°C)	Esta variable se obtuvo de los conjuntos de datos disponibles para descarga en la página del Banco Mundial. La serie corresponde al periodo 1959 a 2015.

Fuente: Elaboración propia con base en los sitios consultados.

Cabe señalar que la variable dióxido de carbono se obtuvo de los registros que se llevan en el Monte Mauna, Hawai, Estados Unidos, por parte del ESRL. Pese a que es un registro global de CO₂, para fines de este estudio se considerarán los mismos datos como una aproximación a las emisiones de este gas en México.

Las variables de precipitación media anual y la temperatura media anual son promedios obtenidos a partir de los registros mensuales disponibles para descarga en el sitio web del Banco Mundial para México, los cuales están registrados a partir del año 1901 a 2015.

4.3.1 Formas funcionales y signos esperados

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

$$RENSOR = \beta_{11} + \beta_{12}PMA + \beta_{13}TEMP + \varepsilon_1$$

$$TEMP = \beta_{21} + \beta_{22}CO_2 + \varepsilon_2$$

Respecto a las definiciones de las variables dadas en el Cuadro 1, se ha adicionado un término de error aleatorio ε que incorpora los efectos de errores de medición de las variables, variables del rendimiento que no fueron contempladas.

Los parámetros β_{11} y β_{21} corresponden a la ordenada origen (intercepto) de la respectiva ecuación y corresponden al valor que toma la respectiva variable dependiente cuando las variables independientes toman el valor de cero. Por

otro lado, β_{12} , β_{13} y β_{22} corresponden al efecto marginal de una unidad adicional de la respectiva variable independiente sobre la variable respuesta.

Los signos esperados de los parámetros de interés son los siguientes:

- Se espera una relación directa entre la precipitación media anual y el rendimiento del sorgo por lo tanto el parámetro $\beta_{12} > 0$
- Se espera una relación directa entre la temperatura media anual y el rendimiento del sorgo por lo tanto el parámetro $\beta_{13} > 0$
- Se espera una relación directa entre la temperatura media anual y la concentración de dióxido de carbono y la temperatura tanto el parámetro $\beta_{22} > 0$

4.4 Modelo para el maíz

El modelo econométrico del maíz es análogo al del sorgo, la única diferencia es que para la variable rendimiento no se tuvo que recurrir a FAOSTAT, ya que tanto INEGI como SIAP contaban con los datos requeridos.

Tabla 4. Fuente de datos para modelo del maíz

Rendimiento del maíz (grano) (ton/ha)	En el periodo 1959 a 1991 esta variable proviene de las “Estadísticas históricas de México” Tomo I páginas 485-486 publicado en línea por el INEGI. El periodo 1992 a 2015 se obtuvo del SIAP de la SAGARPA en línea.
Dióxido de carbono (ppm)	Esta variable se obtuvo de los data sets disponible para descargar en la página del Laboratorio de Investigación del Sistema Tierra (ESRL) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos. El periodo corresponde a 1959 a 2015.
Precipitación media anual (mm)	Esta variable se obtuvo de los conjuntos de datos disponibles para descarga en la página del Banco Mundial. La serie corresponde al periodo 1959 a 2015.
Temperatura Media Anual (°C)	Esta variable se obtuvo de los conjuntos de datos disponibles para descarga en la página del Banco Mundial. La serie corresponde al periodo 1959 a 2015.

Fuente: Elaboración propia con base en los sitios consultados

4.4.1 Formas funcionales y signos esperados

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

$$RENDMAI = \beta_{11} + \beta_{12}PMA + \beta_{13}TEMP + \varepsilon_1$$

$$TEMP = \beta_{21} + \beta_{22}CO_2 + \varepsilon_2$$

Los parámetros β_{11} y β_{21} corresponden a la ordenada origen (intercepto) de la respectiva ecuación y corresponden al valor que toma la respectiva variable dependiente cuando las variables independientes toman el valor de cero. Por otro lado, β_{12} , β_{13} y β_{22} corresponden al efecto marginal de una unidad adicional de la respectiva variable independiente sobre la variable respuesta.

Los signos esperados de los parámetros de interés son los siguientes:

- Se espera una relación directa entre la precipitación media anual y el rendimiento del maíz por lo tanto el parámetro $\beta_{12} > 0$
- Se espera una relación directa entre la temperatura media anual y el rendimiento del maíz por lo tanto el parámetro $\beta_{13} > 0$
- Se espera una relación directa entre la temperatura media anual y la concentración de dióxido de carbono y la temperatura tanto el parámetro $\beta_{22} > 0$

V. RESULTADOS

Con la aplicación del método de mínimos cuadrados en dos etapas, se determinó que la dirección de la relación causal es del dióxido de carbono hacia la temperatura y de la temperatura hacia el rendimiento del sorgo y del maíz. 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 del maíz y sorgo como variable endógena, no se encontró 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.

5.1 Sorgo

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las dos etapas, así como su interpretación en forma de elasticidades. El modelo estimado es:

$$RENSOR = -4.30899 + 0.002991PMA + 0.014682TEMP$$

$$TEMP = 16.03223 + 0.013574CO_2$$

5.1.1 Resultados estadísticos del modelo estructural

Los estadísticos descriptivos de las variables utilizadas son los mostrados en la Tabla 3. Las unidades para cada variable son las mismas que las descritas en la última columna de la Tabla 2.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de las variables

Variable	Media	Desviación estándar	Valor máximo	Valor mínimo
RENSOR	3.0856	0.5286	4.17	1.672
CO ₂	351.6	25.4	400.9	316.0
PMA	746.5	61.9	912.7	631.9
TEMP	20.8	12.8	21.6	19.9

Fuente: elaboración propia.

Los resultados del modelo estructural de ecuaciones simultáneas recursivo, estimado mediante mínimos cuadrados en dos etapas, se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Efecto de las variables climáticas sobre el rendimiento del sorgo

Variable	Intercepto	PMA	TEMP	CO ₂	R ² _{ajust}	DW	F
RENSOR							
Coeficiente	-21.6494	0.002991	1.081598		0.37511	1.113	17.81
Error estándar	4.196907	0.001124	0.193454				
Razón de <i>t</i>	-5.16	2.66	5.59				
TEMP							
Coeficiente	16.03223			0.013574	0.62062	1.532	92.61
Error estándar	0.497222			0.001411			
Razón de <i>t</i>	32.24			9.62			

Fuente: elaboración propia.

El análisis estadístico permite determinar que a nivel individual los parámetros de interés estimados son estadísticamente distintos de cero. Por ejemplo, en la ecuación del rendimiento, la razón de *t* asociado a la precipitación media anual es de 2.66, implicando que el mismo es estadísticamente distinto de cero. La razón de *t* asociado a la temperatura media anual es de 5.59, indicando que dicho parámetro es estadísticamente distinto de cero.

