



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**ALTERACIÓN DE LA FERTILIDAD DEL SUELO POR EL
CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO EN LA
PRODUCTIVIDAD DE FRIJOL**

LILIANA TERRAZAS MENDOZA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO DE MÉXICO

2011

La presente tesis, titulada: **Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su impacto en la productividad de frijol**, realizada por el alumno: **Liliana Terrazas Mendoza**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:


DR. IOURII NIKOLSKII GAVRILOV

DIRECTOR:


DR. MARCIAL CASTILLO ÁLVAREZ

ASESOR:


M.C. ANTONIO GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

ASESOR:


M.C. SERGIO SANTIAGO HERRERA GÓMEZ

Montecillo, Texcoco, México, abril de 2011.

ALTERACIÓN DE LA FERTILIDAD DEL SUELO POR EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO EN LA PRODUCTIVIDAD DE FRIJOL

Liliana Terrazas Mendoza

RESUMEN

La estimación de la vulnerabilidad de la productividad agrícola en México por efectos del cambio climático global esperado, ha sido realizada principalmente para varios cultivos, sin considerar la alteración de fertilidad del suelo por el mismo cambio climático. En Algunos trabajos donde sí considera la alteración de la fertilidad del suelo corresponden a los cultivos de maíz y trigo. Uno de los cultivos de gran importancia nacional es el frijol. El objetivo principal del presente trabajo fue estimar el papel de modificación del índice integral de fertilidad del suelo en los cálculos de la productividad del cultivo de frijol en los sitios de referencia ubicados en diferentes partes del país con producción bajo las condiciones de temporal y riego. Se ha desarrollado una metodología para predecir la alteración del índice integral de fertilidad del suelo de temporal y de riego, atribuible al cambio climático. Los resultados de la investigación señalan que se espera un cambio en la productividad del cultivo de frijol tanto positivo (hasta un 43% en condiciones de temporal y 62% bajo riego) como negativo (hasta 78% en condiciones de temporal y 3% bajo riego), en función de la ubicación del sitio de referencia. Ignorar el factor de la alteración de la fertilidad del suelo, puede causar errores significativos en las estimaciones de los rendimientos, de hasta un 50% en la producción de frijol de temporal y hasta un 35% en el caso de frijol bajo riego. La sensibilidad de los suelos agrícolas bajo riego en México al cambio climático, es menor que los suelos agrícolas de temporal, sin afectar significativamente la vulnerabilidad de los cultivos al cambio climático. La principal afectación por la alteración de la fertilidad del suelo en estimaciones de vulnerabilidad de los cultivos bajo riego se espera en las zonas climáticas semiáridas, semihúmedas y húmedas tropicales de México, donde el índice climático adimensional promedio anual *IHT* es menor de 2.5.

Palabras clave: ley geográfica de zonificación de suelos, índice climático, índice integral de fertilidad.

ALTERATION OF THE FERTILITY OF THE SOIL BY THE CLIMATE CHANGE AND ITS IMPACT IN THE BEAN PRODUCTIVITY

Abstract

The of agricultural productivity vulnerability in Mexico to the expected global climate change have been realized principally for various crops without taking into account the soil fertility alteration as a result of the climate change. Some works with consideration of soil fertility alteration are corresponded to the crops of maize and wheat. One of the most nationally important agricultural crops is bean. The principal goal of present paper was to assess the role of integral soil fertility index modification in calculations of bean productivity in referenced sites of Mexico under rain fed and irrigation conditions. The methodology to predict alteration of integral the fertility index of rain fed and irrigated soil due to the climate change has been developed. The results of investigation show that the bean productivity change is expected as positive (up to 43% under rain fed conditions and 62% under irrigation) as negative (up to 78% under rain fed conditions and 3% under irrigation) in function of a location of reference site. The errors in crop yields estimation of bean can be up to 50% under rain fed conditions and up to 35% under irrigation if the soil fertility index alteration is ignored. The irrigated soil sensitivity to the climate change in Mexico is less than of the rain fed agricultural soils and it does not affect significantly the irrigated crops vulnerability to the climate change. The significant contribution of soil fertility alteration in estimations of irrigated crops vulnerability is expected in semiarid, semihumid and humid tropical Mexican zones where dimensionless mean annual radiative index of dryness *IHT* is less than 2.5.

Key words: *geographic law of soil zonality, climatic index, integral soil fertility index.*

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA (CONACYT)

Por el financiamiento otorgado para realizar
mis estudios de Maestría en Ciencias.

A LA SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS
NATURALES (SEMARNAT)

Por el apoyo recibido para la realización del presente trabajo
a través del proyecto SEMARNAT-CONACYT 23748.

AL DR. IOURII NIKOLSKII GAVRILOV

Por sus valiosas sugerencias y contribuciones
durante el proceso de investigación
gracias por su paciencia.

AL DR. MARCIAL CASTILLO ÁLVAREZ

Por el tiempo que dedicó al dirigir esta tesis.
Gracias por su gran paciencia, disposición
y orientación en este trabajo.

AL MC. ANTONIO GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

Por sus acertadas sugerencias y disponibilidad
oportuna para la elaboración de este trabajo.

AL M.C. SERGIO SANTIAGO HERRERA GÓMEZ

Por el tiempo y comprensión durante
el proceso de investigación.

A **Dios**, al que debo todo lo que soy y lo que tengo

A los millones de mexicanos que al pagar impuestos han hecho posible que el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) haya financiado mi formación académica en el Colegio de Postgraduados (CP);

Al Dr. Iourii Nikolskii Gavrilov y a la maestra Oktiabrina Backlaeva Egorova por su calidad humana, su sincera amistad y estar siempre dispuestos a ayudarme;

Al Centro Mexicano de Investigaciones Hidroagrícolas, al Dr Enrique Mejía Sáenz, Mc. Agustín Rodríguez y MC. Ana Laura Santos por el apoyo otorgado durante la realización de este trabajo de investigación.

A todas aquellas personas que me han apoyado con lo más importante, su confianza muy especialmente a Don Alfonso Barcenas, su esposa la Sra. Vero y mi amiga Anita.

A mi familia por ser el origen de lo que soy, especialmente a mi madre Lucia Terrazas Mendoza gracias por su apoyo, todos los sacrificios y sobre todo por dejarme ser con tanta libertad.

A Sergio por orientarme, acompañarme y estar conmigo en este proceso y en muchos momentos importantes de mi vida.

A mis amigos: A todos y cada uno de aquellos que compartieron su alegría disminuyendo todos esos momentos de estrés y por todas las palabras de aliento recibidas Caro, Mimi, Mary, Ciro, Jaz, Ivan, Lupita, Lily, Vic, Hazael. A todas las amistades conservadas a través de los años Jess, Brenda, Anuar, Osyel, Julio, gracias por formar parte de mi vida.

Contenido

Página

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS	4
2.1.	Objetivo General	4
2.2.	Objetivos Particulares.....	4
2.3.	Hipótesis.....	4
3.	REVISIÓN DE LITERATURA	5
3.1.	El cambio climático global: Breve explicación del fenómeno.....	5
3.1.1	Impactos del cambio climático en la agricultura mundial	6
3.1.1.1.	Respuesta de algunos cultivos a los cambios climáticos	9
3.1.1.2.	Procesos fisiológicos y fenológicos modelados.....	11
3.1.1.3.	La modelación de la fertilidad del suelo	14
3.2.	Modelos y escenarios de cambio climático del IPCC y los generados para México	20
3.2.1	Escenarios de temperatura	22
3.2.2.	Escenarios de precipitación	23
3.3.	Fertilidad de los suelos mexicanos y su incorporación a los modelos de simulación de cultivos.....	24
3.4.	Vulnerabilidad de las zonas productoras de frijol al cambio climático en México	29
3.4.1	Requerimientos agroecológicos del cultivo de frijol	30
3.4.2	Fisiología del frijol	32
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	33
4.1.	Materiales.....	33
4.2.	Métodos.....	34
4.3.	Selección de los sitios de referencia representativos ubicados en diferentes zonas climáticas de México.....	35
4.4.	Estimación de vulnerabilidad de la productividad del frijol de temporal y de riego.....	36
4.5.	Estimación del Rendimiento Potencial (Y_{max}^j).....	38
4.6.	Cálculo del índice de disponibilidad de agua en el suelo (K_{hidr}).....	41
4.6.1	Cálculo del índice de disponibilidad de agua en el suelo (K_{hidr}) para frijol de temporal	42
4.6.2.	Cálculo del índice de disponibilidad de agua en el suelo (K_{hidr}) para frijol irrigado	43
4.7.	Índice Integral de Fertilidad de los suelos (F).....	45
4.8.	Valoración integral de los resultados y su comparación con otros estudios.....	47
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
5.1.	Selección de los sitios de referencia de producción de frijol de temporal y bajo riego	49
5.2.	Caracterización climática de los sitios de referencia a fines del siglo XX y mediados del XXI.....	50
5.3.	Estimación de la vulnerabilidad de la productividad del frijol de temporal y de riego ante escenarios de cambio climático para el año 2050	55

5.3.1. Estimación del Rendimiento Potencial máximo $Y_{máx}^j$	56
5.3.2. Índice de disponibilidad de agua para el cultivo de frijol (K_{hidr}).....	58
5.3.3. Estimación de la alteración de la fertilidad del suelo, atribuible al cambio climático	60
5.3.4. Estimación del cambio en la productividad del frijol ante escenarios de cambio climático.....	64
5.4. Mapas de productividad del frijol de temporal y de riego bajo escenarios de cambio climático	66
5.5. Valoración integral de los resultados de estimación de cambio de productividad de frijol bajo riego y temporal	68
6. CONCLUSIONES	71
7. LITERATURA CITADA	72
8. ANEXOS	78

Índice de Cuadros

Página

Cuadro 1.	Valores promedio anuales de la temperatura del aire (T^{2000}), precipitación (Pr^{2000}), radiación global (Rg^{2000}) del índice climático (IHT^{2000}), para el inicio del siglo XXI en algunos municipios y Distrito de Riego de México con producción de frijol de temporal y riego.	51
Cuadro 2.	Cambio en la variable de temperatura (ΔT %) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal y de riego para algunos municipios y Distritos de Riego de México, para dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.	52
Cuadro 3.	Cambio en la variable de Precipitación (ΔPr %) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal y de riego para algunos municipios y Distritos de Riego de México, para dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.	54
Cuadro 4.	Cambios en el rendimiento máximo potencial ($\Delta Y_{m\acute{a}x}$ %) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal y de riego para algunos municipios y Distritos de Riego de México, para dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.	57
Cuadro 5.	Cambios en el índice de disponibilidad de agua (ΔK_{hidr} %) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal y de riego para algunos municipios y Distritos de Riego de México, para dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.	59
Cuadro 6.	Cambios en el índice de fertilidad (ΔF_a %) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal y de riego para algunos municipios y Distritos de Riego de México, para dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.	63

Cuadro 7.	Cambio en la productividad ($\Delta Y\%$) de frijol de temporal y de riego para algunos municipios y Distritos de Riego de México, para dos MCGs MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.....	64
Cuadro 8.	Intervalos de valores porcentuales de cambio en la productividad de frijol y trigo de temporal bajo condiciones de cambio climático global al final del siglo XXI	65
Cuadro 9.	Cambio en las componentes de la productividad ($\Delta Y_{máx}$, ΔK_{hidr} , ΔF_a y ΔY) del frijol de temporal y de riego de acuerdo a los escenarios de cambio climático B1 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 491 ppm a nivel del año 2050 en algunos municipios y Distritos de Riego de México.	68

Figura 1. Esquema metodológico general para la estimación de cambios en los rendimientos de frijol de temporal y riego bajo escenarios de cambio climático global (Modificado de Castillo, 2007). *Variables climáticas:* R_b = radiación de onda larga; T = temperatura media; R_n = radiación neta; R_g = radiación global; P_r = precipitación; IHT = índice climático; *Constantes:* λ -calor latente de vaporización del agua; α =albedo; *Propiedades del suelo* MO, P, K, pH -Propiedades biológica y químicas de los suelos; F -índice integral de fertilidad del suelos; *Características del cultivo:* IC = índice de cosecha; IAF = índice de área foliar; F_m = fotosíntesis máxima; n = duración del ciclo del cultivo; $C3, C4, CAM$ = Rutas fotosintéticas; *Modelos climáticos:* $GFDL-MC-2.0$ y $ECHAM5/MPI$; *Escenarios climáticos:* $A2, B1$ y $B2$; $-\Delta Y_i^j$ cambio porcentual en la productividad; $Y_{máx}^j$ -Rendimiento potencial; F_i^j =índice de fertilidad, K_{nitr}^j = Índice de disponibilidad de agua. $j=2000$ ó 2050 35

Figura 2. Dependencia esquemática del índice regional de fertilidad del suelo virgen (F_v) y suelo agrícola irrigado (F_r). ($F_{v,máx}^{2050}$ y $F_{r,máx}^{2000}$): valores máximos del índice de fertilidad de los suelos vírgenes e irrigados en las gráficas $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$ y $F_r^{2000}(IHT_r^{2000})$ respectivamente $F_{v,I}^{2000}$ y $F_{r,I}^{2000}$ son los valores del índice de fertilidad, correspondientes a los municipios con producción de temporal y a los Distritos de Riego con el número 1, respectivamente donde el valor del índice climático, es igual a $IHT_{v,I}^{2000}$ a finales del siglo XX. $F_{v,I}^{2050}$ y $F_{r,I}^{2050}$: Valores del índice de fertilidad para los mismos sitios a mediados del siglo XXI cuando el índice climático será igual a $IHT_{v,I}^{2050}$ 46

Figura 3. Distribución de las estaciones meteorológicas en Distritos de Riego y municipios con siembra de frijol bajo temporal y riego, para la evaluación del cambio de productividad del frijol bajo condiciones de cambio climático..... 50

Figura 4. Dependencia de los valores modales del índice integral de fertilidad F_v^{2000} del suelo temporal y F_r^{2000} del suelo irrigado en los terrenos con frijol en función del índice climático IHT_v^{2000} al inicio del siglo XXI. Las gráficas corresponden a los terrenos con pendientes menores a 3% y ubicados en diferentes zonas climáticas del país en altitudes de 5 a 2,450 m. 1 y 2 – los intervalos de confianza de variación del índice integral de fertilidad del suelo virgen e irrigado, respectivamente. 61

- Figura 5.** Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de temporal de acuerdo a los escenarios de cambio climático a) A2 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 536 ppm par el MCGs ECHAM5/MPI y b) B1 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 491 ppm par el MCGs GFDL-CM-2.0 en algunos municipios de México. 67
- Figura 6.** Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de riego de acuerdo a los escenarios de cambio climático a) A2 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 536 ppm par el MCGs ECHAM5/MPI y b) B1 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 491 ppm par el MCGs GFDL-CM-2.0, en algunos Distritos de Riego en México. 67

Índice de Anexos

	Página
Anexo A: Caracterización climática del escenario base (1951-1980).....	78
Anexo B: Valores y cambios de temperatura, precipitación y radiación neta durante la estación de crecimiento del cultivo de frijol, para escenarios de cambio climático en algunos municipios con producción de frijol bajo temporal en México	79
Anexo C: Valores fisiológicos del frijol, para el cálculo del rendimiento potencial máximo en municipios con producción bajo temporal para el escenario actual y para predicciones de cambio climático	85
Anexo D: Rendimiento máximo potencial ($Y_{máx}$) en municipios con producción de frijol bajo temporal, actual y para escenarios de cambio climático para un horizonte de evaluación al año 2050.....	88
Anexo E: Índice Climático (IHT) en municipios con producción de frijol bajo temporal, actual y para escenarios de cambio climático para un horizonte de evaluación al año 2050.....	89
Anexo F: Componentes de la productividad y productividad ($\Delta Y_{máx}$, ΔK_{hidr} ΔF_a y ΔY) en municipios con producción de frijol bajo temporal, actual y para escenarios de cambio climático para un horizonte de evaluación al año 2050	91
Anexo G: Evaluación Integral de la productividad y sus componentes del cultivo de frijol de temporal y de riego ante escenarios de cambio climático en un horizonte de evaluación al 2050.....	94
Anexo H: Mapas de productividad del frijol bajo riego ante escenarios de cambio climático en un horizonte de evaluación al 2050.....	97
Anexo G: Mapas de productividad del frijol bajo temporal ante escenarios de cambio climático en un horizonte de evaluación al 2050.....	103

1. INTRODUCCIÓN

Los más recientes descubrimientos científicos muestran cómo el cambio climático se está produciendo de forma mucho más acelerada de lo previsto por los expertos de las Naciones Unidas (ONU) en su Cuarto Informe de Evaluación sobre el cambio climático, de 2007, y cómo sus efectos están presentes ya en todo el mundo. México no es una excepción, su situación geográfica, condiciones climáticas, orográficas e hidrológicas, entre otros factores, contribuyen a que el país sea una de las zonas más vulnerables del mundo por el cambio climático (IPCC, 2007; BID, 2010; McSweeney, 2009; Conde *et al.*, 2008), ubicando a este fenómeno como un asunto de seguridad mundial.

La importancia del cambio climático se vio plasmada durante el presente sexenio en el Plan Nacional de Desarrollo (2007-2012) en el que se contempló, por primera vez, líneas de acción en materia de mitigación y adaptación al cambio climático. Los Programas Sectoriales de Energía, de Comunicaciones y Transportes, y de Desarrollo Social también incluyeron una descripción de acciones relacionadas con el cambio climático. De igual forma, el Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales dio lugar a la subsecuente elaboración de la Estrategia Nacional de Cambio Climático.

Se trata de un fenómeno tan complejo que sus causas e impactos están relacionadas con todos los ecosistemas y con diversos ámbitos de la actividad humana: los océanos y los ecosistemas marinos; los bosques y la rica biodiversidad que albergan; las formas en que producimos nuestros alimentos (agricultura y ganadería); el agua dulce; las formas de producir, distribuir y consumir la energía, por mencionar algunos, todos estos efectos ya han sido documentados (IPCC, 2007; Cline, 2007; Toledo, 1992, etc).

En la larga lista de daños potenciales del calentamiento del planeta, algunos autores como Cline (2007) argumentan que el sector principal con mayor riesgo en el mundo es la agricultura, a algunos otros científicos les causa preocupación que variables climáticas claves para el crecimiento de los cultivos (p. ej. precipitación, temperatura, concentración de CO_2 .) podrían ser severamente afectadas y así impactar la producción agrícola comprometiendo de paso la seguridad alimentaria en muchos países.

Las estimaciones cuantitativas del impacto del calentamiento del planeta sobre la agricultura está ampliamente documentada (Bhatti, *et al.*, 2006 y Newton, *et al.*, 2007; Parry, 1993; Hansen, 2005; O-Brian, *et al.*, 2000; Kaufmann y Snell, 1997; Chang, 2002; Lobell, *et al.*, 2005; Gay, *et al.*, 2006b; Conde, *et al.*, 2003; Gay, *et al.*, 2006; Ewert 2004; Akita y Moss, 1973; Lambrea, *et al.*, 2005; Sage, *et al.*, 1989; Peng, *et al.*, 2004; Frantz, *et al.*, 2004; Sánchez, *et al.*, 2000; Allen, *et al.*, 1987; Rosenzweig *et al.*, 1993). El análisis principal de estos trabajos, ha sido la vulnerabilidad de los rendimientos de cultivos agrícolas en función de la concentración de CO_2 y el cambio climático sin considerar el efecto de la alteración de la fertilidad natural del suelo. Altieri y Nicholls (2008), consideran que un impacto calificado como potencialmente significativo del cambio climático para la producción es la pérdida de materia orgánica del suelo debido al calentamiento de este, donde las temperaturas más altas del aire pueden acelerar la descomposición de materia orgánica, e incrementar las tasas en otros procesos del suelo que afecten su fertilidad.

Dentro de la gran diversidad de cultivos afectados se encuentra el frijol, cultivo que forma parte del consumo principal en nuestro país, lamentablemente a la fecha no se han hecho estudios de la vulnerabilidad de este cultivo ante el cambio climático, para América latina existen pocas investigaciones sobre vulnerabilidad de frijol, como el caso de Costa Rica donde se reportan disminuciones de hasta un 39% (Villalobos y Retana, 1999). Sin embargo, en estos trabajos no se ha incluido el aspecto de la alteración de la fertilidad del suelo atribuible al cambio climático.

Lo anterior justifica la importancia del estudio de vulnerabilidad de este cultivo a los escenarios existentes del cambio climático considerando no solamente el efecto directo del cambio del clima, sino el efecto indirecto relacionado con la alteración de la fertilidad del suelo. Para esto, es necesario desarrollar y aplicar la metodología basada en modelo de simulación de crecimiento del cultivo de frijol, considerando el modelo de la alteración potencial de la fertilidad de suelos agrícolas atribuible al cambio climático.

Periódicamente los escenarios climáticos se actualizan, en este trabajo obviamente se puede considerar solo los escenarios actuales, sin embargo, en el caso de que a futuro éstos escenarios

cambiaran significativamente, se espera que la metodología desarrollada en nuestro trabajo pueda aplicarse también para escenarios posteriores. En el desarrollo de tal modelo de simulación de la productividad agrícola, se puede considerar solamente el efecto del cambio climático y dejando fuera, la consideración los factores adicionales posiblemente no relacionados directamente con el cambio climático tales como: afectación de la productividad por las plagas y enfermedades, cambio posible en tiempo de la tecnología de manejo del cultivo, suelo y agua, cambio de las propiedades genéticas del cultivo.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo General

Desarrollar la metodología basada en el modelo de simulación de crecimiento del frijol bajo las condiciones de riego y temporal, para evaluar la vulnerabilidad de este cultivo en las principales regiones productoras de México ante escenarios actuales de cambio climático para la mitad del siglo XXI también el efecto indirecto de la alteración de la fertilidad de los suelos sobre la productividad agrícola

2.2. Objetivos Particulares

- Adoptar el modelo de desarrollo de los cultivos agrícolas en relación con las condiciones climáticas recomendado por la FAO-IIASA (2000) al cultivo de frijol.
- Considerar en este modelo el efecto indirecto de la alteración de la fertilidad de los suelos agrícolas sobre la productividad agrícola atribuible al cambio climático.
- Estimar la vulnerabilidad de la productividad del frijol bajo las condiciones de riego y temporal a los escenarios actuales de cambio climático, incorporando el factor de alteración de la fertilidad del suelo atribuible al mismo cambio climático.