5.1.2 Resultados del modelo reducido

No obstante la utilidad del modelo estructural para estudiar las relación de las variables climáticas y del dióxido de carbono con el rendimiento del sorgo, 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 del sorgo. Esto es posible a través del modelo reducido de ecuaciones simultáneas. Los parámetros estimados de esté modelo son los indicados en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros estimados del modelo reducido

Variable exógena	Intercepto	PMA	CO ₂
RENSOR	-4.30899	0.002991	0.014682
TEMP	16.03223	0	0.013574

Fuente: elaboración propia.

El análisis marginal de los parámetros de la forma reducida permite observar lo siguiente en el largo plazo:

- El incremento de una parte por millón en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera incrementará el rendimiento del sorgo en aproximadamente 0.015 toneladas por hectárea.
- El incremento de un milímetro de precipitación incrementara el rendimiento del sorgo en 0.003 toneladas por hectárea.
- El incremento de una parte por millón de concentración de CO₂ en la atmosfera incrementara en 0.014 grados centígrados la temperatura media.

5.1.3 Análisis de los resultados en forma de elasticidades

Si bien el análisis marginal de los resultados estadísticos del modelo de ecuaciones simultaneas en su forma estructural, como en su forma reducida, es facilitado por la linealidad de los parámetros, la interpretación puede ser

confusa cuando las unidades de las variables no son de uso común. Una alternativa de expresar el efecto de las variables predeterminadas sobre las endógenas es a través de las elasticidades. Es una convención en la econometría realizar el análisis utilizando la forma reducida del modelo aun cuando para alguna variable de interés se puede realizar en la forma estructural.

5.1.4 Elasticidades de la forma reducida

Una vez que se han estimado los parámetros del modelo reducido, las elasticidades estimadas, según se muestra en los anexos, se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Elasticidades en el modelo reducido

Variable	PMA	CO ₂
RENSOR	0.724	1.673
TEMP		0.23

Fuente: elaboración propia.

La interpretación de las elasticidades se explica a continuación:

- Elasticidad de la precipitación media anual respecto del rendimiento del sorgo: esta elasticidad resultó ser de 0.724%; lo que implica que si la precipitación media anual se incrementa en un 1%, el rendimiento del sorgo se incrementará en 0.724%.
- Elasticidad de la concentración de CO₂ respecto del rendimiento del sorgo: esta elasticidad fue de 1.673%; lo que implica que si la concentración de dióxido de carbono se incrementa en 1%, el rendimiento del sorgo se incrementará 1.673%.

- Elasticidad de la concentración de CO₂ respecto de la temperatura: esta elasticidad fue de 0.23%; esto significa que la concentración de CO₂ se incrementa en 1%, la temperatura se incrementará en 0.23%.

5.2 Maíz

El orden de los resultados obtenidos a través de mínimos cuadrados en dos etapas es análogo al modelo del sorgo. En este caso el modelo estimado fue:

$$RENDMAI = -10.8557 + 0.003659PMA + 0.028773TEMP$$

$$TEMP = 16.03223 + 0.013574CO_2$$

5.2.1 Resultados estadísticos del modelo estructural

Los estadísticos descriptivos de las variables utilizadas son los mostrados en la tabla 9. Las unidades para cada variable son las mismas que las descritas en la última columna de la tabla 2.

Tabla 9. Estadísticas descriptivas de las variables

Variable	Media	Desviación estándar	Valor máximo	Valor mínimo
RENDMAI	1.99	0.7843	3.4781	0.88
CO ₂	351.6	25.4	400.9	316.0
PMA	746.5	61.9	912.7	631.9
TEMP	20.8	12.8	21.6	19.9

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del modelo estructural de ecuaciones simultáneas recursivo, estimado mediante mínimos cuadrados en dos etapas, se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Efecto de las variables climáticas sobre el rendimiento del maíz

Variable	Intercepto	PMA	TEMP	CO ₂	R ² _{ajust}	DW	F
RENDMAI							
Coeficiente	-44.8381	0.003659	2.119631		0.67766	1.4832	59.87
Error estándar	4.280533	0.001147	0.197308				
Razón de <i>t</i>	-10.47	3.19	10.74				
TEMP							
Coeficiente	16.03223			0.013574	0.62062	1.532	92.61
Error estándar	0.497222			0.001411			
Razón de <i>t</i>	32.24			9.62			

Fuente: Elaboración propia

El análisis estadístico permite determinar que a nivel individual los parámetros de interés estimados son estadísticamente distintos de cero. Por ejemplo, en la ecuación del rendimiento, la razón de *t* asociado a la precipitación media anual es de 3.19, implicando que el mismo es estadísticamente distinto de cero. La razón de *t* asociado a la temperatura media anual es de 10.74, indicando que dicho parámetro es estadísticamente distinto de cero.

5.2.2 Resultados del modelo reducido

No obstante la utilidad del modelo estructural para estudiar las relación de las variables climáticas y del dióxido de carbono con el rendimiento del maíz, 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 del maíz. Esto es posible a través del modelo reducido de ecuaciones simultáneas. Los parámetros estimados de esté modelo son los indicados en la Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros estimados del modelo reducido

Variable exógena	Intercepto	PMA	CO ₂
RENDMAI	-10.8557	0.003659	0.028773
TEMP	16.03223	0	0.013574

Fuente: elaboración propia.

El análisis marginal de los parámetros de la forma reducida permite determinar lo siguiente en el largo plazo:

- El incremento de una parte por millón en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera incrementará el rendimiento del maíz en aproximadamente 0.029 toneladas por hectárea.
- El incremento de un milímetro de precipitación incrementará el rendimiento del maíz en 0.003 toneladas por hectárea.
- El incremento de una parte por millón de concentración de CO₂ en la atmosfera incrementará en 0.014 grados centígrados la temperatura media.

5.2.3 Elasticidades de la forma reducida

Una vez que se han estimado los parámetros del modelo reducido, las elasticidades estimadas, según se muestra en los anexos, se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Elasticidades en el modelo reducido

Variable	PMA	CO ₂
RENDMAI	1.3726	5.09
TEMP		0.23

Fuente: elaboración propia.

La interpretación de las elasticidades se explica a continuación:

- Elasticidad de la precipitación media anual respecto del rendimiento del maíz: esta elasticidad resultó ser de 1.3726%; lo que implica que si la precipitación media anual se incrementa en un 1%, el rendimiento del maíz se incrementará en 1.3726%.
- Elasticidad de la concentración de CO_2 respecto del rendimiento del maíz: esta elasticidad fue de 5.09%; lo que implica que si la concentración de dióxido de carbono se incrementa en 1%, el rendimiento del maíz se incrementará 5.09%.
- Elasticidad de la concentración de CO_2 respecto de la temperatura: esta elasticidad fue de 0.23%; esto significa que la concentración de CO_2 se incrementa en 1%, la temperatura se incrementará en 0.23%.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El maíz es el cultivo más representativo de México por su importancia económica, social y cultural. A nivel mundial nuestro país ocupa el quinto lugar en producción de maíz y el cuarto en producción de sorgo. Ambos cultivos demostraron una relación positiva entre el incremento en la concentración de dióxido de carbono atmosférico y el rendimiento.