2.3. Hipótesis

- El cambio climático global a mediados del siglo XXI provocará cambios significativos (aproximadamente mayores al 10%) de la productividad de frijol por lo menos en algunos sitios de referencia de México.
- Ignorar el factor de alteración de fertilidad del suelo atribuible al cambio climático puede causar errores en las predicciones de la productividad del cultivo de frijol hasta en 30% o más.
- El cambio climático tiene un mayor impacto negativo en la productividad del frijol bajo temporal que los suelos bajo riego, ya que el frijol es un cultivo muy sensible a disminuciones de precipitación o cambios en los elementos del clima y a la fecha los modelos utilizados para México han proyectado disminuciones en esta variable.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. El cambio climático global: Breve explicación del fenómeno

El fenómeno del cambio climático está claramente documentado (Keeling *et al.*, 1982; Vitousek, 1992; Gammon *et al.*, 1985; Allen *et al.*, 1987) y a la fecha el tema se ha convertido en uno de los más intensamente discutidos internacionalmente, incluyendo en los debates desde la evidencia científica del fenómeno, las formas de solucionarlo o mitigarlo así como los costos asociados a ello. De acuerdo con Handel y Risbey (1992), hasta ese año las investigaciones sobre el cambio de clima se habían referido, por lo menos aquellas que se encontraban justificadas en escritos, casi exclusivamente en la predicción del cambio climático futuro debido a la actividad humana y sus repercusiones

Bajo este contexto los conceptos de “calentamiento global” y “cambio climático” están estrechamente interrelacionados, tanto así que en ocasiones son utilizados como sinónimos, prestándose a confusiones. Por una parte y retomando algunos conceptos de González, *et al.*, (2003) y Staines (2008), el calentamiento global se refiere al aumento progresivo y gradual de la temperatura media de la superficie terrestre, responsable de los cambios en los patrones climáticos mundiales (Aunque en el pasado geológico de la Tierra se ha presentado un aumento de temperatura global como resultado de influencias naturales), este término se utiliza para referirse al calentamiento de la superficie terrestre, registrado desde principios del siglo XX y relacionado con el incremento en la concentración de los gases de efecto invernadero (GEIs) en la atmósfera.

Se habla de cambio climático al referirse a la variabilidad observada respecto al clima promedio en escalas de tiempo que van de unas cuantas décadas hasta millones de años. Por eso, el utilizar el término “cambio climático” en referencia exclusiva a los cambios ocurridos muy recientemente en la historia del planeta puede confundir, pues nuevamente el pasado geológico demuestra que el clima constantemente ha cambiado y desde antes de que los seres humanos hicieran su aparición. Por lo tanto, las variaciones climáticas pueden ser producidas naturalmente por fenómenos internos del sistema Tierra-Atmósfera, pueden ser causadas por forzamientos externos (variaciones en la órbita terrestre y cambios en la radiación solar), y sólo recientemente

la actividad humana se ha convertido en otra de las fuerzas modificadoras del clima (Conde, 2007; Staines, 2008). Entonces, la interrelación de ambos conceptos resulta la siguiente: el cambio climático es provocado por el calentamiento global el cual, a su vez, es influenciado por el aumento de GEIs en la atmósfera. Dicho cambio en el clima incide en los patrones de temperatura y precipitación del planeta, así como en la frecuencia y severidad de eventos extremos como huracanes y sequías.

La preocupación mundial acerca de los efectos del clima sobre el desarrollo económico inició una fase nueva en 1988, en Canadá, con la Conferencia de Toronto sobre Cambio en la Atmósfera: Implicaciones para la Seguridad Global. Ese mismo año, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) decidieron establecer el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). (CICC, 2006)

El grupo de investigación del IPCC tiene como función evaluar la información científica disponible sobre el tema, valorar los impactos ambientales y socioeconómicos del cambio climático y formular estrategias de respuesta. Con el objetivo de proveer una opinión científica, autorizada e internacional, este grupo, produce informes de evaluación de manera periódica, sobre las causas, impactos y posibles estrategias de respuesta ante el cambio climático. También prepara informes especiales sobre temas concretos y documentos técnicos a petición de la CMNUCC. Por último, el IPCC lleva a cabo también las tareas de elaborar metodologías y prácticas relacionadas con los inventarios nacionales de GEIs. (Martínez, *et al.*, 2004)

3.1.1. Impactos del cambio climático en la agricultura mundial

Durante el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (2007) establece que “el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como es evidente de las observaciones de las temperaturas globales promedio de la atmósfera y los océanos, del derretimiento de la nieve y hielo generalizado y del aumento global del nivel medio del mar”.

Una de las afirmaciones más interesantes del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC es que “la mayor parte del calentamiento global observado durante el siglo XX se debe muy

probablemente (90% de confianza) al aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero causado por las sociedades humanas”.

La información sobre el tema permite visualizar numerosos impactos relacionados con todos los ecosistemas y con diversos ámbitos de la actividad y el bienestar del hombre. Un sector que particularmente puede ser de los más afectados por su alta dependencia del clima es el agrícola y en consecuencia es prioritario prestar atención sobre los impactos que el calentamiento global podría generar sobre él. El IPCC, (2009) indicó que los incrementos en temperatura, las sequía, inundaciones, desertificación y climas extremos pueden afectar severamente a la agricultura.

Con respecto a la agricultura, en el informe el IPCC (2007b) se indican los siguientes impactos:

- Se proyecta un ligero incremento en la productividad de los cultivos en las latitudes medias y altas, para incrementos promedios regionales de temperatura entre 1 y 3°C, dependiendo del tipo de cultivo. Para temperaturas mayores, habrá reducciones en algunas regiones.
- En las latitudes menores, especialmente en regiones tropicales y con sequía estacional, se proyecta una reducción en la productividad de los cultivos, incluso para pequeños incrementos en temperatura media (1 a 2 °C), lo cual aumentará el riesgo de hambruna.
- Globalmente, a partir de los incrementos en las temperaturas medias regionales de entre 1 °C y 3 °C, se proyecta un incremento en el potencial para la producción agrícola, pero éste se reduce para incrementos mayores.

Se proyecta que el incremento en la frecuencia de las sequías e inundaciones afectará la producción local negativamente, especialmente en sectores de subsistencia en países en latitudes bajas. Considerando estas diferencias regionales, una de las mayores preocupaciones se refiere a las implicaciones que tiene el cambio climático sobre las metas de desarrollo del milenio, especialmente en lo que se refiere a la reducción del hambre. Rodríguez (2007) comenta un estudio realizado por Bosello y Zhang (2005), con estimaciones al año 2050, quienes apuntan a una influencia limitada del cambio climático sobre la oferta mundial de alimentos y el bienestar. Sin embargo, subraya que habrá consecuencias distributivas importantes y que los impactos negativos más significativos se concentrarán en países en desarrollo ubicados en zonas tropicales

y subtropicales. Precisamente son países que enfrentan los mayores problemas de pobreza y hambre, los cuales también son identificados como los más vulnerables al cambio climático según los informes recientes del IPCC.

Si bien todos los países sufrirán las consecuencias de los cambios climatológicos, como ya se ha mencionado, los más afectados serán los más pobres pese a que son los que menos han contribuido a las causas del cambio. Sobre los países en vías de desarrollo se estima que la pérdida integral provocado por la variación del clima en todos los sectores socioeconómicos sea aproximadamente entre el 75% y el 80% (Banco Mundial, 2009). Adams y otros (1988) destacan entre los efectos principales sobre la agricultura serán: la modificación en los cultivos debido a un incremento atmosférico en la concentración de CO_2 ; mayor probabilidad de un incremento en la población de plagas a partir del calentamiento global; y, ajustes en las demandas y ofertas de agua para irrigación. Como resultado se espera que la productividad de algunos cultivos importantes disminuya.

En conjunto, lo anterior tendría efectos adversos para la seguridad alimentaria. En América Latina muchos países son altamente dependientes de la agricultura por lo que están expuestos a padecer en gran medida los efectos del calentamiento global. Para la región latina se ha encontrado que si no se tomaran en cuenta los efectos de CO_2 , la reducción en la producción de granos podría ser más del 30% (Parry *et al.*, 2004). Centroamérica es una región altamente vulnerable a los fenómenos climáticos y meteorológicos dada su extensión y ubicación geográfica. Sobre esta región los efectos del cambio climático han sido visibles, las sequías y los huracanes que se han presentado en esta región han traído importantes costos económicos y sociales

Existen varios estudios de la magnitud de los impactos, Cline (2007) menciona que los daños promedios podrían ser los siguientes: en África (17%), Latinoamérica (13%) y el Sur de Asia (30% en la India y 20% en Pakistan). Las pérdidas podrían incrementarse si los beneficios de la fertilización de carbono no llegan a realizarse.

3.1.1.1. Respuesta de algunos cultivos a los cambios climáticos

Dirks y Bolton (1981) y Wilson *et al.*, (1995) señalaron que, aunque el crecimiento de un cultivo es afectado por un grupo complejo de factores ambientales, los de mayor impacto son: la radiación fotosintéticamente efectiva, temperatura estacional, concentración de CO_2 y la precipitación pluvial. De estos tres factores, el agua puede considerarse el primero en importancia y es el más determinante para la producción agrícola. Una evidencia de esto es la relación lineal entre el suministro de agua y el rendimiento de los cultivos (Carreker *et al.*, 1972; Garlipp, 1976; Liang *et al.*, 1991; Fuenzalida *et al.*, 1993). Por otra parte, la temperatura medida como unidades calor o grados días (Snyder, 1985) o tiempo termal (Bollero *et al.*, 1996), también ha mostrado una relación alta con el rendimiento, por ejemplo, en maíz (Muchow *et al.*, 1990; Fuenzalida *et al.*, 1993) ya se ha utilizado como base para la clasificación del desarrollo y madurez de los cultivos (Gilmore y Rogers, 1958; Undersander y Christiansen, 1986). Asimismo, Escalante (1999) señaló que la radiación solar acumulada durante el desarrollo del cultivo también es determinante para la producción de biomasa en girasol.

La respuesta de los cultivos agrícolas a la acumulación de CO_2 en la atmósfera por lo general es variable. Este gas provoca que los estomas de las plantas se estrechen, por lo que se reducen las pérdidas de agua y mejora el rendimiento en el uso de agua.

De acuerdo con (IPCC, 2007; FAO, 2008), el aumento de las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera estimular la fotosíntesis y tendrá un efecto fertilizante en numerosos cultivos. Varios experimentos de campo y simulaciones han mostrado un probable efecto fisiológico benéfico (FAO, 2003, Bhatti, *et al.*, 2006 y Newton, *et al.*, 2007).

Parry, (1993). Reporta que en cultivos con ruta fotosintética C3, (*p.e.* trigo y arroz), que requieren mayores concentraciones de CO_2 para iniciar la síntesis de materia orgánica, se puede esperar una respuesta positiva promedio de 30% en caso de duplicación de CO_2 en la atmósfera. Mientras que para cultivos con mecanismo fotosintético C4, (maíz y caña de azúcar), que actualmente son los más eficientes en la fijación del CO_2 , se estima un efecto positivo promedio de 5%.

Aunque parezca increíble la proyección del impacto del cambio climático sobre el impacto en rendimientos agrícolas no tiene el uso generalizado que debería tener, dadas las ventajas que representa para los productores y las organizaciones relacionadas con la producción, recolección, almacenamiento y distribución de alimentos. Un paso importante en el desarrollo de estas técnicas se está dando ahora utilizando los modelos de clima global acoplados con modelos de cultivo (Hansen, 2005; Betts, 2005; Challinor *et al.*, 2005).

Se prevén mayores aumentos de temperaturas en latitudes templadas. En éstas, el calentamiento global puede aportar beneficios para la agricultura y las superficies adecuadas para cultivo aumentarán, la duración del período de cultivo aumentará, los rendimientos de los cultivos mejorarán. Sin embargo, estas ganancias pueden verse reducidas por la pérdida de algo de tierra fértil por inundación, especialmente en las llanuras costeras.

El aumento de la temperatura también hará que aumente la gama de insectos dañinos para la agricultura e incrementará la capacidad de supervivencia de las plagas durante el invierno, que atacarán los cultivos de primavera. Unas temperaturas globales más altas también harán que aumente la lluvia. Sin embargo, las precipitaciones no se distribuirán de la misma manera entre las distintas regiones.

En las primeras décadas del siglo XXI se considera un calentamiento moderado de 1-2°C, dando por resultado una reducción estacional en las cosechas de los cultivos en regiones secas y tropicales, mientras que las producciones de la cosecha y del pasto en regiones templadas pueden beneficiarse. Sin embargo, el calentamiento en la segunda mitad del siglo podría afectar negativamente a todas las regiones, aunque sería la agricultura de muchos países en vías de desarrollo en regiones las regiones áridas y semiáridas, tropicales y semi-tropicales las que resultarían más afectadas. (FAO, 2008).

Lo anterior, se origina por el papel crucial que juega el agua en la producción regional y mundial de alimentos. Por una parte, más de un 80% de las tierras agrícolas del mundo depende de la lluvia; en esas regiones, la productividad de los cultivos depende únicamente de una

precipitación suficiente para satisfacer la demanda evaporativa y la consiguiente distribución de humedad del suelo (FAO, 2000).

Por otra parte, la producción mundial de alimentos depende del agua, no sólo en forma de precipitación, sino también, fundamentalmente, en forma de recursos hídricos disponibles para el riego. De hecho, las tierras de regadío, que representan sólo un 18% de las tierras agrícolas mundiales, producen 1.000 millones de toneladas de cereales al año, que representan aproximadamente la mitad del suministro mundial total; ello se debe a que los cultivos de regadío producen, en promedio, entre 2 y 3 veces más que los cultivos dependientes de la lluvia (FAO, 2002).

El efecto global sobre la producción de alimentos en 2030 se prevee relativamente pequeño: por ejemplo, los rendimientos de cereales tendrían una disminución aproximadamente del 0.5% a nivel del 2020 y hasta 5% a nivel del 2050. Considerando que las condiciones climáticas en el mundo y los cambios esperados del clima son muy diferentes en diferentes partes, obviamente que el cambio esperado de la productividad agrícola, debe ser muy diferente. Por ejemplo, según los pronósticos hechos para México, se espera que la productividad de maíz y trigo puede cambiar dentro del intervalo $\pm 24\%$ bajo las condiciones de temporal y $\pm 80\%$ bajo riego (Castillo *et al.*, 2007; Herrera, 2008). Además en estos trabajos se ha concluido que es muy importante considerar el factor de alteración de fertilidad del suelo en modelos de estimación de vulnerabilidad de estos cultivos al cambio climático. Al ignorar este factor se puede provocar en el cálculo de los rendimientos hasta un 80%.

Es importante señalar que estos cambios sólo son los que pueden resultar del calentamiento global *en ausencia de cualquier otro factor*. En la práctica, es probable que los cambios de la tecnología reduzcan o compensen sobradamente los efectos del cambio climático. (FAO, 2002).

3.1.1.2. Procesos fisiológicos y fenológicos modelados

Los estudios relacionados con pronósticos de cambios en los rendimientos para diferentes escenarios del cambio climático global se han realizado basándose en dos enfoques metodológicos principales:

- Correlaciones estadísticas entre rendimientos de cultivos y variables climáticas, sociales y económicas (O-Brian, *et al.*, 2000; Kaufmann y Snell, 1997; Chang, 2002; Lobell, *et al.*, 2005; Gay, *et al.*, 2006b); y
- Modelos mecanísticos que han sido usados en estudios agronómicos con el propósito de entender los procesos originados por las interacciones complejas que se establecen entre los cultivos agrícolas y el ambiente. Entre los modelos más populares, se encuentran los integrados en el sistema DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) que incluyen a CERES-MAIZE y CERES-WHEAT (Conde, *et al.*, 2003; Lobell, *et al.*, 2005)

Respecto a los modelos mecanísticos, también se han utilizado como herramientas para predecir el rendimiento económico de los cultivos agrícolas. Actualmente, existen modelos para diferentes cultivos y con diversos objetivos tales como predecir eventos meteorológicos, incidencia de plagas, y para optimizar sistemas agrícolas. Por ejemplo, en la página web: http://www.wiz.uni-kassel.de/model_db/models.html se muestra una lista descriptiva de modelos con aplicaciones en agricultura. Estos modelos, presentan diferencias entre ellos en cuanto al nivel de complejidad de su estructura, estrategia de programación, número de variables independientes y dependientes y el objetivo de su creación. Para obtener confiabilidad en los resultados no sólo se requiere tener buena calidad de datos pero también se deben considerar las causas que aumentan el error en la predicción de las variables respuesta.

Los estudios de vulnerabilidad basados en correlaciones estadísticas son realizados por varios autores en varias partes del mundo y con diferentes cultivos. Kaufmann y Snell (1997) propusieron una metodología para estimar el rendimiento de maíz en los Estados Unidos integrando variables climáticas con algunas variables de tipo social. Chang (2002) también estimó el impacto potencial del cambio climático en 59 cultivos en 15 regiones de Taiwan utilizando modelos econométricos para el conjunto de datos integrado por variables climáticas y económicas. Otros estudios sobre adaptación agrícola han utilizado también factores climáticos y no climáticos (O-Brian, *et al.*, 2000).

Las evaluaciones de vulnerabilidad de cultivos en México se han realizado para el maíz, café y trigo; el estudio del caso del café (Veracruz), tuvo un enfoque estadístico y se encontró que para el 2020 la producción de café podría reducirse hasta 43% y dejar de ser económicamente viable para los productores (Gay, *et al.*, 2006b).

El enfoque de evaluación de la vulnerabilidad por medio de modelos mecanísticos suele tener bases en el modelado de la fisiología del cultivo. Este enfoque se ha utilizado mucho a nivel mundial y probablemente se prefiere para el modelado del efecto del cambio climático en la productividad de los cultivos, considerando que el enfoque del impacto del cambio en el clima se centra principalmente en las alteraciones de temperatura, precipitación e incremento de GEI, es necesario conocer a niveles fisiológicos de las plantas como afectan estos cambios.

Ewert (2004) demuestra la importancia relativa del *IAF* para la asimilación y el crecimiento de la biomasa bajo condiciones de incremento de CO_2 y de la necesidad de la representación satisfactoria del índice en modelos de la productividad, dicho autor concluye que el progreso en el cálculo de la productividad futura bajo condiciones de incremento de CO_2 es poco probable de alcanzar si no se mejora el modelado del *IAF*, particularmente para los tipos de vegetación con una gran variabilidad en índice, tal como los cultivos agrícolas.

El modelo de simulación CERES - WHEAT, forma parte de este tipo de modelos mecanísticos, y permitió concluir que el incremento en el rendimiento del 25%, para el trigo en los estados del noroeste, se debe principalmente a la naturaleza de las tendencias climáticas en esta zona. En realidad, el impacto positivo de la reciente disminución de la temperatura nocturna en los Valles del Yaqui y Mayo puede explicar el $85\pm 27\%$ del incremento en el rendimiento (Lobell, *et al.*, 2005). Gay (2003). También reporto el uso del modelo CERES-MAIZE para estimar la vulnerabilidad del maíz de temporal de México

De manera general se observa que el impacto proyectado del calentamiento global sobre los cultivos ha sido evaluado por métodos indirectos usando simulaciones de modelos. Peng, *et al.*, 2004, realizaron un estudio directo dirigidos a la observación de los efectos del cambio de clima sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo de arroz. En dicho estudio se observó que en el

periodo del 1992 al 2003 la media en temperatura máxima y mínima fueron de 0.35°C y 1.13°C, respectivamente, lo que provocó que la producción de grano declinara 10% por cada 1°C incrementado en la temperatura mínima durante la estación de crecimiento mientras que la el efecto de la temperatura máximo sobre el rendimiento del cultivo fue insignificante.

3.1.1.3. La modelación de la fertilidad del suelo

Uno de los principales recursos naturales es el suelo, el cual forma parte fundamental de todo el ciclo de la vida y junto con el clima son los principales insumos para producción agropecuaria. De acuerdo con varios autores, entre ellos Buol, *et al.*, (1989), sus principales características físicas y biológicas de este recurso están en función del clima, topografía, geología, material parental, profundidad del nivel freático, así como del tiempo de formación.

El suelo mediante sus interacciones con la atmósfera, biosfera e hidrósfera funciona como fuente, filtro y trampa de materiales y energía, y a su vez resulta como regulador de tales intercambios, los cuales quedan registrados en sus propiedades. Estas interacciones provocan cambios que pueden ser lentos ó rápidos (años, décadas y/o siglos) y conllevan en los diferentes ecosistemas a etapas de evolución y desarrollo de los suelos que resultan en los llamados procesos de formación del suelo (Hernández, *et al.*, 2006).

Actualmente han surgido diferentes criterios para enfocar los estudios sobre los Cambios globales en los suelo y por ende los cambios sobre la fertilidad. De acuerdo con Ingram (1996) los cambios del suelo debidos al cambio climático son: a) los cambios que se originan en las propiedades de los suelos, y b) cambios en los suelos que tienen lugar en sus propiedades por influencia del aumento de la concentración de gases de invernadero.

A pesar de la preocupación creciente acerca de la degradación del suelo, de la disminución en su calidad y de su impacto en el bienestar de la humanidad y el ambiente, aún no hay criterios universales para evaluar los cambios en la calidad del suelo (Arshad y Coen, 1992). Para lo anterior, es necesario retomar la analogía de Doran y Parkin (1994) quienes mencionan que La calidad y la salud del suelo son conceptos equivalentes, no siempre considerados sinónimos. La calidad del suelo, ha sido percibida de muchas formas desde que este concepto se popularizó en

la década anterior (Karlen *et al.*, 1997). Este concepto ha sido relacionado con la capacidad del suelo para funcionar. Incluye atributos como productividad potencial, sostenibilidad, calidad ambiental y fertilidad.

A la fecha se han realizado varios esfuerzos para el estudio enfocado a la alteración del suelo por el cambio climático, sin embargo, no se ha definido a los indicadores apropiados para evaluar la calidad de los suelos a escala regional, lo anterior requiere que se identifique aquellos indicadores que presentan variaciones significativas con el cambio de uso del suelo y los atributos dentro de estos factores que pueden utilizarse a esta escala regional (Arshad y Coen, 1992).

Doran y Parkin (1994), proponen un listado de condiciones para que las propiedades físicas, químicas y biológicas sean utilizadas como indicadores de la calidad del suelo. Entre estas condiciones se mencionan las siguientes: Que describan los procesos del ecosistema, Integren propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, reflejen los atributos de sostenibilidad que se quieren medir; sean sensitivas a variaciones de clima y manejo; así como a los cambios en el suelo que ocurren como resultado de la degradación antropogénica. Otra condición importante es su accesibilidad a los usuarios y aplicación a condiciones de campo.

Por otra parte, las investigaciones relacionadas con los cambios globales de los suelos, se han desarrollado enfocando el estudio de la fertilidad de los suelos bajo el entendimiento de ciertos procesos clave en el ciclo de los nutrientes. Lo anterior, ha permitido considerar el desarrollo de la evidencia experimental de la respuesta a los cambios climáticos simulados, e inclusive, analizar desde el punto de vista teórico su afectación, directa ó indirectamente, por las elevadas concentraciones de CO_2 y temperaturas, así como por las alteraciones en las precipitaciones.