En el caso del maíz, si se incrementa un 1% la concentración de CO₂ atmosférico el rendimiento incrementará en 5.1%, mientras que el sorgo incrementará su rendimiento en tan sólo 1.7%. Aun así estos cultivos representan una gran alternativa para hacer frente a problemas relacionados con el cambio climático y la escasez de alimentos.

Un aspecto a resaltar de las plantas C₄, particularmente del maíz y sorgo, es su capacidad para fijar CO₂ atmosférico, ya que, al igual que los bosques, generan externalidades positivas para la población.

Es por ello que surge la necesidad de desarrollar políticas que incentiven la producción de maíz y sorgo, pudiendo dar apoyo a los productores por concepto de servicios ambientales, por ejemplo, en México la demanda de maíz blanco, que es el que consumen las personas, está cubierta con producción nacional mientras que de maíz amarillo (que es la variedad que mejor fija CO₂) sólo se alcanza a cubrir el 23.95%. Podría promoverse la producción de biocombustibles ya que, al apoyar a esta industria, se incrementaría el precio de la materia prima (ej. Maíz), y por tanto, se incrementaría el ingreso de los productores y se reduciría el apoyo directo al ingreso.

De ese modo el Gobierno tendría un ahorro que puede destinar a otros sectores estratégicos, y se tendrían grandes beneficios como incremento en la producción y calidad de alimentos, disminución en los niveles de contaminación debido a la producción de biocombustibles y a la capacidad fijadora de CO₂ de cultivos como maíz y sorgo.

VII. BIBLIOGRAFIA Y SITIOS CONSULTADOS

- Banco Mundial. <https://datos.bancomundial.org/pais/mexico>. Consultado el 5 de agosto de 2018.
- Benz, B. F. (1997), Diversidad y distribución prehispánica del maíz mexicano, *Arqueología mexicana*, Volumen 5, no.25, pp.17-23.
- Bourgeon, J. & Tréguer, D. (2010), Killing two birds with one stone: US and EU biofuel programmes, *European Review of Agricultural Economics*, volume 37, issue 3, pp. 369-394.
- Carpenter J., Sánchez G. & E. Villalpando (2005), The Late Archaic/Early Agricultural Period in Sonora, Mexico, *New Perspective on the Late Archaic Across the Borderlands*, University of Texas Press, Austin. pp. 3-40
- Chuck, C., Pérez, E., Heredia, E. y Serna, S. (2011), Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México: Tecnologías, avances y áreas de oportunidad, *Rev. Mex. Ing. Quím*, vol.10, no.3
- Cuatecontzi, H. y Gasca, J. 2004. *Cambio climático una visión desde México. Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. Instituto Nacional de Ecología. México.
- Doebley, J. & H. H. Iltis. (1980), Taxonomy of Zea (Gramineae). I. A subgeneric classification with key to taxa, *Amer. J. Bot*, volume 67, issue 6, pp. 982-993.
- Dr. Pieter Tans, NOAA/ESRL (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/) and Dr. Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography (scrippsco2.ucsd.edu/). Consultado el 30 de julio de 2018.
- Doggett, H (1988), Sorghum, 2nd edn. Longman Scientific and Technical, London.
- Driever, S. & Kromdijk, J. (2013), Will C₃ crops enhanced with the C₄ CO₂-concentrating mechanism live up to their full potential (yield)?, *Journal of Experimental Botany*, volume 64, issue 13, 1, pp. 3925-3935.
- FAO (1997), La Economía del Sorgo y del Mijo en el Mundo: Hechos, Tendencias y Perspectivas, Servicio de Productos Alimenticios Básicos de la Dirección de Productos Básicos y Comercio de la FAO, Roma, Italia.
- Fodor, N., et al. (2017), Integrating Plant Science and Crop Modeling: Assessment of the Impact of Climate Change on Soybean and Maize Production, *Plant and Cell Physiology*, volume 58, issue 11, pp. 1833-1847.
- Garduño, R. 2004, *Cambio climático una visión desde México. ¿Qué es el efecto invernadero?* Instituto Nacional de Ecología. México.

- Gujarati, D., & Porter, D. (2009), *Econometría*, McGraw Hill, 5ª edición, México, D.F.
- INEGI (1995), *Estadísticas históricas de México. Tomo I*. Aguascalientes, Ags., México
- 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), *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza.
- IPCC (2013), *Cambio climático 2013 bases físicas, Resumen para responsables de políticas*.
- IPCC (2014), *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio*, Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza.
- Jansson, C., et al. (2010), Phytosequestration: Carbon Biosequestration by Plants and the Prospects of Genetic Engineering, *BioScience*, volume 60, issue 9, pp. 685-696.
- Jin, J., Tang, C. & Sale, P. (2015), The impact of elevated carbon dioxide on the phosphorus nutrition of plants: a review, *Annals of Botany*, volume 116, issue 6, pp. 987–999.
- Jurić, I., et al. (2017), Size matters for single-cell C₄ photosynthesis in *Bienertia*, *Journal of Experimental Botany*, volume 68, issue 2, pp. 255-267.
- Kato Y., T. A. (1984), *Chromosome morphology and the origin of maize and its races*, *Evol. Biol*, volume 17, pp. 219-253.
- Klein, L. (1974), *A textbook of econometrics*, Prentice-Hall, 2ª ed., Englewood Cliffs, N.J, USA, p. 150.
- Leakey, A., et al. (2009), Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE, *Journal of Experimental Botany*, volume 60, issue 10, pp. 2859-2876.
- Lobell, D. & Field, C. (2008), Estimation of the carbon dioxide (CO₂) fertilization effect using growth rate anomalies of CO₂ and crop yields since 1961, *Global Change Biology*, volume 14, issue 1, pp. 39-45.