Arnold, *et al.* (1990), menciona que las principales propiedades responsables de la fertilidad del suelo (contenido de elementos nutritivos, materia orgánica, pH , etc.) llegan al equilibrio con las nuevas condiciones de formación del suelo durante varios años ó decenas de años. De acuerdo con Castillo, *et al.* (2007), esto significa que si se consideran cambios climáticos relativamente lentos y realizados durante un siglo, entonces se puede suponer que al final del

siglo XXI los suelos vírgenes y agrícolas de temporal van a llegar a un nuevo equilibrio con las nuevas condiciones climáticas.

A pesar del empeño y grandes avances en el estudio de la fertilidad de los suelos bajo condiciones de cambio climático global, no ha sido posible ir más allá de los estudios de los efectos del cambio climático global sobre el ciclo del nitrógeno. Esto es desafortunado debido a que otros elementos, frecuentemente limitan ó co-limitan la producción de plantas, por ejemplo, fósforo y potasio (Bhatti, *et al.*, 2006; Newton, *et al.*, 2007). Los efectos indirectos del aumento en la concentración de CO_2 , junto con el aumento de las temperaturas, vía alteración del balance de agua en los agroecosistemas, pueden ser más importantes que el impacto directo de estos cambios sobre los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes en los agroecosistemas (Newton, *et al.*, 2007). Por lo tanto, la materia orgánica del suelo, debida a un enriquecimiento de la atmósfera con CO_2 puede ser no significativa.

Lo antes mencionado confirma la conveniencia de utilizar el enfoque propuesto en esta investigación basado en la *ley geográfica de zonificación de los recursos naturales*, que consiste en estimar los cambios en la fertilidad de los suelos (caracterizada por un índice integral de fertilidad) debidos al cambio climático global en función únicamente del índice hidrotérmico local, para definir en forma coherente con un enfoque regional las probables alteraciones de la fertilidad de los suelos debidas al cambio climático global en México.

Durante los últimos años en el Colegio de Postgraduados se ha desarrollado el método del *IHT* para pronosticar la alteración de la fertilidad del suelo por el cambio de las condiciones microclimáticas de su formación, el que posiblemente se puede emplear para nuestros objetivos relacionados con el cambio climático global. El método del *IHT* para pronosticar cambio del suelo por el cambio de las condiciones microclimáticas se basa en los conceptos de la ley geográfica de zonificación de suelos y otros recursos naturales (Dokuchaev, 1898; Grigoriev, 1954; Buol *et al.*, 1989) y la teoría de formación de suelos en función de la energía solar y la precipitación (Budyko, 1974; Volobuyev, 1974).

Este método fue utilizado para estimar la alteración de algunas propiedades de los suelos agrícolas de México causada por la modificación de las condiciones microclimáticas debido al cambio de tipo de uso de los terrenos, manejo de suelo y agua. Las propiedades de los suelos de interés están disponibles en las bases de datos existentes y son las siguientes:

- cantidad de materia orgánica, potasio y fósforo (formas disponibles para la vegetación), calcio, magnesio, sodio, arcilla, arena, limo
- pH
- capacidad de intercambio catiónico
- saturación de bases

Según Volobuyev (1974), quien es autor principal del método del *IHT*, algunas propiedades de los suelos vírgenes (p.ej. algunas propiedades físicas y químicas) en áreas grandes, aproximadamente con tamaño por lo menos de 10 km², geomorfológicamente similares, dependen del "índice climático", *IHT*, que es una característica climática integral muy importante para analizar la influencia del régimen hidrotérmico sobre los procesos de formación de los suelos, el cual se en la forma siguiente:

$$IHT = Rn / [\lambda(Pr - S)] \quad (3.1)$$

ó frecuentemente

$$IHT = Rn / [\lambda Pr] \quad (3.2)$$

donde *IHT* = el "índice hidrotérmico local", adimensional, que es una característica climática integral muy importante para analizar la influencia sobre los procesos de formación de los suelos; *Rn* = la radiación solar neta en la superficie del suelo (Kcal/cm²/año ó KJ/cm²/año ó W/m²); λ = calor latente de evaporación, aproximadamente igual a 0.006 Kcal/cm²/mm, si *Rn* se mide en Kcal/cm²/año y *Pr* en mm/año o $\lambda = 2.512 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$, si *Rn* se mide en MJ·m⁻²·año⁻¹ y *Pr* y *S* en mm/año.

El valor de *Pr* (o más exacto *Pr - S*) corresponde a la cantidad de agua que anualmente recibe el suelo y que utiliza para su formación: en las actividades microbiológicas y absorción radical,

transporte de sustancias químicas, biológicas y físicas, intercambios catiónicos y aniónicos, etc. Una fracción de la radiación neta también se utiliza en los procesos biológicos, químicos y físicos de formación del suelo.

Según Volobuyev (1974) la cantidad de la energía solar Q_s la cual anualmente se utiliza en los procesos de formación del suelo virgen (no usado en la agricultura) es:

$$Q_s = Rn e^{-0.47 IHT} \quad (3.3)$$

Volobuyev (1974) descubrió que a nivel mundial los principales tipos de suelos vírgenes están distribuidos de acuerdo a la distribución de los valores de IHT .

Dentro de la República Mexicana el valor de Rn varía de 120-140 Kcal/cm²/año en las zonas tropicales del país y alturas menores de 500 msnm hasta 40-80 Kcal/cm²/año en las zonas áridas del norte y alturas superiores de 2000 msnm (Contreras, 2000; Contreras, *et al.*, 2002). El IHT en México varía de 0.3-1.0 en las zonas tropicales húmedas hasta más que 10 en las zonas áridas.

Asignado los subíndices 0, 1 y 2 a las condiciones vírgenes, agrícolas de temporal y bajo riego, respectivamente, escribimos los índices IHT en tal forma:

$$IHT_0 = \frac{Rn_0}{\lambda Pr_0} \quad (3.4)$$

$$IHT_1 = \frac{Rn_1}{\lambda Pr_1} \quad (3.5)$$

Aquí los subíndices 0 y 1 corresponden a las condiciones vírgenes y agrícolas de temporal, respectivamente.

La aplicación de riego con una lámina anual Lr incrementa la cantidad de agua infiltrada anualmente al suelo de Pr hasta $Pr+Lr$. Entonces, el índice IHT se modifica hasta:

$$IHT_2 = \frac{Rn_2}{\lambda(Pr_2 + Lr)} \quad (3-6)$$

Los valores de Rn y Pr con subíndices 0, 1 y 2 corresponden a la radiación neta y precipitación en los terrenos vírgenes y agrícolas de temporal y bajo riego, respectivamente. Frecuentemente $Pr_0 = Pr_1 = Pr_2$. Los valores de la radiación neta Rn_0 y Rn_1 en los terrenos vírgenes y agrícolas de temporal dependen de albedo de la vegetación natural y agrícola, respectivamente. En los terrenos irrigados los valores Rn_2 además dependen del régimen de riegos y en caso de los mismos cultivos agrícolas pueden ser mayores de Rn_1 en 1.1 veces.

Calculando los índices IHT_0 , IHT_1 o IHT_2 y usando las gráficas de la relación entre el IHT_0 y las propiedades de los suelos vírgenes evaluaron los cambios indirectos paulatinos de los suelos al ser sometidos al uso agrícola. Sus resultados indican que estas modificaciones del régimen hidrotérmico de los terrenos agrícolas pueden implicar un mejoramiento o un empeoramiento de la calidad (fertilidad) de los suelos.

Los resultados de Nikolskii *et al.*, (2001) y Contreras *et al.* (2002) muestran que valores de IHT_0 en el intervalo (1.2 a 1.6) corresponden en México a los suelos más fértiles con vegetación natural. Así, la práctica agrícola debe intentar mantener el índice IHT_1 o IHT_2 en este intervalo; ya sea a través del manejo de la radiación neta o/y cantidad de agua infiltrada anualmente al suelo. De esta manera se puede propiciar el mejoramiento o conservación del suelo, en favor de una agricultura sustentable. Las gráficas de Propiedad del suelo vs. IHT obtenidas en México confirman las relaciones similares establecidas para los suelos de la Ex-URSS (Aydarov, 1985). La anterior, por un lado expresa en forma cuantitativa la ley geográfica de zonificación del suelo, y por otro lado, podría señalar que tales gráficas son universales para grupos de terrenos geomorfológicamente homogéneos.

La comparación de distribución de los datos puntuales (correspondientes a los pozos edafológicos) de las 12 propiedades mencionadas del suelo virgen y agrícola de temporal en México no permitió diferenciar los valores modales de cada propiedad, típicas para las regiones con los mismos índices hidrotérmicos (Nikolskii *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002; Cruz, 2005).

Esto se explica posiblemente por razón del uso extensivo de los terrenos de temporal en México con relativamente baja productividad agrícola. Entonces, se supone que las gráficas Propiedad del suelo – *IHT* para los suelos mexicanos se pueden utilizar directamente para pronosticar cambio de fertilidad del suelo agrícola debido al cambio climático durante el siglo XXI en México. Considerando que actualmente existe información edáfica y sobre uso agrícola más completa (con cobertura nacional de 80%), se puede actualizar las gráficas Propiedad del suelo – *IHT* existentes y utilizarlas para predecir la alteración de los suelos agrícolas de temporal de México (cambios en las propiedades regionales de los suelos) bajo diferentes escenarios de cambio climático, si se conoce el valor del índice hidrotérmico local al inicio y final del siglo XXI bajo condiciones de cambio climático global en sitios geográficos seleccionados con condiciones geomorfológicas similares de formación del suelo.

3.2. Modelos y escenarios de cambio climático del IPCC y los generados para México

Históricamente la UNAM ha realizado diferentes estudios sobre cambio climático haciendo uso de diversos Modelos de Circulación General (MCGs), los cuales ha considerado representativos (Magaña *et al.*, 1997; Gay, 2003; Conde *et al.*, 1998; Conde *et al.*, 2004; Gay, 2003, Gay, 2006b). En estas publicaciones uno de los modelos utilizados ha sido el GFDL, por la representatividad climática para la zona de México.

El IPCC, en su Cuarto Informe de Evaluación (AR4, por sus siglas en inglés), 2007, considera varios MCGs para calcular una medida de la dispersión entre predicciones (denominada incertidumbre) que permita estimar el rango de los aumentos de temperatura o de cambios en la precipitación. De esa forma, el IPCC ha presentado escenarios, en términos de probabilidades, con base en ensambles¹ de diversos MCGs; los cuales requieren regionalizarse para mejorar la evaluación de impactos a escala local.

Recientemente en un estudio se generaron escenarios regionales de cambio climático para México, con resolución espacial de 50 km x 50 km y datos mensuales en el periodo 2010-2099,

¹ Ensamble. Simulaciones de un grupo de modelos en paralelo para predicciones del clima. La variación de los resultados entre los miembros del ensamble da una estimación de la incertidumbre.

para algunos escenarios de emisiones GEI,² a partir de la reducción de escala de los resultados de los MCGs utilizados en el AR4. En dicha regionalización se aplicó un método estadístico, mediante la Herramienta de Predicibilidad del Clima (CPT, por sus siglas en inglés) del Instituto Internacional para la Investigación del Clima y la Sociedad (IRI, por sus siglas en inglés), de Estados Unidos. La disponibilidad de más de 20 MCGs usados por el IPCC (2007), con una o más realizaciones cada uno, y con la aplicación del método estadístico, permite que se tengan entre 50 y 90 experimentos¹⁰ de regionalización de escenarios de cambio climático para México, considerando los diferentes escenarios de emisiones de GEI, con lo cual se ha podido estimar el rango de cambios en temperatura y precipitación, de la misma forma como lo presentó el AR4 (INE 2007a).

En el mismo estudio se encontró que los escenarios obtenidos para México son comparables en magnitud con el modelo regional de clima, “Simulador de la Tierra” de Japón, con resolución de 22 km x 22 km; y en estructura espacial con el sistema "Providing Regional Climates for Impacts Studies (PRECIS)" del Reino Unido, con resolución de 50 km x 50 km. A partir de los escenarios regionalizados de cambio climático (temperatura y precipitación) se integraron las predicciones considerando períodos de 30 años, con lo cual se obtuvieron tres climatologías, la de los: a) 2020s (representa el periodo 2010-2039); b) 2050s (representa el periodo 2040-2069), y c) 2080s (representa el periodo 2070-2099).

En México grupos de investigación del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM y del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, trabajan en la generación de escenarios de cambio climático a escala regional con modelos dinámicos y estadísticos bajo diversos criterios y metodologías, lo que ha permitido analizar el impacto de cambios en el clima en regiones, sectores y grupos sociales bajo diversas predicciones deterministas y en términos de probabilidades (INE 2008a; INE 2007a y b).

² Los escenarios de emisiones de GEI, comúnmente denominados SRES, por sus siglas en inglés, son predicciones de las concentraciones globales de GEI en la atmósfera y el forzamiento radiactivo correspondiente. Consideran una gama de posibles condiciones del desarrollo global para los próximos 100 años y son, en un sentido más amplio, escenarios del estado y crecimiento de la población y la economía.

3.2.1. Escenarios de temperatura

La magnitud de los incrementos esperados en temperatura aumenta entre más lejano sea el plazo, además entre escenarios de emisiones de GEI, cuanto más emisiones considera el escenario mayor es el incremento de la temperatura. Como ejemplo, más adelante se muestran las tendencias descritas en la cuarta para el escenario A2, ya que en éste se tendrían los mayores incrementos, quizá solo superados por los correspondientes al escenario A1FI, y se ajusta con los valores observados de temperatura.

Los cambios para la temperatura varían entre las climatologías 2020s, 2050s y 2080s antes mencionadas; a continuación se describen para el país, bajo el escenario A2:

Para la climatología de los 2020s, el cambio en temperatura media en México puede variar de $0.5\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en la parte sur, a $1.3\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ en la zona noroeste, donde la incertidumbre refleja la dispersión entre experimentos de regionalización.

- Para la climatología de los 2050s, se proyecta un aumento de entre $1.3\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ en el sur y $2.3\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ en el norte.
- Para la climatología 2080s, el aumento de temperatura se ubica entre $2.5\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ en el sur y $3.5\pm 1.3^{\circ}\text{C}$ en el norte del país.
- Los mayores incrementos de temperatura se esperan en el noroeste de México y la zona del Golfo de California, mientras que los menores cambios se esperan en el sureste.

De acuerdo con lo expresado anteriormente, se puede concluir que prácticamente todos los escenarios indican un aumento en la temperatura media. Por otra parte se señala que los aumentos de temperatura para el sur de México, tienen mayor probabilidad de rebasar en el futuro cercano (2030), los rangos de variabilidad interanual experimentados en las décadas recientes. Tal condición tomará más tiempo en el norte, aun cuando los aumentos esperados son mayores debido a que la variabilidad interanual ahí es mayor (Zermeño 2008).

Para la región noroeste, la magnitud de los cambios esperados en temperatura varía entre escenarios de emisiones de GEI. Los incrementos de temperatura y las diferencias entre

escenarios son más notables a partir de la segunda mitad del presente siglo. Existen algunos experimentos de regionalización que llevan a concluir que los incrementos podrían ser tan altos como 4.3°C o tan bajos como 0.5°C hacia finales de siglo.

3.2.2. Escenarios de precipitación

En el caso de la precipitación acumulada anual, el ensamble de predicciones indica que las lluvias disminuirán en gran parte del país hacia mediados y finales del presente siglo. Destaca la magnitud de los cambios negativos porcentuales proyectada para el noroeste de México, en la parte alta del Golfo de California. Dicha proyección coincide con uno de los planteamientos del PICC (2007) que sugiere que “lloverá menos donde llueve poco, y más donde llueve mucho”. Los decrementos en lluvia indicados son menores si se considera un escenario de bajas emisiones de GEI como el A1B, e incluso se vuelven positivos en algunas regiones bajo B1. Sin embargo, aún con pequeños cambios en la precipitación promedio anual, la disponibilidad de agua sería menor por los aumentos esperados de temperatura. Los principales resultados para variación de la precipitación bajo el escenario A2 indican lo siguiente:

- Para la climatología de los 2020s, se proyectan reducciones de precipitación del orden de -5% en el centro-norte y sur-sureste del país; y entre -5% y -10% para el centro y noroeste. Es en esta última región donde se espera disminución de hasta 30% hacia finales de siglo. Por otra parte existe una región en el norte que presentaría incrementos de 5%, sin embargo, un mayor número de experimentos apunta a disminuciones de precipitación.
- Para la climatología de los 2050s, se esperan reducciones promedio de precipitación del orden de -5% en el centro-norte y sur-sureste del país; entre -5% y -10% para el centro, noroeste y Península de Yucatán.
- Para la climatología de los 2080s, la precipitación muestra un patrón similar al de las dos climatologías anteriores, pero intensificado. La precipitación promedio anual podría disminuir para todo el país en orden de 11% (SEMARNAT-SHCP 2009).

- Se destaca que bajo el escenario A2, los estados del norte muestran una disminución porcentual importante.

Todas las predicciones mensuales de los MCGs indican aumentos de temperatura para el periodo 2070-2099, considerando el escenario A2, para el noroeste de México. En cuanto a la precipitación, algunas realizaciones proyectan aumentos y otras disminuciones en la precipitación.

3.3. Fertilidad de los suelos mexicanos y su incorporación a los modelos de simulación de cultivos

La valoración de la calidad del suelo no es suficiente ni adecuada empleando sólo una propiedad. Es preferible contar con algún sistema que combine la información que proporcionan diferentes propiedades cuantitativas o indicadores y generar un índice de fácil cálculo e interpretación, que integre en un solo valor la calidad el suelo (Halvorson *et al.*, 1996).

La fertilidad es considerada como un atributo de la calidad de los suelos de acuerdo con la publicación de Bautista *et al.*, (2004), y como ya se ha comentado en el apartado 4.1.1.1 sobre la resulta complicado primero definir aquellos parámetros que caractericen la calidad de un suelo y por ende la complicación de la modelación de la fertilidad en los suelo.

Los enfoques para generar índices de calidad (incluido el atributo de la fertilidad), tanto cualitativos como cuantitativos son variados y son diferentes para diferentes escalas; y, por lo tanto, no poseen el mismo grado de exactitud (Vergara y Etchevers, 2004). Algunos autores han propuesto ecuaciones aditivas o multiplicativas que combinan, de diversas formas, las funciones del suelo ponderadas de acuerdo con el interés del investigador (Doran y Parkin, 1994; Hussain *et al.*, 1999; Bautista *et al.*, 2004); otros aplican un enfoque de sistemas para generar funciones de valores estandarizadas (Karlen y Stott, 1994) y, algunos más, utilizan procedimientos multivariados (Smith *et al.*, 1993; Halvorson *et al.*, 1996).

Si bien existen varias formas de estimar la fertilidad de los suelos, estos no siempre tienen una base empírica que de soporte a su aplicación con enfoque geográfico o la información necesaria

no siempre se encuentra disponible en bases de datos accesibles y en la densidad requerida y bajo criterios uniformes de muestreo y de análisis químicos. Esto significa que los enfoques mencionados no se pueden aplicar directamente para diferentes zonas climáticas con diferente grado de fertilidad del suelo.

La propuesta de Vergara y Etchevers (2004) identifica y selecciona un número mínimo de propiedades físicas, químicas y biológicas y las usa como indicadores de calidad del suelo en áreas de ladera. Éste método tiene dificultades para su generalización y uso a escala geográfica y su aplicabilidad con los datos disponibles se ve limitada, además presenta la condición de que los atributos para que un suelo fuera considerado de calidad fueran definidos por los agricultores de una región. Aun cuando este método pudiera ser útil a escala geográfica, para calcular el índice integral de fertilidad, se necesita demasiada información sobre el suelo, la cual no está disponible en las bases de datos existentes en México.

Algunos autores sugieren que unas pocas propiedades de los suelos pueden ser suficientes al reflejar procesos fundamentales (Doran y Parkin, 1996 y Karlen *et al.*, 1997). Un enfoque para estimar el índice integral de la calidad o fertilidad del suelo es el propuesto por Pegov y Jomyakov (1991), quienes, basados en datos bibliográficos, seleccionaron únicamente 6 principales propiedades del suelo, responsables de su fertilidad:

- Contenido y composición de materia orgánica *MO*; contenido de los componentes principales de *MO*: ácidos húmico (*AH*) y fúlvico (*AF*).
- Contenido de los elementos nutritivos básicos o macronutrientes *N*, *P* y *K* en formas accesibles y semiaccesibles para la vegetación natural (y agrícola).
- Valor de pH_{KCL} .

Los análisis relacionados con la distribución espacial de estas propiedades demostraron que tienen cierta zonalidad. Además, estas propiedades en una forma indirecta reflejan algunas otras propiedades químico-físicas tales como: capacidad de intercambio catiónico (*CIC*), textura del suelo (contenido de partículas de arcilla, limo y arena), etc. Por ejemplo, el valor de *CIC* y las propiedades hidrofísicas del suelo dependen fuertemente del contenido de *MO*. La elección de

las 5 propiedades seleccionadas fue justificada a través de un análisis estadístico de los datos experimentales para diferentes zonas climáticas tales como África del Norte, Asia Central, Rusia (Pegov y Jomyakov, 1991), dentro del cual se verificó la correlación entre diferentes propiedades del suelo y rendimientos principalmente de avena, también se analizaron los cultivos de trigo, maíz, cebada y algunos otros.

Según estos autores, el cálculo de la fertilidad (F) se recomienda realizar con la ecuación siguiente:

$$F = C_{MO}f(MO) + C_{N,P,K}f(N,P,K) + C_{pH}f(pH) \quad (3-7)$$

Donde: C_{MO} , $C_{N, P, K}$ y C_{pH} son los coeficientes de “peso” de cada propiedad (o más bien de grupo de propiedades); $f(MO)$, $f(N, P, K)$ y $f(pH)$ son algunas funciones, las cuales reflejan en una forma general el carácter de la influencia de estas propiedades sobre la fertilidad del suelo. Los valores de $f(MO)$, $f(N, P, K)$ y $f(pH)$ varían entre 0 y 1.

Con base en el análisis estadístico de la relación entre las 5 propiedades del suelo virgen seleccionados anteriormente y la productividad primaria neta de los cultivos agrícolas mencionados y la vegetación natural en las condiciones climáticas favorables (es decir cuando las condiciones climáticas no limitan la productividad primaria neta) se han obtenido las siguientes funciones $f(MO)$, $f(N, P, K)$ y $f(pH)$:

$$f(MO) = \frac{AH + 0.2AF}{(A + 0.2AF)_{máx}} \quad (3-8)$$

$$f(N, P, K) = \sqrt[3]{\left(\left(\frac{N}{N_{máx}} \right) \left(\frac{P}{P_{máx}} \right) \left(\frac{K}{K_{máx}} \right) \right)} \quad (3-9)$$

Donde: AH , AF , P y K –representan, respectivamente, los contenidos de materia orgánica en forma de los ácidos húmico (AH) y fúlvico(AF), de fósforo (P) y potasio (K) en el estrato superior de suelo virgen en cada punto de determinación en diferentes zonas climáticas; ($AH +$

$AF)_{\text{máx}}$, $P_{\text{máx}}$ y $K_{\text{máx}}$ – representan los valores máximos observados de los componentes de materia orgánica (MO), P y K en todo el conjunto de los puntos de muestreo de suelo en todas las zonas climáticas analizadas.

$$f(pH) \cong e^{-\left(\frac{pH-7}{2}\right)^2} \quad (3-10)$$

$$F = C_{MO}f(MO) + C_{P,K}f(N, P, K) + C_{pH}f(pH) \quad (3-11)$$

Donde: pH_- – representa el valor de pH de suelo virgen en el estrato superior en cada punto de determinación en diferentes zonas climáticas. La ecuación (4.10) refleja en una forma general la respuesta, al cambio de pH , del crecimiento de la vegetación natural y cultivos con tolerancia moderada a la acidez y alcalinidad de suelos.

En el caso de ausencia de los datos sobre el contenido AH , AF y N se recomienda ignorar estas variables, considerando además que N depende significativamente de los contenidos de MO , y se recomienda calcular F con base en las cuatro propiedades restantes (MO , P , K , pH) con la siguiente Ecuación:

Donde: $C_{MO} + C_{P,K} + C_{pH} = 1$ y $C_{MO} = 0.32$, $C_{P,K} = 0.42$, $C_{pH} = 0.25$. Los autores proponen expresar las funciones $f(MO)$, $f(P, K)$ y $f(pH)$ en la forma siguiente:

$$f(MO) = \frac{MO}{MO_{\text{máx}}} \quad (3-12)$$

$$f(N, K) = \sqrt{\left(\frac{P}{P_{\text{máx}}} * \frac{K}{K_{\text{máx}}}\right)} \quad (3-13)$$

Donde: MO , P y K – representan los contenido de materia orgánica, fósforo y potasio en el estrato superior de suelo virgen en cada punto de determinación en diferentes zonas climáticas; $MO_{\text{máx}}$, $P_{\text{máx}}$ y $K_{\text{máx}}$ – representan los valores máximos observados de MO , P y K en todo el conjunto de los puntos de muestreo de suelo en todas las zonas climáticas analizadas.

La Ecuación final se presenta como sigue:

$$F = 0.32 \frac{MO}{MO_{m\acute{a}x}} + 0.42 \sqrt{\frac{P}{P_{m\acute{a}x}} * \frac{K}{K_{m\acute{a}x}}} + 0.25e^{-\left(\frac{pH-7}{2}\right)^2} \quad (3-14)$$

Por lo tanto, bajo las bases ya expuestas se ha considerado hasta ahora apropiado los trabajos realizados por el Colegio de Postgraduados donde se ha logrado pronosticar la alteración de la fertilidad del suelo por el cambio de las condiciones microclimáticas de su formación (Nikolskii, *et al.* 2001; Contreras, *et al.* 2002). Como ya se ha mencionado, el método utilizado se basa en los conceptos de la ley geográfica de zonificación de suelos y otros recursos naturales y en la teoría de formación de suelos en función de la energía solar y la precipitación (Budyko, 1974; Volobuyev, 1974).

En los recientes trabajos se encuentra el de Castillo *et al.*, (2007) quien estimó el papel del factor de fertilidad en el pronóstico del cambio en la productividad del maíz (C₄) y trigo (C₃) de temporal en varias zonas de referencia de México, utilizando los pronósticos desarrollados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, para el escenario de duplicación del CO₂ en la atmósfera, al final del siglo XXI. Para lograr el objetivo del trabajo, se estableció una relación cuantitativa entre el índice integral de fertilidad del suelo (F) para suelos con la misma génesis y un índice climático, de esa manera se pronosticaron cambios en las productividades real y potencial, en el índice *F* y en la disponibilidad hídrica para los cultivos. Castillo *et al.*, (2007), encontró que la alteración de la fertilidad del suelo puede causar cambio del rendimiento hasta en 20%, corroborando la importancia del factor en los pronósticos de rendimientos, sus resultados pronosticaron incrementos en el rendimiento hasta de 463kg·ha⁻¹ en las zonas áridas y semiáridas, y disminuciones hasta de 392kg·ha⁻¹ en las zonas húmedas y semihúmedas, para el caso del maíz; y, en general, incrementos en la producción del trigo de hasta 1100kg·ha⁻¹.

Otro de los trabajos en los cuales se ha estimado la vulnerabilidad de cultivos antes el cambio climático, incorporando el factor de fertilidad ha sido el de Herrera (2008), en dicho trabajo se utilizaron escenarios publicados por la UNAM (Conde *et al.*, 2008) encontrando que el excluir el factor de alteración de la fertilidad del suelo, puede ocasionar errores de hasta el 80% en los

rendimientos pronosticados para maíz y trigo. En dicho estudio, los suelos agrícolas más sensibles al cambio climático, se ubicaron en las zonas climáticas húmedas, semihúmedas y semiáridas de México.

3.4. Vulnerabilidad de las zonas productoras de frijol al cambio climático en México

De acuerdo con información reportada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), a nivel mundial se cultivan alrededor de 26.4 millones de hectáreas de frijol. La superficie ocupada por este cultivo es reducida en comparación con la de otros granos alimenticios, ya que solo representa el 18% de la superficie cultivada con maíz. Sin embargo, la importancia de esta leguminosa a nivel mundial radica en que es la principal fuente de proteínas para cerca de 300 millones de personas, que en su mayoría habitan en países en desarrollo.

El frijol es uno de los cultivos de mayor importancia en la economía rural en México, por lo que forma parte al grupo de los cultivos básicos y estratégicos definidos por la Ley de Desarrollo Rural, en virtud de su importancia en la alimentación de la mayoría de la población y para la economía de los productores del campo, se estima que el 90% de la producción de frijol se destina al consumo humano, el 5% se utiliza como semilla y el resto son mermas que se presentan al trasladar la producción de las zonas productoras, a los centros de consumo. El consumo per cápita en México para el 2008 alcanzo los 11.9 Kg año

Esta leguminosa se encuentra en el tercer lugar en superficie cultivada representando el 10.3% a nivel nacional solo después del maíz y del trigo (SAGARPA, 2008). En la producción por estado Zacatecas es la entidad más importante en el cultivo del frijol, también destacan, Durango, Nayarit, San Luis Potosí, Chiapas y Chihuahua que en su conjunto, participan con 75% de la producción nacional. Es importante considerar que en México existen patrones de producción y consumo de frijol muy diferenciados por regiones, se estima que 33% de la producción corresponde a frijol negro, 11% a frijol pinto, 17% a claros (flor de mayo, flor de junio), 11% a azufrados y el 28% restante a otras variedades sin clasificar. Por variedad, Sinaloa produce principalmente frijol tipo azufrado; en Zacatecas, 65% de la producción de frijol

corresponde a variedades negras y 35% a variedades claras. Durango y Chihuahua cosechan principalmente frijol pinto (Gaucín y Torres, 2009).

Pese a los grandes esfuerzos de investigación que se han realizado, el frijol sigue siendo un cultivo vulnerable a las sequías, las heladas tempranas, al ataque de plagas y enfermedades, o bien, al exceso de lluvia fuera de la época; estos factores, cobran mayor importancia dado que el 82% de la producción de frijol se obtiene en la modalidad de temporal. Con bases en la información Agroalimentaria de Consulta (SIACON), durante el año agrícola 2009 se cosecharon en el país 1.2 millones de hectáreas, lo que significó una disminución de 20% respecto al área cosechada en 2008 y una superficie de 297 hectáreas menos con relación a la superficie cosechada en el año 2000.

El cultivo en el régimen de temporal reporta un rendimiento promedio a nivel nacional de 0.57 toneladas por hectárea entre 2000 y 2009. En tanto, el rendimiento en condiciones de riego es de 1.57 toneladas por hectárea. En conjunto, se obtienen rendimientos promedio de 1.07 toneladas por hectárea.

3.4.1. Requerimientos agroecológicos del cultivo de frijol

Considerando que cualquier alteración en el patrón climático va a incidir directamente en la respuesta de los cultivos al medio, resulta importante conocer los requerimientos agroclimáticos de esta leguminosa, la cual es un cultivo de climas cálidos que se adapta mejor en altitudes bajas. Los límites latitudinales están comprendidos entre los 35° latitud norte y sur; con altitudes de 0 a 800 msnm, altitudes de 0 a 2,400 msnm también son aptas (Crispín y Miranda, 1978; Lépiz, 1983).

El rango térmico para el crecimiento es de 27°C, con un óptimo de 18°C (FAO, 1994), mientras que el rango térmico para el desarrollo es de 10 a 27°C, con un óptimo de 15 a 20°C (Doorenbos y Kassam, 1979; Summerfield y Roberts, 1985). La temperatura media óptima es entre 18 y 24°C y las mínimas de preferencia deben estar por arriba de los 15°C. Es una especie muy sensible a temperaturas extremas y las noches relativamente frescas le favorecen (Benacchio, 1982).

Polania (1982) observo que un clima con temperaturas superiores a 22-23°C, provocaría un menor rendimiento.

El frijol no tolera heladas (Debouck y Hidalgo, 1985), bajas temperaturas retardan el crecimiento, mientras que altas lo aceleran; temperaturas extremosas producen caídas de flores y ocasionan problemas de esterilidad provocando daños irreversibles principalmente en el número de granos en la vaina (White, 1985).

Este cultivo requiere abundante insolación y en áreas de alta nubosidad se alarga el ciclo por lo que, prefiere días despejados. Es una especie de día corto, pero existen también cultivares de día neutro, los días largos tienden a demorar la floración y la madurez Benacchio (1982). De acuerdo con White, (1985) una hora más de luz en el día puede retardar la maduración en 2 a 6 días. La precipitación que requiere el frijol es 1000 a 1500 mm, es una planta que requiere que la humedad se distribuya uniformemente por lo tanto, precipitaciones fuertes pueden ocasionar pérdidas en la floración y el volcamiento de las plantas. Por otra parte, la maduración y la cosecha se deben producir en un ambiente seco. La precipitación es precisamente un factor limitante de producción, debido especialmente a su irregular distribución (Monge, 1981).

Los suelos óptimos para el cultivo de frijol son los de texturas ligeras como los franco-arcillosos y franco-arenosos (Navarro, 1983), aunque prefiere suelos sueltos y ligeros de textura franca o franca limosa que presenten buen drenaje (Benacchio, 1982; Pérez y Cortinas, 1994). La planta de frijol prospera en suelos delgados (FAO, 1994), aunque para la obtención de máximos rendimientos requiere de un mínimo de 60cm de profundidad (Ruiz *et al.*, 1994) y suelos profundos (Benacchio, 1982). La absorción de agua se produce en los primeros 50 o 70cm de profundidad del perfil de suelo (Doorenbos y Kassam, 1979). Se considera un cultivo sensible a la salinidad, por lo que requiere suelos libres de sales (Rodríguez y Maldonado, 1983).

El frijol tolera un porcentaje máximo de saturación de sodio de 8 a 10% y una conductividad eléctrica hasta de 1 dSm⁻¹; por encima de estos niveles, los rendimientos disminuyen significativamente (Schwartz y Gálvez, 1980). El pH está en el rango de 5.3 a 7.5, con un óptimo

de 5.5 a 6.5 (Benacchio, 1982; Thung *et al.*, 1985). Los terrenos deben ser preferiblemente ondulados o ligeramente ondulados.

3.4.2. Fisiología del frijol

En las plantas de frijol, el primer producto estable de la fotosíntesis es el ácido 3-fosfoglicérico del cual se originan hexosas en el ciclo del Calvin, este tipo de mecanismo suele llamarse de metabolismo fotosintético C₃, las cuales son poco eficientes en el aprovechamiento de la energía lumínica y la humedad por lo que son llamadas plantas de baja eficiencia fotosintética por presentar altos valores de fotorrespiración, fenómeno que consiste en oxidar parcialmente los primeros productos de fotosíntesis liberando CO₂, lo cual disminuye la tasa de fotosíntesis neta. Bajo condiciones de alta temperatura (mayor a 30°C) y baja disponibilidad de agua, las plantas de frijol son menos eficientes en términos fotosintéticos, que especies tropicales como el maíz y la caña de azúcar o el sorgo, que producen compuestos de cuatro carbonos (C₄), y usan mecanismos de fijación del CO₂ que evitan la fotorrespiración.

En investigaciones realizadas en la Universidad Nacional de Colombia, se encontró que el frijol presenta un valor máximo de Fotosíntesis neta (34 mgCO₂/dm² h⁻¹), entre 20 y 22°C, comportamiento típico de una planta C₃. La temperatura óptima para la máxima fotosíntesis en altitudes bajas (<1500msnm) es de 25-30°C y para altitudes altas (>1500msnm) es de 15-20°C (Ortiz, 1982).

Respecto a la apertura estomática en el frijol, Schultz y Hall (1982), encontraron que al imponer tratamientos de sequía a plantas C₃, generalmente éstas disminuían su conductancia estomática antes de disminuir las tasas de asimilación de CO₂. Lynch *et al.* (1992) también encontraron, que en diferentes variedades de frijol, la apertura estomática no se relaciona con las tasas de fotosíntesis sino con el contenido de nitrógeno y clorofila en las hojas. Castanguay y Maskhart (1991) mostraron que la capacidad fotosintética del mesófilo no es fácilmente afectada aún en variedades no resistentes a sequía.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

Los materiales utilizados se enlistan a continuación:

- La información de las Normales Climatológicas del periodo 1951-1980 para calcular el índice climático al inicio y mitad del siglo XXI (IHT_{2000} y IHT_{2050}) en los sitios de referencia fue obtenida de la fuente (Crespo, 2005).
- Los datos promedio mensuales sobre la temperatura y precipitación del año 2050 se obtuvieron de tres escenarios A1, B1 y B2³ del cambio climático desarrollados con dos Modelos de Circulación General de la Atmósfera el primero inglés y el segundo alemán: GFDL-CM-2.0-AOGCM y ECHAM5/MPI-OM. Esta información se encuentra publicada en la página del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM
- La información correspondiente al relieve, se obtuvo del modelo digital del terreno del INEGI⁴. La carta de uso del suelo y vegetación proviene de INEGI (1993), en las escalas 1: 50 000 y 1: 250 000. Para la selección de sitios irrigados, se tomó como referencia el shape de Distritos de Riego escala 1:250,000 (IMTA, 2006)
- Datos fisiológicos del frijol para el escenario actual: Índices de cosecha (IC), de área foliar (IAF), y fotosíntesis máxima ($F_{máx}$), para calcular el rendimiento potencial ($Y_{máx}$) del frijol se han obtenido de tablas de la FAO (1979).
- Información del cultivo: Rendimientos y superficies de frijol de temporal SIAP, (2007) y de riego se ha obtenido de la fuente (CONAGUA, 2007).
- Los sitios de producción de frijol de temporal se ubicaron con el shape de los municipios INEGI, (2009).
- Las fechas de siembra para temporal fueron consultadas en la base de datos del SIAP-SAGARPA. Las fechas de siembra para riego fueron facilitadas por la Gerencia de Distritos de Riego mediante los “Planes de Riego”

³ A2: 536 ppm de CO_2 ; B1: 491 ppm de CO_2 y B2: 478 ppm de CO_2 . IPCC, 2007. General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment (TGICA). Pág. 10

⁴Modelo digital INEGI: Elaborado con tamaño de pixel de 100X100 m. Dirección URL: <<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>>

- Las láminas de riego para el 2000, se obtuvieron de los “Planes de Riego” de la Gerencia de Distritos de Riego. Se utilizaron para calcular índice hídrico (K_{hidr}) para cada sitio de referencia.

4.2. Métodos.

Se presenta la estructura metodológica y los cálculos de los cambios en el rendimiento del frijol bajo condiciones de temporal y riego, utilizando diferentes escenarios de cambio climático global, generados por dos modelos de circulación general de la atmósfera. Primero, para diferentes sitios de referencia se obtuvieron las razones de cambio del rendimiento potencial en función de los escenarios de clima y la fisiología del cultivo. Segundo, el cálculo de los cambios en la fertilidad de los suelos en las mismas zonas de referencia se realizó utilizando las gráficas de la generadas por Castillo *et al.*, (2007) y Herrera (2008), que expresan relaciones de la fertilidad de los suelos bajo temporal y riego en función del *IHT* (Figura 2). Tercero, el cálculo de los cambios en la disponibilidad de agua (ΔK_{hidr}). Y finalmente, la estimación del cambio global de los rendimientos (ΔY).

A continuación se muestra un esquema que muestra el proceso para la obtención de los objetivos planteados en la investigación presente:

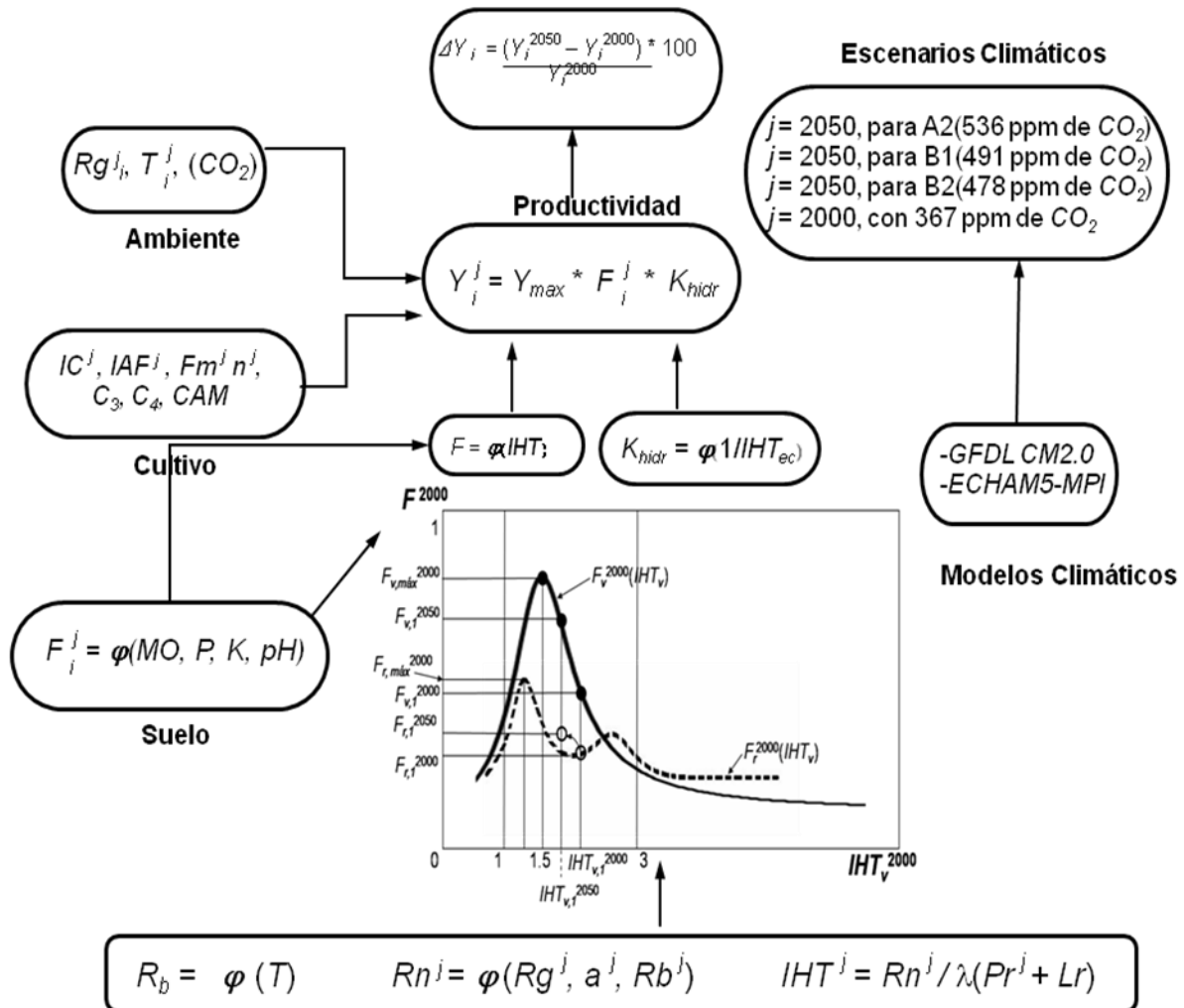


Figura 1. Esquema metodológico general para la estimación de cambios en los rendimientos de frijol de temporal y riego bajo escenarios de cambio climático global (Modificado de Castillo, 2007). **Variables climáticas:** R_b = radiación de onda larga; T = temperatura media; R_n = radiación neta; R_g = radiación global; P_r = precipitación; IHT = índice climático; **Constantes:** λ = calor latente de vaporización del agua; α = albedo; **Propiedades del suelo MO, P, K, pH** - Propiedades biológica y químicas de los suelos; F - índice integral de fertilidad del suelos; **Características del cultivo:** IC = índice de cosecha; IAF = índice de área foliar; F_m = fotosíntesis máxima; n = duración del ciclo del cultivo; C_3, C_4, CAM = Rutas fotosintéticas; **Modelos climáticos:** GFDL-MC-2.0 y ECHAM5/MPI; **Escenarios climáticos:** A2, B1 y B2; $-\Delta Y_i^j$ cambio porcentual en la productividad; Y_{max}^j - Rendimiento potencial; F_i^j = índice de fertilidad, K_{hidr}^j = Índice de disponibilidad de agua. $j=2000$ ó 2050.

4.3. Selección de los sitios de referencia representativos ubicados en diferentes zonas climáticas de México

Los sitios de referencia se seleccionaron utilizando el modelo digital para verificar que se encontraran en zonas con pendientes igual o menor a 3% donde el componente de escurrimiento superficial tienda a ser insignificante. Las variedades de frijol que se incluyeron en el trabajo se

seleccionaron considerando los reportes de la SAGARPA sobre consumo y demanda de la leguminosa. La información seleccionada se incorporo al Arc gis 9.3 donde se definieron las zonas de producción, seleccionando la zona agrícola (INEGI, 1993) y ubicando en la capa de municipios (INEGI, 2007) los municipio con área de producción igual o mayor a 100 ha. Para los Distritos de Riego, la ubicación se realizo en el shape de Distritos de Riego (IMTA, 2006).

Caracterización climática de los sitios de referencia a fines del siglo XX y mediados del XXI.