- Lobell, D., et al. (2014), Greater Sensitivity to Drought Accompanies Maize Yield Increase in the U.S., *Midwest. Science*, volume 344, 6183 (pp. 516-519).
- Long, S., Marshall, A. & Guang, X. (2015), Meeting the Global Food Demand of the Future by Engineering Crop Photosynthesis and Yield Potential, *Cell*, volume 161, issue 1, pp 56-66.
- López, A. (2017), *Emisiones de CO₂ y sustentabilidad en la agroindustria de la caña de azúcar en México*. Universidad Autónoma Chapingo. Tesis de Maestría.
- Marcos, B., et al. (2016), La biomasa de los sistemas productivos de maíz nativo (*Zea mays*) como alternativa a la captura de carbono, *Rev. Int. Contam. Ambient*, vol.32, no.3, pp.361-367.
- Martínez, J. y Fernández, A. (2004), *Cambio climático: una visión desde México*, Instituto Nacional de Ecología, México.
- McGrath, J. & Lobell, D. (2011), An independent method of deriving the carbon dioxide fertilization effect in dry conditions using historical yield data from wet and dry years, *Global Change Biology*, volume 17, issue 8, pp. 2689-2696.
- McKee, T. & McKee, J. (2013), *Bioquímica*. Las bases moleculares de la vida, McGraw Hill, 5ª edición, México, D.F
- Mendelsohn, R. (2008), The Impact of Climate Change on Agriculture in Developing Countries, *Journal of Natural Resources Policy Research*, volume 1, issue 1, pp. 5-19.
- Muluneh, A. et al. (2015), Impact of predicted changes in rainfall and atmospheric carbon dioxide on maize and wheat yields in the Central Rift Valley of Ethiopia, *Regional Environmental Change*, volume 15, issue 6, pp 1105–1119.
- Nicholson, W. (2005), *Teoría microeconómica. Principios básicos y ampliaciones*, Cengage learning, 9ª edición, México, D.F.
- Nogia, P., et al. (2016), Capturing atmospheric carbon: biological and nonbiological methods, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, volume 11, issue 2, pp. 266–274.
- OCDE, Environment, Health and Safety Division. (2003), Consensus document on the biology of *Zea Mays* subsp. *Mays* (Maize), *Harmonisation of Regulatory Oversight in Biotechnology*, 27.
- Pérez, A., et al. (2010), *Caracterización y potencialidades del grano de sorgo (Sorghum bicolor L. Moench)*, Pastos y Forrajes, volumen 33, no.1.

- Pilbeam, D. (2015), Breeding crops for improved mineral nutrition under climate change conditions, *Journal of Experimental Botany*, volume 66, issue 12, pp. 3511-3521.
- Pindyck, R. & Rubinfeld, D. (2009), *Microeconomía*, Pearson, 7ª edición, Madrid, España.
- Raghavendra, A. & Sage, R. (2011), C4 Photosynthesis and Related CO₂ Concentrating Mechanisms, *Springer*, volume 32.
- Rasmussen, S. (2011), *Production economics: The basic theory of the production optimization*, Springer.
- Robert M. (2002), Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia.
- SAGARPA (2017), *Planeación agrícola nacional (2017-2030)*.
- Sage, R. (2017), A portrait of the C₄ photosynthetic family on the 50th anniversary of its discovery: species number, evolutionary lineages, and Hall of Fame, *Journal of Experimental Botany*, volume 68, issue 2, pp. e11-e28.
- Schlüter, U. & Weber, A. (2016), The Road to C₄ Photosynthesis: Evolution of a Complex Trait via Intermediary States, *Plant and Cell Physiology*, volume 57, issue 5, pp. 881-889.
- SIAP. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119> Consultado el 6 de agosto de 2018.
- Thompson, L. (1969), Weather and Technology in the Production of Corn in the U. S. Corn Belt¹, *Agron. J.*, volume 61, pp. 453-456.
- Urban, D., Sheffield, J. & Lobell, D. (2015), The impacts of future climate and carbon dioxide changes on the average and variability of US maize yields under two emission scenarios, *Environmental Research Letters*, volume 10, issue 4.

VII. ANEXOS

Anexo 1. Modelo econométrico del maíz

```
data maiz;
input fecha rendmai co2ppm precmma tempgce;
cards;
1959 0.88 315.976667 744.20217 20.6547833
1960 0.975 316.9075 700.55324 20.4998750
1961 0.993 317.64 731.8388 20.5220917
1962 0.995 318.448333 660.58053 20.8266750
1963 0.987 318.985 713.7535 20.7245750
1964 1.133 319.61 665.66834 20.3694667
1965 1.158 320.028333 702.90173 20.5894167
1966 1.119 321.364167 791.5985 20.1711083
1967 1.139 322.175 785.3362 20.4552917
1968 1.181 323.046667 784.2493 20.1202333
1969 1.184 324.618333 754.887 20.6782917 11
1970 1.194 325.6775 733.63134 20.3294500
1971 1.272 326.313333 753.31798 20.3913500
1972 1.265 327.455 761.4034 20.8373500
1973 1.132 329.671667 800.33155 20.3887083
1974 1.168 330.24 696.56444 20.3992417
1975 1.262 331.146667 688.56003 20.2430417
1976 1.182 332.15 802.34812 19.8970083
1977 1.357 333.895 644.49842 20.5555750
1978 1.52 335.5 811.40952 20.3943500
1979 1.517 336.845833 667.1904 20.1251583
1980 1.82864 338.6825 698.95498 20.6317917
1981 1.82317 339.926667 868.1809 20.4540917
1982 1.79791 341.126667 648.8194 20.8121917
1983 1.77691 342.775 806.13584 20.5407250
1984 1.85352 344.419167 890.55146 20.3666000
1985 1.85729 345.896667 781.6353 20.4227750
1986 1.84049 347.148333 747.91805 20.7152583
1987 1.70701 348.928333 669.5018 20.3273083
1988 1.62797 351.480833 761.7043 20.3876000
1989 1.69302 352.901667 723.01126 20.8143167
1990 1.99398 354.18 824.1379 20.9526750
1991 2.05067 355.585833 763.5027 21.0182417
1992 2.34416 356.369167 764.3345 20.9037250
1993 2.43868 357.034167 764.46498 21.1797833
1994 2.22538 358.878333 631.8574 21.3643833
1995 2.28838 360.870833 717.0412 21.3238583
1996 2.23869 362.6375 703.37279 21.2167167
1997 2.38459 363.756667 703.7337 21.0372333
1998 2.34307 366.623333 760.36077 21.4610500
1999 2.472 368.305833 766.24209 20.9461417
2000 2.46211 369.471667 724.77058 21.1547500
2001 2.57806 371.013333 678.7614 20.9165000
2002 2.71026 373.0925 726.50039 21.0994250
2003 2.75249 375.63 759.19584 21.1657000
2004 2.81767 377.360833 844.53314 20.9460417
2005 2.92768 379.595 726.2624 21.2996333
2006 3.00132 381.800833 786.39905 21.4469917
2007 3.20628 383.588333 772.35911 21.0276667
```

2008	3.32355	385.445833	785.04986	21.0213333
2009	3.23675	387.3525	663.02201	21.5343333
2010	3.26021	389.893333	807.80993	20.7495750
2011	2.90591	391.644167	682.0788	21.5414583
2012	3.18751	393.865833	704.7571	21.5927167
2013	3.19408	396.56	912.728	21.1770167
2014	3.29641	398.606667	841.60655	21.5132083
2015	3.47817	400.879167	742.0448	21.6456750

```

;
proc syslin data=maiz 2sls outest = B reduced out=maizp; * proc syslin
with 2sls;
instruments co2ppm precmma; * list instrumental variables;
endogenous rendmai tempgce; * list endogenous variables;
rendiprom: model rendmai = precmma tempgce/dw; output P=renmail; *
rendimiento equation;
temperatura:model tempgce = co2ppm/dw; output P=tempgcel; *
temperatura equation;
run;
quit;

```

Fuente: Elaboración propia con datos de: CO₂: Sistema Tierra (ESRL) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos; Temperetura y precipitación: Banco mundial y rendimiento del maíz: INEGI y SIAP.

Anexo 2. Salida del modelo de maíz en SAS

Procedimiento SYSLIN
Estimación de mínimos cuadrados de dos etapas

Modelo **RENDIPROM**
Variable dependiente rendmai

Análisis de la varianza

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	2	33.36596	16.68298	59.87	<.0001
Error	54	15.04852	0.278676		
Total corregido	56	34.44961			

Raíz MSE 0.52790 **R-cuadrado** 0.68917
Media dependiente 1.99188 **R-Sq Ajust** 0.67766

Coef Var 26.50254

Estimadores de parámetros

Variable	DF	Estimador del parámetro	Error estándar	Valor t	Pr > t
Intercept	1	-44.8381	4.280533	-10.47	<.0001
premma	1	0.003659	0.001147	3.19	0.0024
tempgce	1	2.119631	0.197308	10.74	<.0001

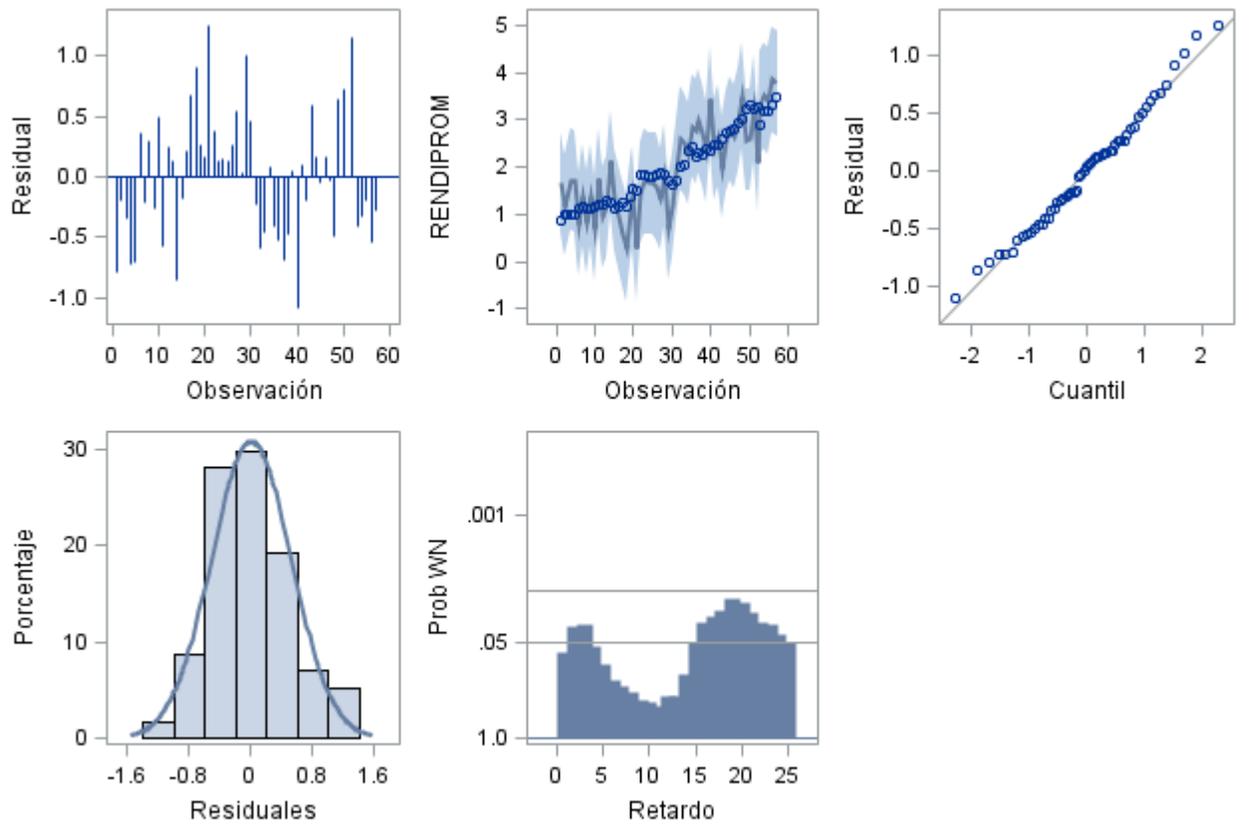
Durbin-Watson 1.483199

Número de observaciones 57

Autocorrelación de primer orden 0.235311

Procedimiento SYSLIN
Estimación de mínimos cuadrados de dos etapas

Diagnósticos de ajuste para RENDIPROM



Observaciones 57 MSE 0.278676 DF del modelo 3

Sistema SAS

Procedimiento SYSLIN
Estimación de mínimos cuadrados de dos etapas

Modelo TEMPERATURA

Variable dependiente tempgce

Análisis de la varianza

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	6.670366	6.670366	92.61	<.0001
Error	55	3.961478	0.072027		
Total corregido	56	10.63184			