En el presente trabajo, se utilizaron dos condiciones de valores de temperatura y precipitación. La primera para $j=2000$ que representa la condición de temperatura y precipitación obtenida de la base de datos de las Normales Climatológicas durante el periodo 1951-1980 (Crespo, 2005) y la cual sirve para el cálculo del índice climático (IHT^{2000}), el cual representa una característica climática integral muy importante para analizar la influencia del régimen hidrotérmico sobre los procesos de formación de los suelos Volobuyev, (1974) y también para el cálculo del índice de disponibilidad de agua (K_{hidr}^{2000}). La segunda condición de temperatura y precipitación se obtiene de la aplicación de las razones de cambio climáticas generados para el 2050 (CCA-UNAM)⁵. Los valores de temperatura y precipitación $j=2050$, se utilizan para calcular los valores del IHT , K_{hidr} , así como la los rendimientos de frijol considerando el cambio climático para el año 2050.

4.4. Estimación de vulnerabilidad de la productividad del frijol de temporal y de riego.

Para el presente trabajo, se utiliza la metodología de la FAO-IIASA (2000) con una modificación propuesta por Pegov y Jomyakov (1991). De acuerdo con esta metodología, la productividad de frijol bajo riego y temporal, se pueden calcular con la ecuación siguiente:

$$Y^j = Y_{máx}^j K_{hidr}^j F_{v,r}^j \quad (4.1)$$

Donde Y^j es la productividad agrícola (kg ha^{-1}) a finales del siglo XX ($j = 2000$) o estimadas en un período futuro ($j = 2050$); $Y_{máx}^j$ es el rendimiento potencial máximo (kg ha^{-1}) y depende de

⁵ CCA-UNAM: Centro de ciencias de la Atmósfera- Universidad Nacional de México por el Centro de Ciencias de la atmósfera

los valores mensuales de la temperatura del aire, radiación fotosintéticamente activa y las características fisiológicas del cultivo (índice de cosecha, índice de área foliar, ruta fotosintética, respiración); K_{hidr}^j es un índice hídrico (adimensional) que caracteriza la disponibilidad de agua en el suelo para los cultivos; $F_{v,r}^j$ es el índice integral de fertilidad del suelo agrícola (adimensional) para temporal y riego, respectivamente. K_{hidr}^j y $F_{v,r}^j$ varían de cero a uno.

Con la ecuación anterior, se obtuvo la productividad del frijol de temporal y de riego para finales del siglo XX y mediados del siglo XXI (Y^{2000} y Y^{2050}).

Para calcular los rendimientos Y^{2000} en los mismos sitios de referencia para las condiciones climáticas existentes al inicio del siglo XXI, se utilizaron las normales climatológicas (Crespo, 2005). Los cálculos de los rendimientos para mitad del siglo XXI (Y^{2050}), se realizaron utilizando los escenarios climáticos siguientes: A2 (con crecimiento de la cantidad de CO_2 en la atmósfera a nivel del año 2050 hasta 536 ppm), B1 (491 ppm) y B2 (478 ppm) (IPCC-TGICA, 2007) y las salidas interpoladas desarrolladas con los modelos de circulación de la atmósfera GFDL CM-2.0 y ECHAM5/MPI para el año 2050 (Conde y Gay, 2008; Conde *et al.*, 2008).

Los cambios relativos de rendimiento de los cultivos, ΔY , en sitios geográficos de referencia, se calcularon con la siguiente ecuación:

$$\Delta Y = \frac{Y^{2050} - Y^{2000}}{Y^{2000}} = \frac{Y_{máx}^{2050}}{Y_{máx}^{2000}} \frac{K^{2050}}{K^{2000}} \frac{F_r^{2050}}{F_r^{2000}} - 1 \quad (4.2)$$

Donde $Y_{máx}^{2050}$ y $Y_{máx}^{2000}$ son los rendimientos potenciales máximos calculados para mitad y principio del siglo XXI, respectivamente; K_{hidr}^{2000} y K_{hidr}^{2050} son los índices hídricos del suelo irrigado calculados para los ciclos de los cultivos para los años 2000 y 2050, respectivamente; F^{2000} y F^{2050} son los índices integrales de fertilidad del suelo estimados para estos años.

A continuación se presentan la forma de cálculo de cada uno de los factores de la formula presentada anteriormente.

4.5. Estimación del Rendimiento Potencial (Y_{max}^j)

El cálculo de la biomasa y el rendimiento potencial o máximo Y_{max}^j (en Kg ha⁻¹) de frijol (temporal y riego) se realizó utilizando un modelo basado en principios ecofisiológicos (FAO-IIASA, 2000). El rendimiento está estimado en función del régimen de las variables climáticas de temperatura y radiación solar. Para calcular el rendimiento máximo Y_{max}^j se utilizó la ecuación siguiente:

$$Y_{max}^j = Bn * IC \quad (4.3)$$

Donde:

Y_{max}^j Corresponde al rendimiento potencial máximo o agroclimático de la materia seca económicamente aprovechable que pueden producir plantas sanas con un suministro adecuado de agua y nutrientes (en Kg ha⁻¹) en las condiciones del escenario climático actual ($j = 2000$, $j=2050$).

Bn es la biomasa neta de la materia seca total (en Kg ha⁻¹);

IC es el índice de cosecha o la fracción de **Bn** correspondiente al producto agrícola (adimensional).

El valor de **Bn** (en Kg ha⁻¹) se calcula con la siguiente ecuación:

$$Bn = \frac{0.36b_{gm}L}{(1/n)+0.25C_t} \quad (4.4)$$

Donde:

b_{gm} Es la tasa máxima de producción de biomasa bruta de un cultivo de referencia con el índice de área foliar (IAF) igual a 5 (en $\text{Kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$); b_{gm} depende principalmente de la concentración de CO_2 en la atmósfera y de la radiación fotosintéticamente activa;

n es la duración del ciclo normal del cultivo (en días);

C_t es la fracción de la tasa de producción de biomasa bruta (como CH_2O) que se pierde por la respiración de mantenimiento, la cual depende de tipo de cultivo (leguminosa o no leguminosa) y de la temperatura media del aire ($\text{Kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$);

L es la fracción de la tasa máxima de crecimiento del cultivo, por cobertura incompleta del terreno cuando $IAF < 5$ (adimensional).

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

$$C_t = C_{30} (0.044 + 0.0019 T + 0.001 T^2) \quad (4.5)$$

Donde:

T Es la temperatura media mensual del aire durante el ciclo del cultivo;

C_{30} Es la tasa de pérdida de producción de biomasa bruta por la respiración de mantenimiento a 30°C (de 0.0108 para plantas no leguminosas).

El factor de corrección por cobertura incompleta del terreno (L) se calcula así:

$$L = 0.3424 + 0.9051 \text{Log}_{10} IAF \quad (4.6)$$

Para calcular los valores de b_{gm} se estimó la tasa máxima de producción de biomasa, la fotosíntesis máxima P_m (en $\text{Kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Los valores de b_{gm} se calcularon con las expresiones siguientes:

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

$$b_{gm} = N(0.8 + 0.01 P_m) b_o + (1 - N)(0.5 + 0.025 P_m) b_c \quad (4.7)$$

Para $P_m < 20 \text{ Kg } CH_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$:

$$b_{gm} = N(0.5 + 0.025 P_m) b_o + (1 - N) 0.5 P_m b_c \quad (4.8)$$

Donde:

b_o ó b_c son las tasas brutas de producción de materia seca para un cultivo de referencia hipotético ($\text{kg } CH_2O \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$) en días completamente nublados y días completamente despejados, respectivamente, con dosel cubriendo completamente el terreno y una tasa máxima de producción de biomasa de $20 \text{ Kg } \text{ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$;

N es un parámetro adimensional dependiente de la radiación fotosintéticamente activa teórica o potencial diaria con el cielo totalmente despejado Ac (en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y de la radiación global de onda corta Rg (en $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$):

$$N = \frac{Ac - 0.5 Rg}{0.8Ac} \quad (4.9)$$

La estimación de $Y_{máx}^{2000}$ se realizó utilizando información bibliográfica sobre IC , n , IAF , ruta fotosintética, y datos regionales sobre inicio y duración del ciclo del frijol obtenidos del Anexo VII de la publicación FAO-IIASA (2000) y la publicación de INIFAP (2003). Los valores utilizados se muestran en el **Anexo C**

Varios investigadores han trabajado sobre el impacto del incremento del CO_2 sobre la fisiología de los cultivos entre ellos la soya y el frijol (Akita & Moss, 1973; Roger, *et al.*, 1983; Sage *et al.*, 1989). Estos trabajos aportan ecuaciones del comportamiento de los índices fisiológicos en respuesta al incremento del CO_2 permitiendo utilizar las concentraciones de CO_2 propuesta por cada escenario de cambio climático utilizado en el presente trabajo para conocer los cambios en las variables fisiológicas empleadas en la metodología de la FAO-IIASA (2000). Los resultados proyectaron cambios en los parámetros fisiológicos menores al 10% por lo anterior, los parámetros de IC , n y F_m se consideraron constantes para el cálculo de $Y_{máx}^{2050}$.

El único parámetro para el cual se proyectan cambios importantes considerados en esta investigación fue el *IAF*, con incrementos porcentuales de 17.53, 19.47 y 25.98 para los escenarios B2, B1 y A2 respectivamente. Los valores para cada parámetro utilizado en la estimación de $Y_{máx}^{2050}$ se muestran en el **Anexo C**.

Finalmente la diferencia entre los rendimientos máximos para el 2000 y el 2050 se calcula:

$$\Delta Y_{máx} = \left(\frac{Y_{máx}^{2050} - Y_{máx}^{2000}}{Y_{máx}^{2000}} \right) 100 = \left(\frac{Y_{máx}^{2050}}{Y_{máx}^{2000}} - 1 \right) 100 \quad (4.10)$$

Donde:

$\Delta Y_{máx}$ se expresa en %.

4.6. Cálculo del índice de disponibilidad de agua en el suelo (K_{hidr})

El cálculo del K_{hidr} se realiza considerando la relación entre los valores mensuales de la precipitación (Pr) y evapotranspiración potencial ET_{pot} , enfoque utilizado en investigaciones precedentes al presente trabajo (Nikolskii *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002; Castillo, *et al.*, 2004) y cuyas bases derivan de publicaciones como la de Koster y Suárez (1999) quien ha realizado un análisis especial sobre la posibilidad del uso del índice *IHT* para estimar la proporción Pr/ET_{pot} y concluyó que la proporción $\lambda Pr/Rn$ puede utilizarse como medida de Pr/ET_{pot} .

Considerando que esta investigación presenta las comparaciones entre los rendimientos Y^{2050}/Y^{2000} y los índices hídricos $K_{hidr}^{2050}/K_{hidr}^{2000}$, se considera apropiado retomar la siguiente aproximación:

$$K_{hidr} = \frac{Pr}{ET_{pot}} \cong \frac{Pr}{\lambda Rn} = \frac{1}{IHT} \quad (4.11)$$

La radiación neta es proporcional y prácticamente lineal a la evapotranspiración potencial (Martin *et al.*, 1993; De Santa Olalla *et al.*, 2005). Por lo anterior es que el valor $K_{hidr} = 1/IHT$ se puede considerar como un índice de disponibilidad de agua en el suelo.

4.6.1. Cálculo del índice de disponibilidad de agua en el suelo (K_{hidr}) para frijol de temporal

Para calcular los valores promedio K_{hidr} correspondientes al período de crecimiento del cultivo de frijol con una duración de m meses, se ha utilizado la ecuación siguiente:

$$K_{hidr}^j = \frac{m}{\sum_{i=1}^m IHT_i^j} \quad (4.12)$$

Donde IHT_i^j son los valores del índice climático que representan una característica integral muy importante para analizar la influencia del régimen hidrotérmico sobre los procesos de formación de los suelos Volobuyev (1974). Los valores del IHT para el frijol de temporal, se calcularon para cada mes durante el ciclo del cultivo con la fórmula siguiente:

$$IHT_i^j = \frac{Rn_i^j}{\lambda Pr_i^j} \quad (4.13)$$

Rn_i^j y Pr_i^j son los valores medios de la radiación neta y la precipitación en cada mes i del ciclo del cultivo con duración de m meses en los años $j = 2000$ ó 2050 ; λ es el calor latente de evaporación. $\lambda = 2.512 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$: calor latente de evaporación; Rn y Pr : radiación neta ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$) y precipitación ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$), respectivamente.

Los valores de Rn_i^j para el año 2000, se han calculado a partir de los valores mensuales de temperatura, precipitación y radiación global (Rg_i^j) y en forma indirecta de la precipitación, utilizando la metodología descrita por Contreras, *et al.* 2002. En lo que corresponde a los valores de Radiación global, los escenarios climáticos anteriores, señalan que este cambio debería ser insignificativo (dentro de 4% en el territorio de México) al finales del siglo XX para diferentes escenarios (Gay, 2003). Además, en los escenarios de cambio emitidos por el Centro de Ciencias de la Atmosfera de la UNAM (CCA-UNAM), no se incluye la razón de cambio de esta variable.

Por anterior, en nuestros cálculos los valores de R_g se han considerado constantes para $j=2000$ y $j=2050$.

En aquellos casos tanto para el escenario actual ($j=2000$) como para el escenario futuro (2050), en los cuales el mes anterior al de la siembra, presentó una precipitación Pr_0^j tan alta que:

$$IHT_0^j = \frac{Rn_0^j}{\lambda Pr_0^j} \leq 1 \quad (4.14)$$

Se procedió a incorporar la humedad residual al incluir la precipitación del mes anterior y el K^j se calcula para $m+1$ meses, es decir, para m meses de la estación del cultivo más la precipitación del mes anterior a la siembra:

$$K^j = \frac{m+1}{\sum_{i=0}^{m+1} IHT_i^j}, \text{ y si } K^j > 1 \text{ se considera } K^j = 1 \quad (4.15)$$

Donde $IHT_0^j \leq 1$ es el índice climático correspondiente al primer mes (antes de la siembra) cuando la precipitación Pr_0^j es alta.

4.6.2. Cálculo del índice de disponibilidad de agua en el suelo (K_{hidr}) para frijol irrigado

Para la situación del cultivo de frijol bajo riego, el agua suministrada Lr^{2000} promedio anual aplicada por ciclo a finales del siglo XX, se obtuvo de informes de la Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola de la CONAGUA. La distribución de la lámina de riego Lr^{2000} fue distribuida de manera proporcional a la evapotranspiración calculada con el método de Thornthwaite.

Para la proyección al 2050 los valores de lamina de riego (Lr^{2050}) se determinaron proporcionalmente a los valores promedio anuales de almacenamiento del agua en las presas, las cuales alimentan los distritos de riego de referencia. Bajo el supuesto, de que el escurrimiento

superficial anual depende de la lámina de precipitación anual en cada cuenca. La cantidad almacenada de agua fue asumida proporcionalmente a la lámina de precipitación media en las áreas en las cuencas hidrográficas correspondientes a cada presa de referencia.

Con este supuesto la lámina de riego promedio anual correspondiente al ciclo del cultivo para el año 2050, se determino como sigue:

$$Lr^{2050} = Lr^{2000} \left[1 - \left(\frac{Pr_c^{2050} - Pr_c^{2000}}{Pr_c^{2000}} \right) \right] \quad (4.16)$$

Donde Pr_c^{2000} y Pr_c^{2050} corresponden a las láminas promedio anuales de precipitación en la cuenca hidrográfica correspondiente a la presa del distrito de riego de referencia a finales del siglo XX y mediados del siglo XXI, respectivamente. Para obtener los valores de Pr_c^{2000} y Pr_c^{2050} se considero la precipitación anual estimaron las láminas medias de precipitación entre las láminas promedio anuales para algunas estaciones meteorológicas dentro de cada cuenca para las cuales existen los datos de precipitación promedio anual al inicio y mitad del siglo.

Se supone que tal enfoque puede ser aplicado considerando que no hay grandes cambios en la cobertura vegetal, ni la intensidad de las lluvias en la cuenca, así como en ningún otro factor influyente en el proceso de escurrimiento superficial.

Por lo tanto, el cálculo del índice climático para conocer la disponibilidad de agua para el frijol bajo riego es como sigue:

$$IHT_i^j = \frac{Rn_i^j}{\lambda \left(Pr_i^j + \frac{Lr^j}{m} \right)} \quad (4.17)$$

La condición $K^j > 1$ representa un exceso de agua en el suelo agrícola. Por lo tanto, se ha considerado utilizar $K_{hid}^j = 1$ cuando $K^j > 1$, asumiendo que con medidas agrotécnicas se pueden evitar los casos de exceso de humedad en el suelo y los daños correspondientes al cultivo.

Finalmente se calcula la diferencia entre los índices de disponibilidad de agua a finales del siglo XX y mediados del siglo XXI:

$$\Delta K_{hidr} = \left(\frac{K_{hidr}^{2050} - K_{hidr}^{2000}}{K_{hidr}^{2000}} \right) 100 = \left(\frac{K_{hidr}^{2050} - K_{hidr}^{2000}}{K_{hidr}^{2000}} - 1 \right) 100 \quad (4.18)$$

Donde:

ΔK_{hidr} se expresa en %

4.7. Índice Integral de Fertilidad de los suelos (*F*)

De acuerdo con varios investigadores (Dokuchaev, 1898; Grigoriev, 1954; Buol, *et al.*, 1989) mediante los principios de La ley geográfica de zonificación de los recursos naturales se puede aplicar una metodología que permite estimar los cambios en la fertilidad de los suelos debidos al cambio climático global en función **únicamente** de un índice climático (índice de aridez de Budyko o índice hidrotérmico local: *IHT*), lo anterior derivado de las observaciones a nivel mundial realizadas por Volobuyev (1974), y explicadas de manera precisa en varios trabajos publicados (Tetumo, *et al.*, 2001; Nikoskii *et al.*, 2001; Contreras *et al.*, 2002; Castillo *et al.*, 2007, Terrazas *et al.*, 2010).

El desarrollo de la metodología propuesta incluye el uso de las gráficas generadas por Castillo *et al.*, (2007), establecidas para los terrenos de temporal con pendientes < 3% para suelos automorfos formados in situ, mientras que para los suelos irrigados, el trabajo de Herrera (2008) aporta las graficas que relacionan el *IHT* con el índice de fertilidad para suelos irrigados con procesos de formación similares a los estudiados por Castillo *et al.*, (2007).

En la figura 2 se puede advertir la representación de las dos graficas ya mencionadas, mostrando la dependencia del índice regional de fertilidad para terrenos de temporal y riego, la cual se retoma de la publicación de Terrazas *et al.*, (2010)

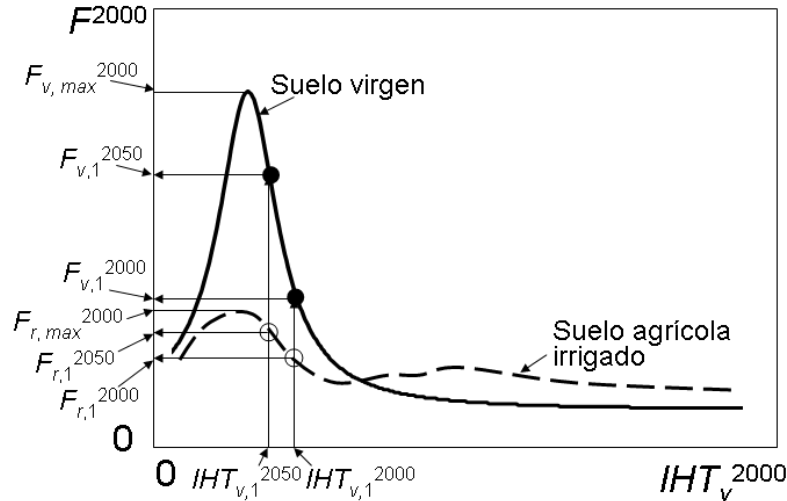


Figura 2. Dependencia esquemática del índice regional de fertilidad del suelo virgen (F_v) y suelo agrícola irrigado (F_r). ($F_{v,max}^{2050}$ y $F_{r,max}^{2000}$): valores máximos del índice de fertilidad de los suelos vírgenes e irrigados en las gráficas $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$ y $F_r^{2000}(IHT_r^{2000})$ respectivamente $F_{v,1}^{2000}$ y $F_{r,1}^{2000}$ son los valores del índice de fertilidad, correspondientes a los municipios con producción de temporal y a los Distritos de Riego con el número 1, respectivamente donde el valor del índice climático, es igual a $IHT_{v,1}^{2000}$ a finales del siglo XX. $F_{v,1}^{2050}$ y $F_{r,1}^{2050}$: Valores del índice de fertilidad para los mismos sitios a mediados del siglo XXI cuando el índice climático será igual a $IHT_{v,1}^{2050}$

A través de los escenarios del cambio climático del presente trabajo, se han calculado los índices climáticos $IHT_{v,1}^{2050}$ correspondientes a la ubicación de cada sitio agrícola seleccionado. Para cada sitio geográfico de referencia (por ejemplo, indicado con subíndice 1), de la Figura 2, se ha tomado un valor del índice de fertilidad del suelo agrícola (temporal y bajo riego) $F_{r,v,1}^{2000,2050}$ correspondiente al índice climático local $IHT_{r,v,1}^{2000,2050}$ representativo para este sitio.

Para estimar el cambio del índice de fertilidad del suelo agrícola irrigado ($F_{r,1}^{2050} - F_{r,1}^{2000}$) en un sitio de referencia (indicado con el número 1 en la Figura 2) para mediados del siglo, causado exclusivamente por el cambio climático excluyendo los efectos relacionados con el uso del terreno, se utilizó la ecuación siguiente:

$$F_{r,l}^{2050} - F_{r,l}^{2000} = \frac{F_{r,máx}^{2000}}{F_{v,máx}^{2000}} (F_{v,l}^{2050} - F_{v,l}^{2000}) \quad (4.19)$$

Donde

$F_{r,l}^{2000}$ y $F_{r,l}^{2050}$ representan los índices regionales de fertilidad del suelo irrigado en el sitio de referencia con el número 1 a finales del siglo XX y mediados del siglo XXI correspondientes al cambio del índice climático de $IHT_{v,l}^{2000}$ a $IHT_{v,l}^{2050}$; $F_{r,v,l}^{2000}$ y $F_{r,v,l}^{2050}$ son los índices de fertilidad del suelo virgen en el mismo sitio de referencia a finales del siglo XX y mediados del siglo XXI respectivamente. Los índices climáticos IHT_v^{2000} e IHT_v^{2050} se calculan con la ecuación **5.12** y **5.17**. $F_{v,máx}^{2000}$ y $F_{r,máx}^{2000}$ corresponden a los valores máximos del índice de fertilidad de los suelos vírgenes e irrigados en las gráficas $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$ y $F_r^{2000}(IHT_v^{2000})$ respectivamente.

La Figura 2 [$F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$], también se utilizó para pronosticar el valor F_v^{2050} correspondiente a mediados del siglo XXI, para los suelos con cultivo de frijol de temporal con pocas aplicaciones de fertilizantes (insumos). Al igual que para el frijol irrigado, el uso de esta gráfica se basa en la consideración de que la relación establecida refleja la ley geográfica de zonificación de suelos, la duración de los cambios en las propiedades es diferente para cada una de las propiedades, pero en general la duración de 50 años es un tiempo suficiente para el establecimiento del nuevo equilibrio (Arnold *et al.*, 1990).

4.8. Valoración integral de los resultados y su comparación con otros estudios

El principio para determinar la alteración del índice integral de fertilidad del suelo agrícola, causada por el cambio climático, excluyendo otros factores (cambio de la tecnología agrícola, dosis de fertilizantes, tipo del cultivo agrícola, incidencia de plagas, etc.), es el siguiente: Si en una región con el índice climático IHT^{2000} se puede determinar el cambio del índice de fertilidad del suelo virgen del valor F_v^{2000} a mediados del siglo XXI (F_v^{2050}) en relación con el cambio climático, entonces el valor de cambio del índice de fertilidad para suelos agrícolas (F_a^{2050}) del suelo agrícola se puede estimar como sigue:

$$F_a^{2050} = F_a^{2000} + (F_a^{2050} - F_v^{2000}) \quad (4.20)$$

Donde:

F_v^{2000} Representa el valor conocido del índice de fertilidad del suelo virgen al final del siglo XX. F_a^{2000} Representa los suelos agrícolas (temporal e irrigados). Considerando que el objetivo en este trabajo es estimar la proporción $\frac{F_a^{2050}}{F_a^{2000}}$, esta ecuación se puede reescribir en la forma siguiente:

$$\frac{F_a^{2050}}{F_a^{2000}} = 1 + \frac{F_a^{2000}}{F_a^{2000}} \left(\frac{F_a^{2050}}{F_a^{2000}} - 1 \right) \quad (4.21)$$

Finalmente se calcula la diferencia entre los índices integrales de fertilidad a finales del siglo XX y mediados del siglo XXI:

$$\Delta F_{v,r} = \left(\frac{F_a^{2050} - F_a^{2000}}{F_a^{2000}} \right) 100 = \left(\frac{F_a^{2050}}{F_a^{2000}} - 1 \right) 100 \quad (4.22)$$

Donde:

ΔF se expresa en %

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio que aquí se presenta, se realizó mediante simulaciones de los cambios de temperatura y precipitación sugeridos por los escenarios socioeconómicos A2, B1 de los modelos GFDL-CM-2.0 y ECHAM5/MPI. Los resultados se presentan divididos en tres etapas: (1) selección de los sitios de referencia representativos ubicados en diferentes zonas climáticas de México, (2) caracterización climática de los sitios de referencia a fines del siglo XX y mediados del XXI y (3) estimación de vulnerabilidad de la productividad del frijol de temporal y de riego bajo escenarios de cambio climático.

La incorporación del índice de fertilidad en la evaluación de la vulnerabilidad de la productividad del frijol ante el cambio climático, permite conocer la posible alteración de la fertilidad del suelo, tanto para las condiciones actuales como para las previstas bajo escenarios de cambio climático.

5.1. Selección de los sitios de referencia de producción de frijol de temporal y bajo riego

Para la valoración del efecto del cambio climático en la productividad del cultivo de frijol, se seleccionaron 48 estaciones meteorológicas las cuales influyen en 34 municipios distribuidos en los estados de Veracruz, San Luís Potosí, Durango, Zacatecas Puebla y Nayarit. Respecto a zonas de riego con producción de frijol, se estudió la alteración de la fertilidad por el cambio climático en siete Distritos de Riego, cuyos datos de temperatura y precipitación se obtuvieron de 17 estaciones meteorológicas.

Los sitios seleccionados fueron superficies donde se sembraron más de 100 ha de frijol y con variedades de frijol señaladas como las de mayor consumo a nivel nacional: frijol negro, frijol pinto, flor de mayo y azufrados, la selección se realizó considerando los reportes del SIAP (SIAP-SAGARPA, 2007). En la figura siguiente se muestra la distribución de los municipios con producción de frijol de temporal y bajo riego. También se incluyen las estaciones meteorológicas utilizadas para la obtención de los elementos climáticos.



Figura 3. Distribución de las estaciones meteorológicas en Distritos de Riego y municipios con siembra de frijol bajo temporal y riego, para la evaluación del cambio de productividad del frijol bajo condiciones de cambio climático.

5.2. Caracterización climática de los sitios de referencia a fines del siglo XX y mediados del XXI.

Los sitios con producción de frijol de temporal y riego se ubican en altitudes de 5 a 2,450 m se distribuyen en diferentes zonas climáticas de México: semicálidos húmedos, cálidos húmedos, semiáridos y templados. Para aquellos sitios que cultivan bajo temporal, las precipitaciones van de 329 mm de lámina de agua anual a 1,783 mm. La menor temperatura media anual es de 14.9 °C para el municipio Palmar de Bravo en el estado de Puebla, mientras que la más alta es de 26.9°C para el municipio de Santiago Ixcuintla en el estado de Nayarit como se muestra en el **Cuadro 1** y en el **Anexo A**

Cuadro 1. Valores promedio anuales de la temperatura del aire (T^{2000}), precipitación (Pr^{2000}), radiación global (Rg^{2000}) del índice climático (IHT^{2000}), para el inicio del siglo XXI en algunos municipios y Distrito de Riego de México con producción de frijol de temporal y riego.

Municipio y/o Distrito de Riego	Estado	IHT^{2000} (adim)	Pr^{2000} (mm)	T^{2000} (°C)	Rg^{2000} (MJ m ⁻² año ⁻¹)	Altitud (m)
Tuxpan	Veracruz	0.24	1,493	25.28	6,200.9	100
San Andrés Tuxtla	Veracruz	0.29	1,343	24.50	7,187.8	1,139
San Juan Evangelista	Veracruz.	0.23	1,690	24.81	7,129.6	1,500
Tepic	Nayarit	0.42	1,209	19.73	6,961.6	60
Santiago Ixcuintla	Nayarit	0.57	1,349	26.93	7,325.6	160
Chicontepec	Veracruz	0.49	1,514	23.86	6,690.4	5
Cotaxtla	Veracruz	0.27	1,229	25.93	6,190.6	2,240
Tantoyuca	Veracruz.	0.56	1,317	23.35	6,583.1	1,748
Sombrete	Zacatecas	1.01	561	16.62	6,668.3	549
Acatzingo de Hgo.	Puebla	0.69	704	18.05	6,627.0	1,800
El Higo	Veracruz	0.36	1,008	25.12	6,962.2	252
Aquismon	San Luis P.	0.32	2,248	24.43	7,080.8	15
San Vicente Tancuayalab	San Luis P.	0.25	1,005	23.66	7,221.1	2,321
Tlacotalpan	Veracruz.	0.19	1,601	25.60	7,619.3	2,450
Ciudad Valles	San Luis P.	0.18	1,359	24.32	6,807.4	8
Palmar de Bravo	Puebla	1.52	438	14.99	7,429.3	1,800
Cuencame	Durango	2.07	330	19.01	7,034.5	913
Tamuín	San Luis P.	0.24	1,010	25.28	6,701.6	100
San Ciró Acosta	San Luis P.	1.14	591	21.78	7,434.3	920
Ignacio de la Llave	Veracruz	0.33	898	24.46	7,358.6	2,072
DR 30 Valsequillo	Puebla	0.91	704	18.05	6,627	-
DR 35 La Antigua	Veracruz	1.19	1246	25.34	7,072	-
DR 84 Guaymas	Sonora	2.16	367	23.81	6,234	-
DR 10 Culiacán-Humaya	Sinaloa	2.68	584	25.04	6,652	-
DR 63 Guasave	Sinaloa	2.83	528	24.06	6,802	-
DR 76 Valle del Carrizo	Sinaloa	2.83	379	24.41	6,876	-
DR 38 Río Mayo	Sinaloa	3.54	384	27.39	6,392	-
DR 75 Río Fuerte	Sinaloa	5.09	328	23.86	6,883	-

Nota: Los datos climáticos corresponden a los valores anuales promedio al inicio del siglo XXI (durante el periodo 1951-1980). Rg^{2000} : radiación global, T^{2000} : temperatura del aire, Pr^{2000} : lámina de precipitación, e IHT^{2000} : índice climático local.

Los distritos de riego incluidos en el presente trabajo, se ubican principalmente al norte del país a excepción del DR 30 Valsequillo, el cual se localiza en el estado de Puebla. La temperatura media menor es en Puebla con 18.05 °C, mientras la mayor es de 27.39 °C en Sinaloa Distrito de Riego 038 Río Mayo. Los principales cambios en precipitación y temperatura se resumen en los **Cuadro 2**. Para el caso de la radiación global, los escenarios climático anteriores (Gay, 2003), señalan que este cambio era de 4% dentro del territorio de México considerado como insignificante, por lo tanto en los presentes cálculos los valores de Rg para el año 2050, se han considerado iguales a los utilizados en el escenario base.

Cuadro 2. Cambio en la variable de temperatura (ΔT %) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal y de riego para algunos municipios y Distritos de Riego de México, para dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio y/o Distrito de Riego	Estado	Modelo GFDL-CM-2.0			Modelo PIECHAM5/MPI		
		A2	B1	B2	A2	B1	B2
Cotaxtla	Veracruz	2.50	2.33	2.91	6.49	4.54	5.28
Tuxpan	Veracruz	2.67	2.45	3.06	6.56	4.50	5.27
El Higo	Veracruz	2.71	2.51	3.13	6.78	4.60	5.39
Panuco	Veracruz	2.80	2.76	3.10	6.07	4.60	5.06
San Juan Evangelista	Veracruz	2.87	2.65	3.33	6.45	4.69	5.53
Tempoal	Veracruz	3.23	2.96	3.50	5.93	4.95	7.20
San Andrés Tuxtla	Veracruz	3.40	3.13	3.58	6.45	4.83	5.39
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	3.71	3.50	6.85	5.93	7.61	7.20
Isla	Veracruz	3.74	3.41	3.58	5.41	4.57	4.81
Tlacotalpan	Veracruz	3.78	3.50	3.63	5.68	4.82	5.04
Tantoyuca	Veracruz	5.76	3.50	6.85	5.93	7.61	7.20
Sombrerete	Zacatecas	6.09	4.79	5.91	11.25	7.61	8.96
Espinal	Veracruz	6.14	2.51	5.54	6.78	4.60	5.39
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	6.61	4.88	6.54	8.50	6.20	7.96
Tamuín	San Luis Potosí	6.97	5.70	6.85	11.25	7.61	7.20
Ixcaquixtla	Puebla	7.42	5.60	7.21	10.14	7.49	9.24
Palmar de Bravo	Puebla	8.30	6.62	7.79	11.38	8.77	10.11
Acatzingo de Hgo.	Puebla	8.47	6.54	7.31	10.01	7.62	8.45
Ignacio de la Llave	Veracruz	8.61	6.63	7.94	7.80	6.05	7.28
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	9.19	6.88	8.47	12.54	9.21	10.97
DR 10 Culiacán-Humaya	Sinaloa	10.92	13.14	14.85	15.25	15.08	15.55
DR 30 Valsequillo	Puebla	7.84	6.17	6.88	9.86	9.86	8.39
DR 35 La Antigua	Veracruz	6.82	5.74	7.11	6.80	6.80	6.97
DR 38 Río Mayo	Sinaloa	5.65	4.67	6.33	6.37	6.37	6.88
DR 63 Guasave	Sinaloa	6.48	5.36	7.04	8.27	8.27	8.40
DR 75 Río Fuerte	Sinaloa	3.98	3.72	4.54	7.40	7.40	7.10
DR 76 Valle del Carrizo	Sinaloa	4.95	4.43	5.19	6.77	6.77	6.69
DR 84 Guaymas	Sonora	8.61	6.97	8.82	7.86	7.86	8.82

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General.

De manera categórica, la temperatura media durante la estación de crecimiento del frijol tiende a incrementar en ambos modelos, para la producción bajo temporal como bajo riego. De acuerdo con un estudio realizado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2010), para los años 2050 se prevé cambios de entre $1.3 \pm 0.3^\circ\text{C}$ en el sur y $2.3 \pm 1.0^\circ\text{C}$ en el norte. Para las zonas bajo temporal, en general el modelo Alemán o ECHAM5/MPI sugiere mayores cambios (de 5% a 13%) respecto al modelo norteamericano o GFDL-CM-2.0 (de 2% a 9%). Respecto a los escenarios, el A2 propone los mayores incrementos (7% a 15%).

Los resultados de la presente investigación sugieren que los municipios con menores incrementos serán: Cotaxtla, Tuxpan e Isla, ubicados en el municipio de Veracruz, mientras que Ignacio Ilave fue el municipio donde se presentan escenarios de mayores incrementos en temperatura. En estudios anteriores (Castillo *et al.*, 2007) Tuxpan presentó incrementos en de hasta 10.4% para el modelo GFDL-R30, por mucho mayor a los presentados en el cuadro anterior (2% a 7%). Durante el 2007 en el estado de Veracruz, se aplicaron las tasas de cambio de tres modelos de cambio climático Norteamericano, Inglés y Alemán, simulados para el año 2020, y 2050 (Gay *et al.*, 2006), los cuales sugería un incremento en la temperatura desde 1°C al año 2020 hasta los 4°C para el 2050.

El programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (UNDP) llevó a cabo un estudio de los impactos del cambio climático bajo escenarios de emisiones A2, A1B y B1, para países en desarrollo en el cual se incluyó entre varios países a México. Se encontró que la temperatura media anual proyecta un incremento en 1.1 a 3°C para los años 2060s, anualmente se indica que De acuerdo a los estándares de clasificación de los días actuales (estándares 1970-1999), todos los resultados del estudio de McSweeney, *et al.*, (2008), indican disminuciones de la frecuencia de los días y de las noches que se consideran frías, presentando una tendencia al calentamiento, es decir, que los días considerados calientes ocurrirán en 18 a 34% del total de días del año, mientras que las noches calientes tenderán a incrementarse en un 22 a 39%. Estas predicciones para un periodo de evaluación al año 2060.

Respecto a los Distritos de Riego para los ubicados al norte como en Sinaloa y Sonora, se esperan incrementos mayores que para aquellas zonas hacia el sur con producción bajo temporal, lo cual coincide con lo expuesto por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2010). La información generada por la UNDP, durante el 2008, indican que el índice proyectado de calentamiento es similar en todas las estaciones, pero más rápido en las regiones centro y norte del país (McSweeney, *et al.*, 2008). Los cambios en la precipitación que se proyectan para el 2050 se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 3. Cambio en la variable de Precipitación (ΔPr %) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal y de riego para algunos municipios y Distritos de Riego de México, para dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio y/o Distrito de Riego	Estado	Modelo GFDL			Modelo ECHAM5/MPI		
		A2	B1	B2	A2	B1	B2
Cuencame	Durango	-16.50	-9.51	-9.75	-10.10	-6.57	-5.61
Cotaxtla	Veracruz	-12.68	-7.04	-5.57	-0.62	1.38	3.50
Panuco	Veracruz	-11.62	-9.81	-7.82	7.34	3.43	6.44
San Ciró Acosta	San Luis Potosí	-6.84	-2.59	-2.59	-35.05	-23.12	-23.88
San Vicente Tancuayalab	San Luis Potosí	26.69	23.36	27.96	-3.32	2.24	5.40
Isla	Veracruz	27.54	24.76	28.30	1.79	6.54	8.96
Jose Azueta	Veracruz	13.75	9.08	12.24	15.64	9.28	13.58
Ciudad Valles	San Luis Potosí	19.02	16.96	21.16	3.90	5.79	9.65
Ixcaquixtla	Puebla	34.42	9.54	10.04	-15.16	-7.16	-8.16
DR 10 Culiacán-Humaya	Sinaloa	-28.18	-7.25	-9.56	-12.81	-10.50	-12.28
DR 30 Valsequillo	Puebla	-13.24	-8.58	-8.36	-16.28	-16.28	-10.65
DR 35 La Antigua	Veracruz	-22.26	-15.75	-18.86	-17.94	-17.94	-15.61
DR 38 Río Mayo	Sinaloa	13.15	9.83	9.35	-6.79	-6.79	-5.65
DR 63 Guasave	Sinaloa	22.22	8.32	8.07	-8.27	-8.27	-8.50
DR 75 Río Fuerte	Sinaloa	3.77	4.93	4.36	-4.44	-4.44	-3.19
DR 76 Valle del Carrizo	Sinaloa	-4.42	-0.60	-0.30	-1.80	-1.80	1.83
DR 84 Guaymas	Sonora	7.92	9.66	11.40	-1.22	-1.22	4.53

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General.

El análisis del Cuadro 3, indica que para más del 50% de los lugares de producción de frijol de temporal, así como bajo riego, se proyectan disminuciones para la precipitación para el horizonte de estudio al año 2050.

En los distritos de riego, el comportamiento observado para los dos modelos es similar, cambiando únicamente en la magnitud del impacto. En el caso del modelo norteamericano la mayor disminución en precipitación se observa en el escenario A2 (17%). Para el modelo alemán los valores son mayores alcanzando valores de hasta 35% (Escenario A2.). Los rangos en los cambios son similares entre modelos, esperando mayores disminuciones con el modelo ECHAM5/MPI, principalmente en los escenarios A2 y B1. Los cambios en los Distritos de Riego, oscilan de - 28 a 11% para el modelo norteamericano y de -18 a 5% para el modelo inglés.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo expuesto por el BID, quien durante el 2010 realizó la labor de hacer un compendio de los últimos avances en la investigación del cambio climático y

su impacto en países latinos entre ellos México. Dicho estudio muestra que los cambios esperados con los escenarios disponibles a la fecha, proyectan una disminución en la lluvia en gran parte del país hacia mediados y finales del presente siglo resaltando los cambios negativos porcentuales esperadas para el noroeste de México, además de mencionar que la precipitación promedio anual podría disminuir para todo el país en orden de 11% (BID, 2010).

Sin embargo, las reducciones en lluvia no resultan de gran impacto para el cultivo de frijol, ya que de acuerdo con Acosta *et al.*, (2007) solo en situaciones de sequía (reducciones del 25% y 50% de la lámina necesaria para el desarrollo del cultivo) pueden provocarse disminuciones importantes en la duración del ciclo del cultivo, en el índice de cosecha así como en el rendimiento.

Los valores generados para el escenario futuro y los escenarios esperados de acuerdo con ambos modelos se presentan en el **anexo B**

5.3. Estimación de la vulnerabilidad de la productividad del frijol de temporal y de riego ante escenarios de cambio climático para el año 2050

La estimación de la vulnerabilidad del frijol de temporal y de riego con bajos y altos niveles de insumos, respectivamente, se realizó a través de la estimación de los cambios en el rendimiento potencial, cambios en el balance hídrico en el suelo y cambios en la fertilidad de los suelos debidos al cambio climático global.

La metodología empleada no incluye el avance en la tecnología, ni los cambios que puedan desarrollarse en el comportamiento e incremento de plagas sobre el cultivo.

A continuación se presentan los cambios más importantes obtenidos en parámetros utilizados en la metodología desarrollada.

5.3.1. Estimación del Rendimiento Potencial máximo $Y_{máx}^j$

Dirks y Bolton (1981) y Wilson *et al.* (1995) señalaron que, aunque el crecimiento de un cultivo es afectado por un grupo complejo de factores ambientales, los de mayor impacto son: la precipitación pluvial, la radiación y la temperatura estacional. La relación entre estos factores y el crecimiento y rendimiento del cultivo estará en función del clima en que éste se desarrolle (Shaw, 1988). Bajo las anteriores consideraciones, se retomaron algunas investigaciones (Roger *et al.*, 1983; Ackoc, Sage *et al.*, 1989; Akita y Moss) sobre la vulnerabilidad ante el cambio climático de los cultivos del tipo C3, grupo al que pertenece el frijol, para conocer la alteración que podría presentarse en los índices fisiológicos que son utilizados en la metodología de la FAO (2000).

De acuerdo con Cure y Acock (1996), el *IC* no depende del cambio climático, por lo tanto dicho valor se consideró constante para las predicciones realizadas. Respecto a la fotosíntesis máxima, varios autores trabajaron con cultivos C3, entre ellos el frijol (Sage *et al.*, 1989; Roger *et al.*, 1983), facilitando un modelo del incremento de la fotosíntesis máxima respecto al incremento del CO_2 en el ambiente, dicho modelo permitió conocer que de acuerdo a las concentraciones de los escenarios aplicados (A2,B1 y B2) los cambios en esta variable son menores al 10%, por lo tanto no se consideran cambio en los valores de fotosíntesis máxima para las predicciones desarrolladas.

El índice de área foliar, se observaron de acuerdo a las predicciones de los escenarios utilizados los cambios siguientes: A2 (26 %), B1 (19%) y B2 (18%). Ewert (2004) demuestra la importancia relativa del *IAF* para la asimilación y el crecimiento de la biomasa bajo condiciones de incremento de CO_2 y de la necesidad de la representación satisfactoria del índice en modelos de la productividad, particularmente para los tipos de vegetación con una gran variabilidad en índice, tal como los cultivos agrícolas.

Respecto a la duración del ciclo del cultivo, se utilizó el programa agroclim v.1, donde se derivaron valores diarios acumulados de Grados-Día de Desarrollo (GDD), y donde además se genera un resumen del período de crecimiento, así como las fechas esperadas para las diferentes etapas fenológicas. Lo anterior, mostró que los cambios no son significativos es decir no fueron

cambios mayores al 10% respecto a la duración del ciclo que actualmente presente el frijol. Lo anterior, se contradice con lo expuesto con Castillo, *et al.*,(2007), quien muestra que la duración del ciclo del maíz se reduce en más del 20% respecto al ciclo actual del cultivo, modificándose con ello la duración de las etapas fenológicas y haciéndolo más vulnerable a los cambios climáticos.

Los valores utilizados para las variables fisiológicas utilizados en el cálculo del rendimiento máximo potencial se presentan en el **anexo C**

El rendimiento máximo potencial aplicando la metodología de la FAO (2000), se calculó con el módulo básico para estimar rendimientos potenciales de cultivos anuales (*RenMax* V.1.0) elaborado por Castillo (2010). Los cambios en el rendimiento máximo potencial ($\Delta Y_{m\acute{a}x}$), para el cultivo de frijol de temporal y riego ante escenarios de cambio climático se resumen en el Cuadro 4 y en el **Anexo D**.