Raíz MSE 0.26838 **R-cuadrado** 0.62740

Media dependiente 20.80494 **R-Sq Ajust** 0.62062

Coef Var 1.28997

Estimadores de parámetros

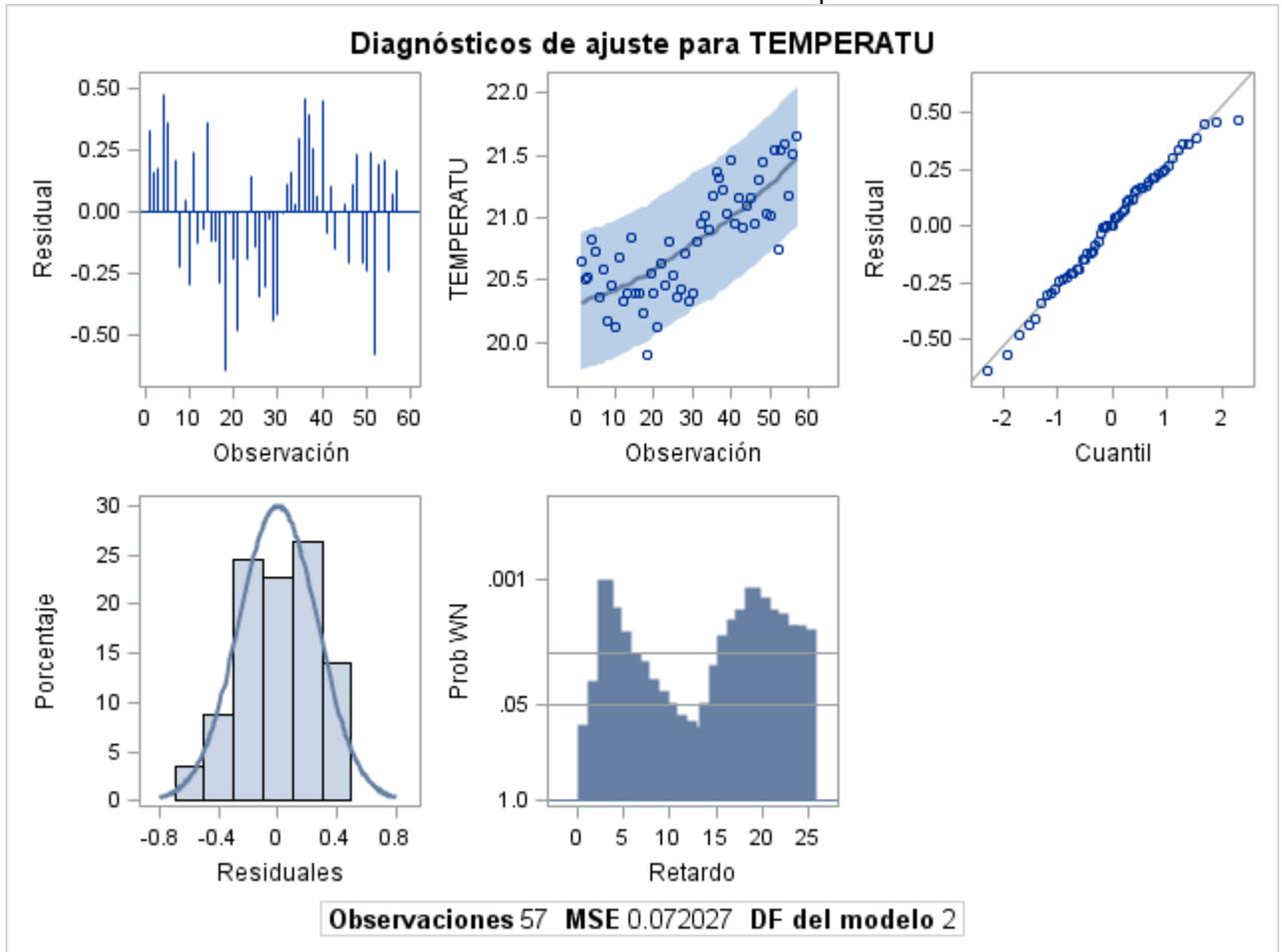
Variable	DF	Estimador del parámetro	Error estándar	Valor t	Pr > t
Intercept	1	16.03223	0.497222	32.24	<.0001
co2ppm	1	0.013574	0.001411	9.62	<.0001

Durbin-Watson 1.53205

Número de observaciones 57

Autocorrelación de primer orden 0.216225

Procedimiento SYSLIN
Estimación de mínimos cuadrados de dos etapas



Variables endógenas

rendmai tempgce

RENDIPROM 1 -2.11963

TEMPERATURA 0 1

Variables exógenas

Intercept premma co2ppm

RENDIPROM -44.8381 0.003659 0

TEMPERATURA 16.03223 0 0.013574

Variables endógenas inversas

RENDIPROM TEMPERATURA

rendmai	1	2.119631
tempgce	0	1

Forma reducida

Intercept precmma co2ppm

rendmai	-10.8557	0.003659	0.028773
tempgce	16.03223	0	0.013574

Anexo 3. Modelo econométrico del sorgo

```

data sorgo;
input fecha rendsor co2ppm    precmma    tempgce;
cards;

```

1959	1.672	315.976667	744.20217	20.6547833
1960	1.797	316.9075	700.55324	20.4998750
1961	2.941	317.64	731.8388	20.5220917
1962	2.516	318.448333	660.58053	20.8266750
1963	2.036	318.985	713.7535	20.7245750
1964	1.901	319.61	665.66834	20.3694667
1965	2.376	320.028333	702.90173	20.5894167
1966	2.450	321.364167	791.5985	20.1711083
1967	2.475	322.175	785.3362	20.4552917
1968	2.570	323.046667	784.2493	20.1202333
1969	2.781	324.618333	754.887	20.6782917
1970	2.829	325.6775	733.63134	20.3294500
1971	2.689	326.313333	753.31798	20.3913500
1972	2.355	327.455	761.4034	20.8373500
1973	2.760	329.671667	800.33155	20.3887083
1974	3.028	330.24	696.56444	20.3992417
1975	2.856	331.146667	688.56003	20.2430417
1976	3.219	332.15	802.34812	19.8970083
1977	3.060	333.895	644.49842	20.5555750
1978	2.997	335.5	811.40952	20.3943500
1979	3.428	336.845833	667.1904	20.1251583
1980	3.039	338.6825	698.95498	20.6317917
1981	3.613	339.926667	868.1809	20.4540917
1982	3.290	341.126667	648.8194	20.8121917
1983	3.185	342.775	806.13584	20.5407250
1984	3.079	344.419167	890.55146	20.3666000
1985	3.543	345.896667	781.6353	20.4227750
1986	3.152	347.148333	747.91805	20.7152583
1987	3.399	348.928333	669.5018	20.3273083
1988	3.276	351.480833	761.7043	20.3876000
1989	3.086	352.901667	723.01126	20.8143167
1990	3.289	354.18	824.1379	20.9526750
1991	3.120	355.585833	763.5027	21.0182417
1992	3.89	356.369167	764.3345	20.9037250

1993	2.94	357.034167	764.46498	21.1797833
1994	2.96	358.878333	631.8574	21.3643833
1995	3.04	360.870833	717.0412	21.3238583
1996	3.12	362.6375	703.37279	21.2167167
1997	3.04	363.756667	703.7337	21.0372333
1998	3.31	366.623333	760.36077	21.4610500
1999	2.99	368.305833	766.24209	20.9461417
2000	3.08	369.471667	724.77058	21.1547500
2001	3.38	371.013333	678.7614	20.9165000
2002	2.98	373.0925	726.50039	21.0994250
2003	3.43	375.63	759.19584	21.1657000
2004	3.82	377.360833	844.53314	20.9460417
2005	3.45	379.595	726.2624	21.2996333
2006	3.45	381.800833	786.39905	21.4469917
2007	3.49	383.588333	772.35911	21.0276667
2008	3.58	385.445833	785.04986	21.0213333
2009	3.61	387.3525	663.02201	21.5343333
2010	3.92	389.893333	807.80993	20.7495750
2011	3.72	391.644167	682.0788	21.5414583
2012	3.83	393.865833	704.7571	21.5927167
2013	3.74	396.56	912.728	21.1770167
2014	4.17	398.606667	841.60655	21.5132083
2015	3.13	400.879167	742.0448	21.6456750

```

;
proc syslin data=sorgo 2sls outest = B reduced out=sorgop; * proc
syslin with 2sls;
instruments co2ppm precmma; * list instrumental variables;
endogenous rendsor tempgce; * list endogenous variables;
rendiprom: model rendsor = precmma tempgce/dw; output P=rendor1; *
rendimiento equation;
temperatura: model tempgce = co2ppm/dw; output P=tempgcel; *
temperatura equation;
run;
quit;

```

Fuente: Elaboración propia con datos de: CO₂: Sistema Tierra (ESRL) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos; Temperetura y precipitación: Banco mundial y rendimiento del sorgo: INEGI y SIAP.

Anexo 4. Salida del modelo de sorgo en SAS

Procedimiento SYSLIN
Estimación de mínimos cuadrados de dos etapas

Modelo	RENDIPROM
Variable dependiente	rendsor

Análisis de la varianza

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	2	9.541114	4.770557	17.81	<.0001
Error	54	14.46628	0.267894		
Total corregido	56	15.64537			

Raíz MSE 0.51758 **R-cuadrado** 0.39742
Media dependiente 3.08556 **R-Sq Ajust** 0.37511
Coef Var 16.77441

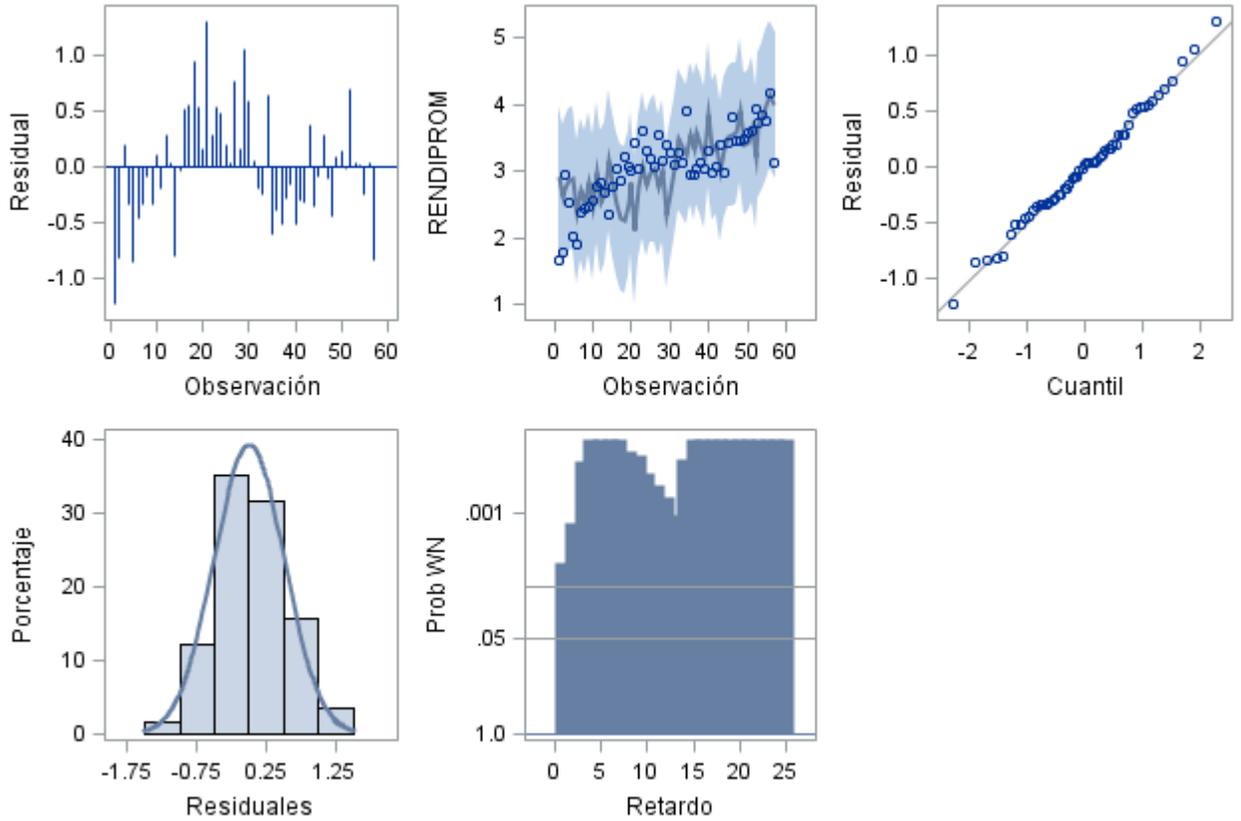
Estimadores de parámetros

Variable	DF	Estimador del parámetro	Error estándar	Valor t	Pr > t
Intercept	1	-21.6494	4.196907	-5.16	<.0001
premma	1	0.002991	0.001124	2.66	0.0103
tempgce	1	1.081598	0.193454	5.59	<.0001

Durbin-Watson 1.112901
Número de observaciones 57
Autocorrelación de primer orden 0.364955

Procedimiento SYSLIN
Estimación de mínimos cuadrados de dos etapas

Diagnósticos de ajuste para RENDIPROM



Observaciones 57 MSE 0.267894 DF del modelo 3

Sistema SAS

Procedimiento SYSLIN
Estimación de mínimos cuadrados de dos etapas

Modelo TEMPERATURA

Variable dependiente tempgce

Análisis de la varianza

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	6.670366	6.670366	92.61	<.0001
Error	55	3.961478	0.072027		
Total corregido	56	10.63184			