Cuadro 4. Cambios en el rendimiento máximo potencial ($\Delta Y_{m\acute{a}x}\%$) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal y de riego para algunos municipios y Distritos de Riego de México, para dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio y/o Distrito de Riego	Estado	Modelo GFDL			Modelo ECHAM5/MPI		
		A2	B1	B2	A2	B1	B2
Santa Clara	Durango	-37.40	-29.20	-39.19	-36.49	-38.04	-38.53
San Vicente Tancuayalab	San Luis Potosí	-32.08	-32.58	-34.03	-30.76	-31.66	-33.06
Isla	Veracruz	-31.98	-32.56	-33.99	-30.66	-31.64	-33.02
Tantoyuca	Veracruz	-31.24	-22.65	-33.43	-30.27	-32.34	-32.74
Chicontepec	Veracruz	-30.48	-31.04	-32.46	-29.39	-30.28	-31.65
San Juan Evangelista	Veracruz	-29.41	-29.89	-31.37	-28.38	-29.18	-30.62
Palmar de Bravo	Puebla	-28.71	-29.29	-33.61	-27.30	-28.32	-29.74
Jose Azueta	Veracruz	-0.85	-15.75	-4.09	0.35	-1.94	-3.23
Cotaxtla	Veracruz	23.44	-19.96	-9.32	-3.83	-6.07	-7.7
Chontla	Veracruz	14.27	-2.38	10.95	16.62	13.84	12.16
DR 10 Culiacán-Humaya	Sinaloa	4.61	3.76	1.62	3.93	3.83	1.93
DR 30 Valsequillo	Puebla	3.75	3.31	1.89	2.21	2.24	0.76
DR 35 La Antigua	Veracruz	6.82	4.99	6.25	6.83	5.00	2.73
DR 38 Río Mayo	Sinaloa	4.07	3.33	0.81	3.36	2.83	0.28
DR 63 Guasave	Sinaloa	3.32	3.91	1.75	3.40	2.96	0.73
DR 75 Río Fuerte	Sinaloa	6.58	5.03	3.49	3.80	3.11	-0.92
DR 76 Valle del Carrizo	Sinaloa	5.75	4.43	9.33	4.31	3.44	1.75
DR 84 Guaymas	Sonora	3.36	3.36	0.62	3.91	3.24	0.62

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General

Los modelos utilizados, presentan una tendencia similar entre ellos, generando disminuciones de rendimientos para más del 90% de los sitios aquí incluidos. Los rangos de cambio son similares entre modelos y escenarios, como se muestra en el cuadro anterior. El municipio con mayores disminuciones en el rendimiento máximo potencial es Santa Clara en el estado de Durango, mientras que Chontla en Veracruz muestra incrementos mayores al 10%, excepto en el escenario B1-GFDL donde se sugiere disminuciones del 2%.

Los rendimientos en los distritos de riego presentan un incremento menor al 10% generalizándose para las predicciones en los tres escenarios y los dos modelos utilizados.

5.3.2. Índice de disponibilidad de agua para el cultivo de frijol (K_{hidr})

Los cambios presentados para la radiación neta en los municipios de temporal coinciden en signo y rango de impacto entre escenarios y modelos con cambios menores al 10%. En los Distritos de Riego de manera general se esperan incrementos, el Distrito de Riego 10 Culiacán-Humaya-San Lorenzo presenta los mayores incrementos ($\cong 100\%$) respecto al escenario base a inicios del siglo XXI, mientras que para el Distrito de Riego La Antigua se proyectan los mayores cambios negativos ($\cong 30\%$)

Respecto al índice climático (IHT), los cambios son positivos para más del 50% de los municipios de temporal. Los principales cambios con signo negativo se esperan para el escenario A2 del modelo ECHAM5/MPI (17%). Sin embargo, en el municipio de Villa de Arriaga y Aquismon, se esperan incrementos mayores al 70% de acuerdo con el modelo GFDL-CM-2.0. Respecto a las zonas de frijol bajo riego, el comportamiento es muy similar a la zona de producción de temporal. Solo para el Distrito de Riego 038 Río Mayo, se espera un valor negativo bajo el escenario A2. Los mayores cambios se presentan en Valsequillo (DR 030) y en Valle del Carrizo (DR 076).

Los datos sobre cambio esperado de la radiación neta y del IHT se presentan en anexo C.

Considerando que la radiación neta es proporcional y prácticamente lineal a la evapotranspiración potencial (Martin *et al*, 1993; De Santa Olalla *et al.*, 2005), el valor $K_{hidr} =$

I/IHT se puede considerar como un índice de disponibilidad de agua en el suelo. El cálculo del índice hídrico promedio durante la estación de crecimiento del cultivo comenzando un mes antes del inicio de la estación de crecimiento⁶, para considerar el agua almacenada en el suelo por lluvias previas. El índice hídrico fue el resultado de la media de los valores mensuales durante la estación de crecimiento. Los cambios porcentuales esperados para el 2050 para el índice de disponibilidad de agua (K_{hidr}) para el cultivo de frijol ante escenarios de cambio climático, se resumen en el cuadro siguiente.

Cuadro 5. Cambios en el índice de disponibilidad de agua ($\Delta K_{hidr}\%$) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal y de riego para algunos municipios y Distritos de Riego de México, para dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio y/o Distrito de Riego	Estado	Modelo GFDL			Modelo ECHAM5/MPI		
		A2	B1	B2	A2	B1	B2
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	-46.21	-44.27	-44.59	-23.25	-14.66	-15.28
Aquismón	San Luis Potosí	-47.85	-34.11	-34.45	-32.71	-19.03	-22.55
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	11.26	-27.18	-27.85	-42.75	-25.99	-27.09
Ixcaquixtla	Puebla	14.5	-25.62	-25.92	-44.24	-26.87	-29.33
Espinal	Veracruz	-32.34	-15.65	-46.52	-42.3	-23.73	-25.78
José Azueta	Veracruz	4.33	-3.02	-3.2	20.2	10.38	12.88
Tlacotalpan	Veracruz	1.38	2.01	1.07	9.68	9.08	10.41
Tamasopo	San Luis Potosí	12.41	12.39	12.81	-1.64	3.03	4.45
El Naranjo	San Luis Potosí	12.46	12.43	11.87	4.67	6.62	7.25
DR 10 Culiacán-Humaya	Sinaloa	-3.2	-0.7	-4.3	-11.2	-7.6	-10.5
DR 30 Valsequillo	Puebla	-17.6	-12.2	-12.2	-20.2	-17.0	-14.1
DR 35 La Antigua	Veracruz	-9.9	-6.5	-8.9	-2.1	0.1	0.1
DR 38 Río Mayo	Sinaloa	0.7	0.1	-1.0	-9.2	-7.7	-10.6
DR 63 Guasave	Sinaloa	-7.9	-10.7	-11.8	-14.5	-12.2	-21.7
DR 75 Río Fuerte	Sinaloa	-26.7	-21.1	-24.7	-24.8	-24.2	-22.7
DR 76 Valle del Carrizo	Sinaloa	-41.2	-39.3	-39.1	-39.4	-36.5	-38.3
DR 84 Guaymas	Sonora	13.8	16.5	14.4	13.4	15.9	12.8

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General.

Como respuesta al incremento presentado en el índice climático (IHT), la disponibilidad de agua expresada de acuerdo al índice K_{hidr} , presenta una tendencia a disminuir. Las disminuciones alcanzan un 82% de los lugares analizados (escenario A2 ECHAM5/MPI). Los municipios más afectados son Villa de Arriaga en San Luis Potosí (-44%) en el escenario B1-GFDL-CM-2.0, Ixcaquixtla Puebla (-26 a 44%) según escenario.

⁶ Sólo cuando la lámina del mes anterior fuera mayor a la lámina de riego del mes de siembra

Los volúmenes de agua disponibles en las presas que abastecen a los distritos de riego dependen de la precipitación que se recibe anualmente, por lo tanto, si se prevén cambios en los patrones de precipitación como consecuencia del cambio climático se sugiere que la disponibilidad del agua para las zonas irrigadas en cada distrito podría resultar perjudicada. En el cuadro anterior, se muestran los cambios en el índice de disponibilidad de agua (K_{hidr}) también par aquellos Distritos de Riego con producción de frijol.

El Distrito de Riego donde se esperan mayores impactos de signo negativo es en el 076 Valle de Carrizo, donde se proyectan hasta en un 41%. Dicho distrito también presentó cambios negativos bajo los escenarios trabajados en el 2008 (Terrazas *et al.*, 2010), sin embargo, bajo los actuales escenarios la disminución es mayor. En el análisis se observa que existe poca variación entre escenarios y entre modelos, por lo tanto, el promedio de disminución oscila de 9% (Escenario B1-GFDL-CM-2.0) a 14 % (A2-ECHAM5/MPI).

Los valores de K_{hidr} tienen un valor entre 0 y 1.0; valores más cercanos a cero indican condiciones de déficit de agua en las plantas y valores cercanos a 1.0 indican equilibrio entre la lámina de agua precipitada y el agua evapotranspirada por el cultivo.

5.3.3. Estimación de la alteración de la fertilidad del suelo, atribuible al cambio climático

En la Figura 4 se presentan las gráficas de distribución del índice de fertilidad del suelo agrícola de temporal (F_v^{2000}) y bajo riego (F_r^{2000}) en los terrenos ocupados con frijol en función del índice climático (IHTv2000) para las condiciones climáticas al inicio del siglo XXI. El análisis previo mostró que la distribución del índice de fertilidad del suelo ocupado con frijol en condiciones de temporal y de riego estadísticamente coinciden con el mismo índice para los terrenos en las mismas condiciones ocupados por los cultivos de maíz y trigo (Terrazas *et al.*, 2010) posiblemente esto se explica por razón de que en los terrenos de temporal los fertilizantes casi no se aplican para todos éstos cultivos, mientras que las dosis anuales de fertilizantes para los mismos cultivos bajo condiciones de riego son casi iguales.

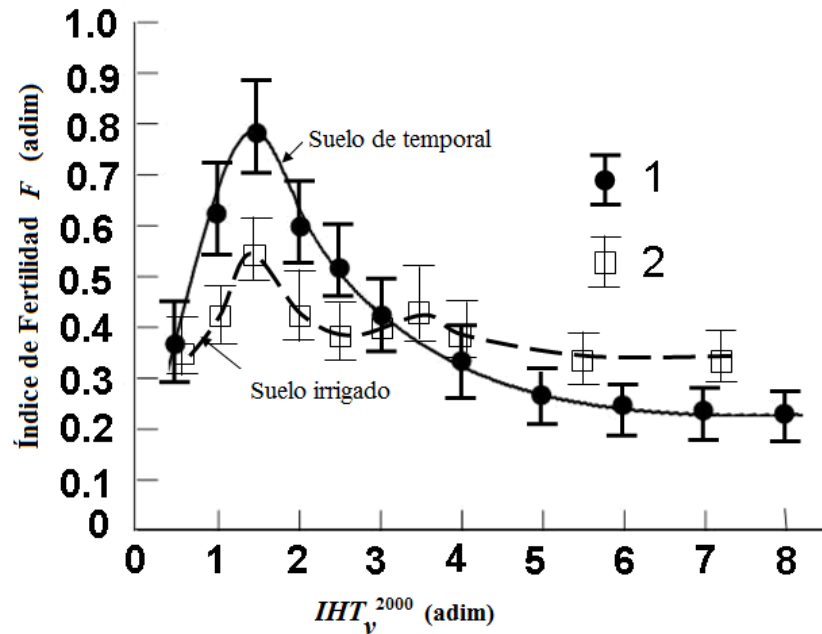


Figura 4. Dependencia de los valores modales del índice integral de fertilidad F_v^{2000} del suelo temporal y F_r^{2000} del suelo irrigado en los terrenos con frijol en función del índice climático IHT_v^{2000} al inicio del siglo XXI. Las gráficas corresponden a los terrenos con pendientes menores a 3% y ubicados en diferentes zonas climáticas del país en altitudes de 5 a 2,450 m. 1 y 2 – los intervalos de confianza de variación del índice integral de fertilidad del suelo virgen e irrigado, respectivamente.

Según la Figura 4, los suelos vírgenes más fértiles en México se encuentran en las zonas con clima semihúmedo, donde la precipitación promedio anual es alrededor de 1300 mm y el IHT_v^{2000} de 0.75 a 3 (regiones de los estados de Guanajuato, Michoacán, Chiapas, Veracruz, Campeche y Colima).

En estas regiones el índice F_v^{2000} varía entre 0.4 y 0.8. Los valores del F_v^{2000} varían de 0.23-0.4 en las zonas áridas donde el $IHT_v^{2000} > 3$ y de 0.35-0.4 en las zonas húmedas donde el $IHT_v^{2000} < 0.75$. Los suelos regados son un poco más fértiles que los suelos vírgenes en las zonas áridas donde el $IHT_v^{2000} > 3$ y menos fértiles que los suelos vírgenes en las zonas semiáridas y húmedas donde el $IHT_v^{2000} < 3$. Los suelos regados más fértiles se ubican en las zonas áridas donde $3 < IHT_v^{2000} < 4$. En comparación con los suelos vírgenes, la fertilidad de los suelos regados no depende tanto del cambio del índice IHT_v^{2000} . Esto se puede explicar por la alteración del suelo irrigado por la actividad agrícola y la incorporación al suelo de dosis de fertilizantes relativamente grandes, especialmente de fósforo, el cual se acumula paulatinamente en el suelo.

Por lo general, los valores del índice adimensional de fertilidad integral del suelo varían de 0.23 en suelos vírgenes ó de temporal a 0.30 en las zonas áridas y semiáridas bajo riego donde el $IHT_r^{2000} > 4$. En estas zonas se puede observar que la práctica de riego del cultivo de frijol mejora la fertilidad de los suelos irrigados. El índice F_r^{2000} en estas zonas es del orden de 0.35, mayor que de los suelos vírgenes ($F_v^{2000} = 0.25$ a 0.30). En las zonas subhúmedas y tropicales húmedas del país donde el $IHT_r^{2000} < 2.5$, el índice $F_r^{2000} = 0.33$ a 0.55 , menor que de los suelos vírgenes (0.35 a 0.8). Esto significa el impacto negativo de las prácticas de riego en frijol sobre el suelo en las zonas donde el $IHT_r^{2000} < 2.5$. En la publicación de Tetumo, *et al.*, (2001) se realizó el análisis de las láminas anuales de riego desde el punto de vista de su impacto sobre el suelo y se ha señalado que en algunos distritos de riego de México este impacto aún en caso de aplicación del agua de buena calidad es negativo, debido al deterioro de las condiciones microclimáticas de formación del suelo, lo que causa su degradación paulatina a largo plazo.

Analizando la forma de las gráficas $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$ y $F_r^{2000}(IHT_r^{2000})$ se puede concluir que los suelos vírgenes e irrigados más susceptibles al cambio climático se encuentran en las zonas climáticas semiáridas, semihúmedas y tropicales del país, donde el índice climático varía dentro del intervalo $0 < IHT_v^{2000} < 2.5$.

Las gráficas $F_v^{2000}(IHT_v^{2000})$ y $F_r^{2000}(IHT_r^{2000})$ la Figura 4, se han utilizado para evaluar los cambios en la fertilidad de los suelos agrícolas bajo temporal y riego de México debido al cambio climático global. Con la ecuación (5.20) se han calculado los índices de fertilidad $F_{r,v}^{2050}$ correspondientes a las nuevas condiciones climáticas con el índice $IHT_{r,v}^{2050}$ a mediados del siglo XXI. En el Cuadro 3 se presentan los resultados de comparación de los cambios relativos de este índice: $\Delta F_{r,v} = (F_{r,v}^{2050} - F_{r,v}^{2000})100 / F_{r,v}^{2000}(\%)$. Se han utilizado tres escenarios climáticos para mediados del siglo XXI según los modelos de circulación atmosférica ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0.

Los principales resultados de los cambios en el índice de fertilidad del suelo para el cálculo de la productividad de frijol de temporal y bajo riego se muestran en el siguiente cuadro y en **Anexo G**.

Cuadro 6. Cambios en el índice de fertilidad ($\Delta F_a\%$) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal y de riego para algunos municipios y Distritos de Riego de México, para dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio y/o Distrito de Riego	Estado	Modelo GFDL			Modelo ECHAM5/MPI		
		A2	B1	B2	A2	B1	B2
Aquismón	San Luis Potosí	-50.00	-34.14	-35.14	-35.14	-22.97	-18.92
Ixcaquixtla	Puebla	24.56	-26.32	-26.32	-38.6	-26.97	-29.82
Juan Aldama	Zacatecas	-26.32	-15.79	-15.79	-15.79	-12.28	-12.28
Acatzingo de Hgo.	Puebla	-21.05	-10.53	-10.53	-27.63	-15.79	-15.79
Palmar de Bravo	Puebla	-20	-11.11	-11.11	-22.22	-17.78	-20
San Vicente Tancuayalab	San Luis Potosí	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25
Tuxpan	Veracruz	15.22	2.17	2.17	21.74	6.52	2.17
Pánuco	Veracruz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sombrerete	Zacatecas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
San Andrés Tuxtla	Veracruz	18.75	6.25	6.25	18.75	12.5	10.42
El Naranjo	San Luis Potosí	19.3	19.3	19.3	12.28	12.28	19.3
Santiago Ixcuintla	Nayarit	22.03	20.34	20.34	20.34	15.25	15.25
DR 10 Culiacán-Humaya	Sinaloa	0.00	0.00	0.00	2.78	2.78	2.78
DR 30 Valsequillo	Puebla	19.35	16.13	16.13	19.35	19.35	16.13
DR 35 La Antigua	Veracruz	3.23	3.23	3.23	0.00	0.00	0.00
DR 38 Río Mayo	Sinaloa	-7.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DR 63 Guasave	Sinaloa	2.86	2.86	2.86	2.86	2.86	5.71
DR 75 Río Fuerte	Sinaloa	20.00	7.50	15.00	15.00	15.00	7.50
DR 76 Valle del Carrizo	Sinaloa	35.14	29.73	29.73	29.73	24.32	27.03
DR 84 Guaymas	Sonora	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General.

El análisis del cuadro anterior muestra que el 30% de los sitios estudiados presentará disminuciones en el valor de la fertilidad para ambos modelos y escenarios. Los municipios más afectados serían Aquismón en el estado de San Luis Potosí e Ixcaquixtla en Puebla (-26 a 39%). El rango en los cambios con signo positivos (2 a 20%) es menor que el rango de los impactos negativos, estos cambios positivos se presentan en Tuxpan Veracruz y Santiago Ixcuintla, Nayarit.

Los distritos de riego de Río Fuerte (DR 075), Valsequillo (DR 030), y Valle del Carrizo (DR 076) resultan beneficiados con las predicciones realizadas para el 2050 con incrementos del rango de +13 a 29%.

5.3.4. Estimación del cambio en la productividad del frijol ante escenarios de cambio climático

En base a los conceptos de la ley geográfica de zonificación de suelos y otros recursos naturales así como a la teoría de formación de suelos en función de la energía solar y la precipitación (Budyko, 1974; Volobuyev, 1974). Los cambios esperados de acuerdo con los tres escenarios de cambio climático aplicado para la realización del presente trabajo, se resumen en los Cuadros 7 y 8.

Cuadro 7. Cambio en la productividad ($\Delta Y\%$) de frijol de temporal y de riego para algunos municipios y Distritos de Riego de México, para dos MCGs MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio y/o Distrito de Riego	Estado	Modelo GFDL			Modelo ECHAM5/MPI		
		A2	B1	B2	A2	B1	B2
Aquismón	San Luis Potosí	-77.79	-64.25	-65.06	-62.50	-47.52	-48.07
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	-57.53	-56.24	-57.50	-38.22	-32.09	-34.07
Palmar de Bravo	Puebla	-56.06	-46.78	-50.09	-59.34	-53.19	-57.06
Tamasopo	San Luis Potosí	-16.92	-7.05	-19.57	-26.63	-25.71	-25.02
José Azueta	Veracruz	-1.72	-25.10	-14.89	42.73	15.45	16.53
Ixcaquixtla	Puebla	15.56	-55.59	-56.76	-71.41	-55.66	-60.07
El Naranjo	San Luis Potosí	15.98	13.80	11.18	2.54	2.24	7.36
DR 10 Culiacán-Humaya	Sinaloa	16.37	18.46	129.17	8.98	13.32	7.76
DR 30 Valsequillo	Puebla	56.49	61.53	217.76	49.22	55.26	54.02
DR 35 La Antigua	Veracruz	51.99	55.07	49.31	60.08	60.85	57.28
DR 38 Río Mayo	Sinaloa	1.89	8.73	139.20	-1.32	-0.20	-5.77
DR 63 Guasave	Sinaloa	28.15	25.00	138.45	19.15	21.83	9.23
DR 75 Río Fuerte	Sinaloa	2.03	-3.11	160.26	-2.30	-2.16	-10.39
DR 76 Valle del Carrizo	Sinaloa	1.79	-0.36	175.07	-0.68	-1.03	-3.35
DR 84 Guaymas	Sonora	20.51	23.34	148.59	20.73	22.53	16.24

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General.

El análisis de los resultados del Cuadro 9 muestra que de manera general la alteración de la productividad presenta tendencia a la disminución, lo cual es similar para los tres escenarios de cambio climático en un rango de -78 a +43% dependiendo de la región. Los municipios que resultarán más afectados son Aquismón (-78%) y Villa de Arriaga (-58%) ambos en el estado de San Luis Potosí. Los incrementos que se esperan son pocos. De acuerdo con el modelo alemán, el mayor incremento se espera para José Azueta en Veracruz (43%), mientras que con el modelo inglés los mayores incrementos se esperan para el Naranjo San Luis Potosí (16%).

Lo anterior también se presenta para el cultivo de frijol bajo riego. En el Distrito de Riego 035 La Antigua en Veracruz se esperan incrementos de hasta 61%, mientras que el más afectado resulta el 075 Rio Fuerte en el que se presentan disminuciones de hasta 10%. Es decir son clasificados de incrementos medios a altos. Terrazas *et al.*, (2010) trabajó con la misma metodología y escenarios aquí desarrollados para el maíz de grano y trigo en algunos Distritos de Riego en los cuales, encontró que de manera general, el cambio en la productividad para los cultivos de maíz de grano y trigo que se proyectaban fue de -50 a +25%, en función de la región, del cultivo y de su periodo de desarrollo.

De manera general, para el cultivo de frijol en la presente investigación el cambio en la productividad fue de -3 a +62%. Para el presente trabajo en los Distritos de Riego, el escenario B1 en el modelo GFDL-CM-2.0 presentar cambios que difieren del resto de los escenarios restantes, por lo tanto no se han considerado en el presente análisis.

En los trabajos de Castillo *et al.*, (2007) y de Terrazas *et al.* (2010) se han calificado también cualitativamente cambios de la productividad de trigo y maíz con base a la escala mostrada en el Cuadro 8. Esta escala fue utilizada en el trabajo actual.