Raíz MSE 0.26838 **R-cuadrado** 0.62740

Media dependiente 20.80494 **R-Sq Ajust** 0.62062

Coef Var 1.28997

Estimadores de parámetros

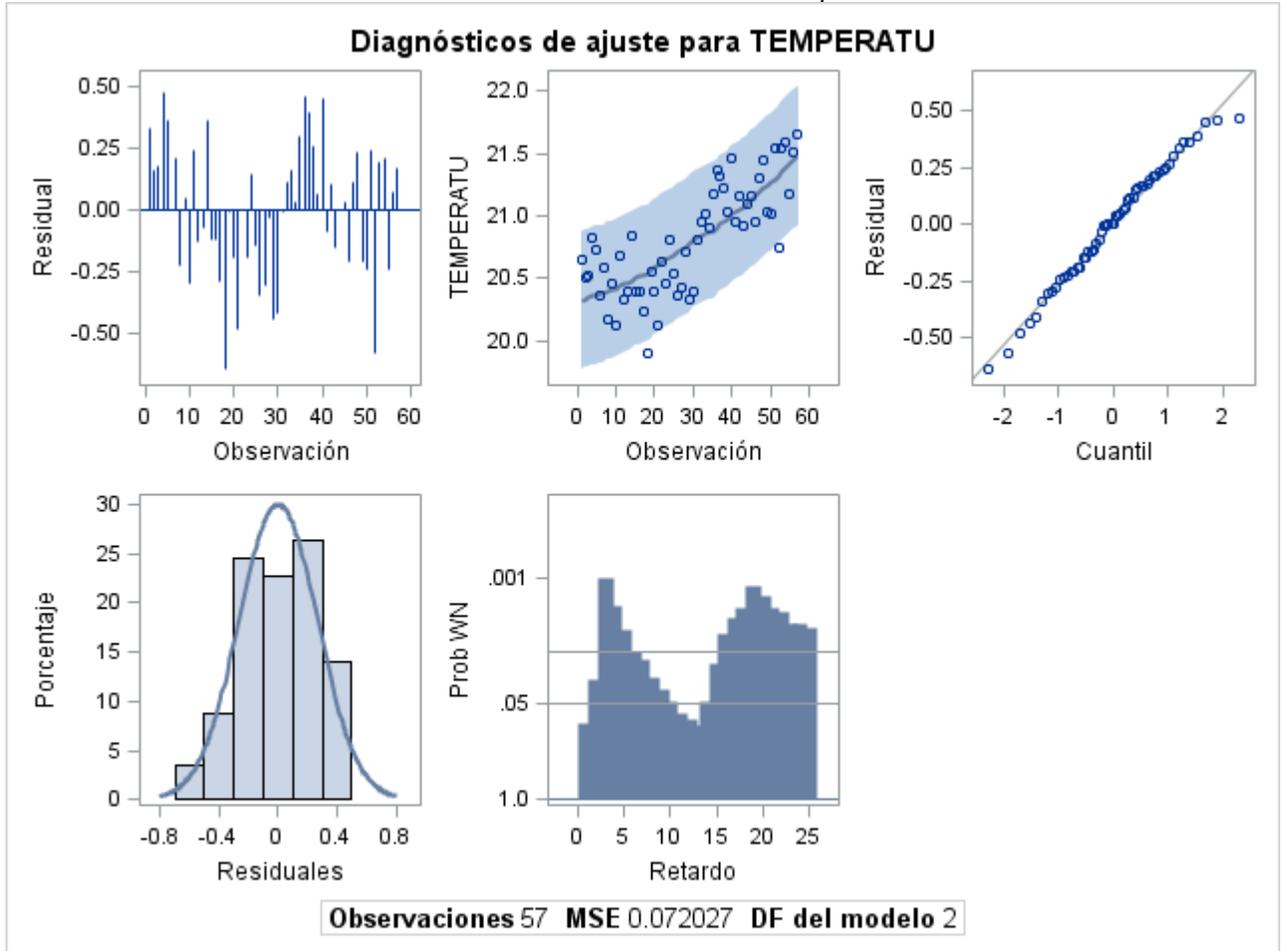
Variable	DF	Estimador del parámetro	Error estándar	Valor t	Pr > t
Intercept	1	16.03223	0.497222	32.24	<.0001
co2ppm	1	0.013574	0.001411	9.62	<.0001

Durbin-Watson 1.53205

Número de observaciones 57

Autocorrelación de primer orden 0.216225

Procedimiento SYSLIN
Estimación de mínimos cuadrados de dos etapas



Variables endógenas

rendor tempgce

RENDIPROM	1	-1.0816
TEMPERATURA	0	1

Variables exógenas

Intercept premma co2ppm

RENDIPROM	-21.6494	0.002991	0
TEMPERATURA	16.03223	0	0.013574

Variables endógenas inversas

RENDIPROM TEMPERATURA

rendersor	1	1.081598
tempgce	0	1

Forma reducida

	Intercept	premma	co2ppm
rendersor	-4.30899	0.002991	0.014682
tempgce	16.03223	0	0.013574

Anexo 5. Estimación de las elasticidades en la forma reducida del modelo de maíz

Ahora bien de acuerdo a la definición de elasticidad, las elasticidades de la forma reducida del modelo de ecuaciones simultáneas se obtienen de la forma que se exponen a continuación.

$$RENDMAI = -10.8557 + 0.003659PMA + 0.02877TEMP$$

$$TEMP = 16.03223 + 0.013547CO_2$$

- Elasticidad de la precipitación media anual respecto del rendimiento del maíz:

$$\frac{\delta RENDMAI}{\delta PMA} \frac{PMA}{RENDMAI} = 0.003659 \frac{746.5}{1.99} = 1.372584673 \approx 1.3726$$

- Elasticidad de la concentración de CO₂ respecto del rendimiento del maíz:

$$\frac{\delta RENDMAI}{\delta CO_2} \frac{CO_2}{RENDMAI} = 0.028773 \frac{351.6}{1.99} = 5.08371196 \approx 5.09$$

- Elasticidad de la concentración de CO₂ respecto de la temperatura

$$\frac{\delta TEMP}{\delta CO2} \frac{CO2}{TEMP} = 0.013574 \frac{351.6}{20.8} = 0.2294528077 \approx 0.23$$

Anexo 6. Estimación de las elasticidades en la forma reducida del modelo de sorgo

Ahora bien de acuerdo a la definición de elasticidad, las elasticidades de la forma reducida del modelo de ecuaciones simultáneas se obtienen de la forma que se expone a continuación.

$$RENDSOR = -4.30899 + 0.002991PMA + 0.014682TEMP$$

$$TEMP = 16.03223 + 0.013547CO_2$$

- Elasticidad de la precipitación media anual respecto del rendimiento del sorgo:

$$\frac{\delta RENDSOR}{\delta PMA} \frac{PMA}{RENDSOR} = 0.002991 \frac{746.5}{3.0856} = 0.7236133977 \approx 0.724$$

- Elasticidad de la concentración de CO₂ respecto del rendimiento del sorgo:

$$\frac{\delta RENDSOR}{\delta CO2} \frac{CO2}{RENDSOR} = 0.014682 \frac{351.6}{3.0856} = 1.672994296 \approx 1.673$$

- Elasticidad de la concentración de CO₂ respecto de la temperatura

$$\frac{\delta TEMP}{\delta CO2} \frac{CO2}{TEMP} = 0.013574 \frac{351.6}{20.8} = 0.2294528077 \approx 0.23$$