Cuadro 8. Intervalos de valores porcentuales de cambio en la productividad de frijol y trigo de temporal bajo condiciones de cambio climático global al final del siglo XXI

ΔY (%)	Categoría de Cambio	Código
- (70 a 50)	Decremento Alto	DA
- (50 a 30)	Decremento Medio	DM
- (30 a 10)	Decremento Bajo	DB
(- 10 a +10)	Cambio No Significativo	CNS
+ (10 a 30)	Incremento Bajo	IB
+ (30 a 50)	Incremento Medio	IM
+ (50 a 70)	Incremento Alto	IA

Fuente: Castillo *et al.*, (2007), modificado por Terrazas (2011)

En los anteriores trabajos en los cuales se calificó la alteración de la productividad de cultivos como el maíz y el trigo bajo temporal y riego la calificación de las disminuciones solo se clasificaron hasta Decrementos Medios -(50 a 30), para fines del presente trabajo se ha incorporado la categoría de Decremento Alto -(70 a 50). Es decir los cambios que se proyectan

son mayores respecto a los anteriores trabajos que han utilizado la metodología de la FAO-IIASA (2000) e incorporado el factor de alteración de fertilidad del suelo ($F_{v,r}$)

De acuerdo a las categorías asignadas, los cambios esperados para la productividad del frijol son decrementos de bajos a medios. Para el caso de la producción de frijol bajo riego, los dos modelos proyectan incrementos en la productividad, lo cual genera que se clasifiquen principalmente de incrementos medios a altos.

Utilizando la clasificación mencionada en el Cuadro 8 como ejemplo se presentan los mapas de cambio esperado de la productividad de frijol bajo las condiciones de temporal y de riego en diferentes partes del país a nivel del año 2050 relacionado con el cambio climático. Como ejemplo los mapas similares correspondientes a diferentes escenarios de cambio climático se presentan en anexo E.

5.4. Mapas de productividad del frijol de temporal y de riego bajo escenarios de cambio climático

El análisis de éstos mapas señala que los no existe una diferencia significativa en los predicciones de cambios de rendimientos correspondientes a diferentes escenarios climáticos.

Las áreas marcadas en estos mapas reflejan solamente los terrenos para los cuales se han hecho los cálculos de los rendimientos de frijol, mientras que los terrenos aledaños con las condiciones climáticas y edáficas similares dedicadas a la producción del mismo cultivo, esto significa que con un supuesto se puede ampliar éstas áreas marcadas en los mapas y concluir que la mayor pérdida de cosecha por el cambio climático, se espera en el estado de San Luis Potosí uno de los principales productores de frijol bajo temporal.

Para el caso de la producción de frijol bajo riego, los mapas mostrados en las Figuras 5, 6 y **Anexo H**, las áreas marcadas corresponden a la ubicación de los distritos de riego, entonces estos datos son más representativos para un uso directo. Según éstos mapas a nivel nacional por lo general, se espera crecimiento de la productividad con mayores incrementos para el distrito de riego de la Antigua en el estado de Veracruz (más del 60%), mientras en algunas partes del país

como por ejemplo en el distrito de riego 075 Río Fuerte en el estado de Sinaloa se esperan pérdidas mayores del 10%.

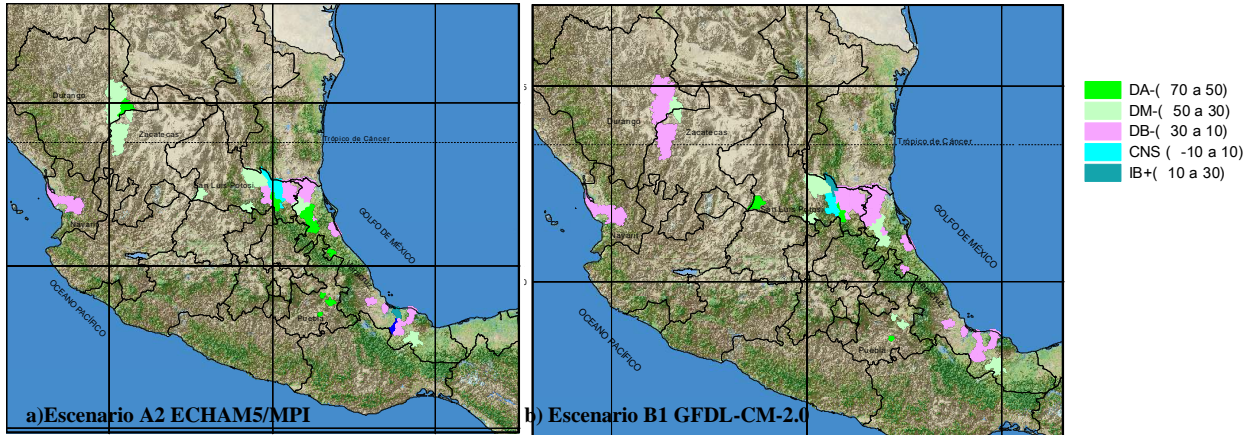


Figura 5. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de temporal de acuerdo a los escenarios de cambio climático a) A2 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 536 ppm por el MCGs ECHAM5/MPI y b) B1 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 491 ppm por el MCGs GFDL-CM-2.0 en algunos municipios de México.

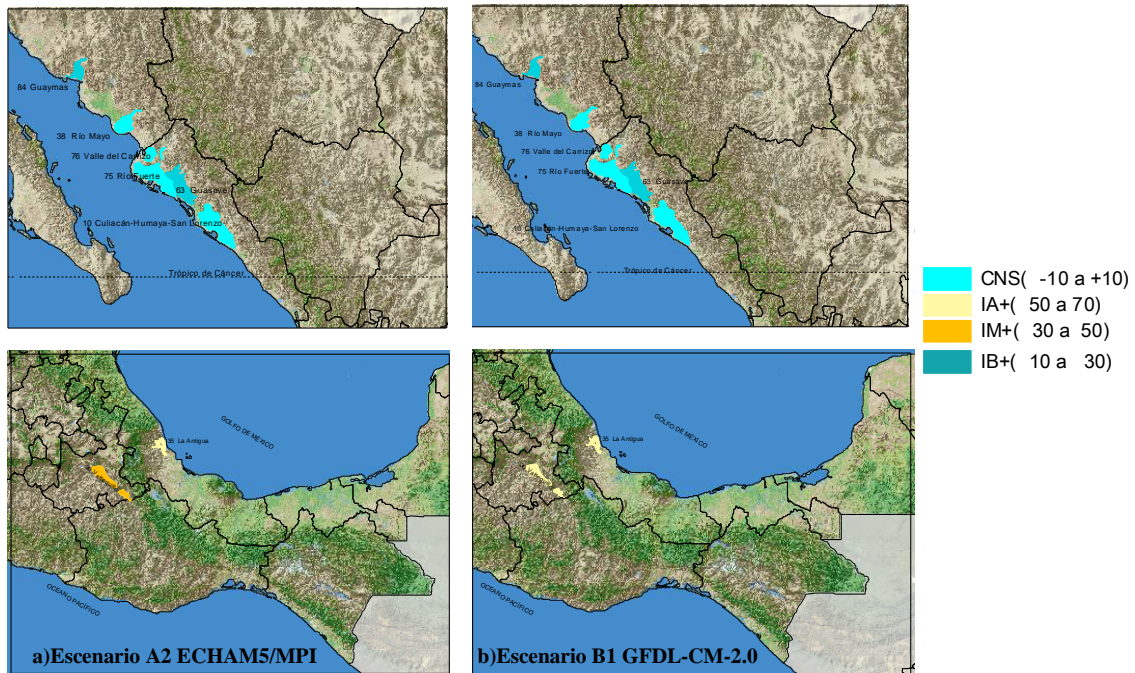


Figura 6. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de riego de acuerdo a los escenarios de cambio climático a) A2 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 536 ppm por el MCGs ECHAM5/MPI y b) B1 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 491 ppm por el MCGs GFDL-CM-2.0, en algunos Distritos de Riego en México.

5.5. Valoración integral de los resultados de estimación de cambio de productividad de frijol bajo riego y temporal

En el Cuadro 9 se presentan los resultados de estimación de cambio relativo de la productividad (ΔY) y de sus respectivos componentes ($\Delta Y_{m\acute{a}x}$, ΔK_{hidr} , ΔF_a) del cultivo de frijol bajo riego y en temporal ante escenarios de cambio climático B1 para mediados del siglo XXI en algunos Distritos de Riego y municipios de México. Los Cuadros similares correspondientes a los escenarios A2 y B2 se presentan en el **Anexo G**. Los valores (ΔY), (ΔK_{hidr}) y (ΔF_a) se han calculado con las ecuaciones (5.10), (5.18) y (5.22), respectivamente.

Cuadro 9. Cambio en las componentes de la productividad ($\Delta Y_{m\acute{a}x}$, ΔK_{hidr} , ΔF_a y ΔY) del frijol de temporal y de riego de acuerdo a los escenarios de cambio climático B1 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 491 ppm a nivel del año 2050 en algunos municipios y Distritos de Riego de México.

Municipio y/o Distrito de Riego	Estado	$\Delta Y_{m\acute{a}x}$		ΔK_{hidr}		ΔF_a		ΔY	
		GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM
Producción de frijol de temporal									
Acatzingo de Hgo.	Puebla	3.4	4	-17.7	-19.2	-10.5	-15.8	-42.1	-46.2
Aquismón	SLP	2.6	3.6	-34.1	-19	-35.1	-23	-64.2	-47.5
Chicontepéc	Veracruz	2.4	3.2	-13.8	-21.6	5.9	11.8	-37	-38.9
Chontla	Veracruz	2.5	3.3	-13.9	-15.8	0	-2.6	-15.9	-6.7
Ciudad del Maíz	SLP	3.9	4.7	-27.2	-26	0	0	-35.4	-33.4
Ciudad Valles	SLP	5.6	6.8	5.8	2.4	4.2	0	-10.5	-8
Cotaxtla	Veracruz	2.7	4.6	-5.1	-12.5	0	5.6	-24.1	-13.2
Cuencame	Durango	3.1	4.5	-8.5	-14.6	-6.7	-11.1	-27.5	-35.1
El Higo	Veracruz	2.1	4.6	-5.9	-10.5	-2.6	-6.6	-24.1	-30.2
El Naranjo	SLP	5.8	7	12.4	6.6	19.3	12.3	13.8	2.2
Espinal	Veracruz	1.9	2.6	-15.6	-23.7	5.6	5.6	-24.4	-31.2
Ignacio de la Llave	Veracruz	4.4	6	0.8	0.7	0	0	-13.8	-12.6
Isla	Veracruz	4.3	6.1	5.1	8.8	0	3.3	-29.1	-23.1
Ixcaquixtla	Puebla	4.1	4.9	-25.6	-26.9	-26.3	-26.3	-55.6	-55.7
José Azueta	Veracruz	5.5	6.1	-3	10.4	-8.3	6.7	-25.1	15.5
Juan Aldama	Zacatecas	3.1	4.6	-15.7	-12.9	-15.8	-12.3	-43.5	-28.9
Palmar de Bravo	Puebla	1.7	2.1	-15.3	-20.6	-11.1	-17.8	-46.8	-53.2
Pánuco	Veracruz	2	4.4	-4.1	-4.8	0	0	-27.3	-23.7
San Andrés Tuxtla	Veracruz	2.7	4.2	-4.3	-8.9	6.3	12.5	-16.5	-26.5
San Ciro Acosta	SLP	3.9	4.8	-23.6	-21.5	0	0	-38.6	-35.8
San Juan Evangelista	Veracruz	3	4.4	-6.8	-4.8	3.5	1.8	-32.4	-31.4
San Vicente	SLP	5	6.3	5.3	2.6	6.3	6.3	-24.6	-25.5
Santa Clara	Durango	2.9	4.2	-3.7	-11.6	0	-2.6	-31.8	-46.7
Santiago Ixcuintla	Nayarit	1.6	1.8	-16.4	-13.8	20.3	15.3	-20.2	-20.5
Sombrerete	Zacatecas	2.7	4	1.6	-8.7	0	0	-20.9	-33.1
Tamasopo	SLP	5.5	6.5	12.4	3	0	0	-7.1	-25.7
Tamuín	SLP	6.5	7.3	-4.7	-0.7	0	0	-23.7	-24.1
Tancanhuitz de Santos	SLP	5.5	6.7	8.2	1.6	-1.4	0	-14	-4
Tantoyuca	Veracruz	2.4	3.2	-15.2	-23.6	0	-2.6	-34.4	-49.7
Tempoal	Veracruz	2.3	4.9	-3.9	-12.1	0	0	-24.6	-30.2
Tepic	Nayarit	3.4	4.5	11.6	-7.2	-7	3.5	-11	-27.9
Tlacotalpan	Veracruz	4	5.8	2	9.1	0	6.7	-18.9	8.6
Tuxpan	Veracruz	1.7	3.8	-6.4	-8.7	2.2	6.5	-21.6	-19.6
Villa de Arriaga	SLP	3	3.9	-44.3	-14.7	0	0	-56.2	-32.1

Municipio y/o Distrito de Riego	Estado	$\Delta Y_{m\acute{a}x}$		ΔK_{hidr}		ΔF_a		ΔY	
		GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM
Producción de frijol de riego									
10 Culiacán-Humaya	Sinaloa	0	2.8	-0.7	-7.6	0	2.78	18.46	13.32
30 Valsequillo	Puebla	16.1	19.4	-12.2	-17	16.13	19.35	61.53	55.26
35 La Antigua	Veracruz	3.2	0	-6.5	0.1	3.23	0	55.07	60.85
38 Río Mayo	Sinaloa	0	0	0.1	-7.7	0	0	8.73	-0.2
63 Guasave	Sinaloa	2.9	2.9	-10.7	-12.2	2.86	2.86	25	21.83
75 Río Fuerte	Sinaloa	7.5	15	-21.1	-24.2	7.5	15	-3.11	-2.16
76 Valle del Carrizo	Sinaloa	29.7	24.3	-39.3	-36.5	29.73	24.32	-0.36	-1.03
84 Guaymas	Sonora	0	0	16.5	15.9	0	0	23.34	22.53

Nota: $\Delta Y_{m\acute{a}x} = (Y_{m\acute{a}x}^{2050} - Y_{m\acute{a}x}^{2000})100/Y_{m\acute{a}x}^{2000}$; $\Delta K_{hidr} = (K_{hidr}^{2050} - K_{hidr}^{2000})100/K_{hidr}^{2000}$; $\Delta F_a = (F_a^{2050} - F_a^{2000})100/F_a^{2000}$; $\Delta Y = (Y^{2050} - Y^{2000})100/Y^{2000}$. GFDL-CM-2.0 y 2) ECHAM5/MPI; Modelos de Circulación General de la Atmósfera Los símbolos 2000 y 2050 inicios y mediados del siglo XXI.

El análisis de los Cuadros 9 y presentados en el anexo F señalan que el cambio en el rendimiento potencial ($\Delta Y_{m\acute{a}x}$) para el frijol de temporal por lo general es insignificante, es decir que los cambios esperados son menores al 10%, para los dos modelos y los tres escenarios de cambio climático. El mayor efecto se espera para la producción bajo riego, con cambios en el rendimiento potencial de hasta 37% dependiendo el escenario y modelo climático. En los trabajos anteriores relacionados con estimación de vulnerabilidad de maíz y trigo de temporal y riego los cambios en este factor fueron insignificantes (Terrazas *et al.*, 2010; Herrera, 2008).

El factor hídrico (K_{hidr}) presenta gran importancia para la estimación de los rendimientos del cultivo de frijol. De manera general, más del 50% de los municipios de referencia presentan reducciones importantes en la disponibilidad del agua (más del 10 %), independientemente del escenario climático. En algunos terrenos se espera cambio de este factor hasta un 30% o más. Para la producción bajo riego, el rango de afectación por este componente va de -41 a +16% dependiendo del distrito de riego. Estos valores, son menores respecto a la afectación proyectada en estudios similares (Castillo *et al.*, 2008; Herrera, 2008, Terrazas *et al.*, 2010) para cultivos como el maíz y trigo producidos en temporal y bajo riego.

De acuerdo con los mismos cuadros, si se ignora el efecto de la alteración de la fertilidad del suelo (F_a) ante escenarios de cambio climático, en los cálculos de la productividad del frijol de temporal podría generar errores de hasta 50% para el cultivo en temporal y de un 35% para la producción bajo riego, para un horizonte de evaluación al año 2050. Dichos resultados son similares de lo encontrado por Terrazas *et al.*, 2010 para el caso del cultivo del maíz en distritos

de riego donde la omisión del factor de fertilidad del suelo (F_r) proyectaba errores de hasta un 52%.

Para la producción de frijol de temporal en los municipios analizados, la mayor vulnerabilidad al cambio climático se proyecta para el modelo GFDL-CM.2.0 en el escenario A2 con un cambio en productividad de -78 a +16%. Para la producción de frijol bajo riego la mayor vulnerabilidad al cambio climático se espera para el escenario B1 del modelo GFDL-CM-2.0 con -3 a +62%.

Los resultados de este trabajo indican que se espera mayor vulnerabilidad del frijol de temporal al cambio climático en comparación con los pronósticos hechos anteriormente por Castillo *et al.*, (2007) el cual trabajó con un cultivo de igual ruta fotosintética al frijol como lo es el trigo, la variación en resultado puede explicarse por razón del uso en este trabajo de escenarios climáticos diferentes para la estimación de la productividad potencial agrícola. Dicho autor menciona que el deterioro de la fertilidad natural de los suelos probablemente afectará negativamente la productividad de los terrenos agrícolas en algunas zonas, causando una disminución en los rendimientos hasta de 24%.

6. CONCLUSIONES

- Se ha desarrollado la metodología basada en la simulación del crecimiento del cultivo de frijol similar a la propuesta por la FAO-IASSA (2000), con el objetivo de predecir el impacto del cambio climático global sobre la producción de frijol de temporal y riego, considerando no solamente el efecto directo del cambio climático sobre el cultivo sino el efecto indirecto de la alteración de la fertilidad de los suelos sobre la productividad agrícola.
- La aplicación práctica de esta metodología en los sitios de referencia de México señala que por lo general, no existe gran diferencia entre los resultados de estimación de vulnerabilidad de la productividad del frijol correspondientes a los diferentes escenarios de cambio climático evaluados.
- El análisis de vulnerabilidad de los componentes de la productividad de los cultivos agrícolas: rendimiento potencial, índice de disponibilidad de agua en el suelo e índice de fertilidad, indica que es importante considerar la alteración de la fertilidad del suelo agrícola atribuible al cambio climático. Ignorar este factor, puede causar errores significativos en las estimaciones de los rendimientos, de hasta un 50% en la producción de frijol de temporal y hasta un 35% en caso de frijol bajo riego en algunos sitios de referencia. Esto significa que se cumplió la hipótesis número 2.
- Por lo general, el cambio en la productividad del cultivo de frijol de temporal se espera entre -78 y +43% y -3 a 62% para el frijol de riego, en función del sitio de referencia. Esto significa que se cumplieron las hipótesis número 1 y 3.

7. LITERATURA CITADA

Allen, L.H., Jr., Boote, K.J., Jones, J.W., Jones P.H., Valle, R. R., Acock, B., Rogers H.H., y Dahlman, R.C. Response of vegetation to rising carbon dioxide: Photosynthesis, biomass, and seed yield of soybean. *Global Biogeochemical Cycles*, Vól. 1 Núm 1, Marzo 1987, pp. 1-14

Akita, S. and D.N. Moss. 1973. Photosynthetic responses to CO₂ and light by maize and wheat leaves adjusted for constant stomatal apertures. *Crop Science*, 13:234-237.

Bautista, C. A., Etchevers B. J., Del Castillo R. F., Gutiérrez C. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13(2), Mayo 2004, pp. 90-97

Bhatti, J.S., R. Lai, J.M. Apps, and M.A. Price. 2006. *Climate change and managed ecosystems*. CRC Pres. Taylor & Francis, 446 p.

(BID) Banco Interamericano de Desarrollo. 2010. Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático Diagnóstico inicial, avances, vacíos y potenciales líneas de acción en Mesoamérica. Banco Interamericano de Desarrollo Unidad de Energía Sostenible y Cambio Climático, Departamento de Infraestructura y Medio Ambiente. NOTAS TÉCNICAS # IDB-TN-144. Dirección URL: < <http://www.iadb.org> > [Consulta: 14 Febrero 2011]

Benacchio, S.S. 1982. Algunas Exigencias Agroecológicas en 58 Especies de Cultivo con Potencial de Producción en el Trópico Americano. FONAIAP Centro Nacional de Investigación Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Venezuela. 202 p.

Budyko, M.I. 1974. *Climate and life*. Academia Press. New York. 508 p.

Castillo A. M., Nikolskii G. I., Ortiz S. C.A, Vaquera H.H., Gustavo Cruz B. G. y Mejía S. E. y González H. A. 2007. Alteración de la fertilidad del suelo por el cambio climático y su efecto en la productividad agrícola. *Interciencia*. Vol. 32, número 6, Junio 2007, pp. 368-376.

Chang, C. C. 2002. The potential impact of climate change on Taiwan's agriculture. *Agric. Econ.* 27, 51-64.

CICC, 2006. *Hacia una Estrategia Nacional de Acción Climática*. Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, SEMARNAT. México

Cline, W., R. 2007. *Global warming and Agriculture: Impact estimates by Country*. Massachusetts Avenue, NW Washington, DC 20036. [Documento en línea]. Dirección URL <<http://www.petersoninstitute.org>> [Consulta: 17 Marzo 2011]

Comisión Nacional del Agua, 2010. *Estadísticas del agua en México 2010*. [Documento en línea]. Dirección URL: < <http://www.agua.org.mx> > [Consulta: 15 Enero 2011]

Conde, C., O. Sanches y C. Gay. 1994. Escenarios básicos y regionales. Estudio de País: México, México ante el cambio climático. En *Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México*. México

ante el cambio climático. Pp. 39-44, INE, U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, UNAM, 18 al 22 de abril de 1994, Cuernavaca, Morelos, México.

Conde, C., R. M. Ferrer y D. Liverman. 2003. Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo Ceres - Maize. En: Gay C (Ed.). 2003. Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. UNAM. México. 220 p. [Documento en línea]. Dirección URL <<http://ccaunam.atmosfcu.unam.mx/cambio/libro.html>>

Conde, C., B. Martínez, O. Sánchez, F. Estrada, A. Fernandez, J. Zavala, C. Gay. 2008. Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América Temperatura y Precipitación. [Documento en línea]. Dirección URL: <http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=74>

Conde, C., B. Martínez, O. Sánchez, F. Estrada, A. Fernández, J. Zavala, C. Gay. 2008 Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América. Temperatura y Precipitación. [Documento en línea]. Dirección URL <www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=74>

Contreras B., J. A. 2000. Estimación del índice hidrotérmico local (IHT) en la República Mexicana. Tesis de Maestría en Ciencias. Especialidad de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 59 p.

Contreras B.A., G.I. Nikolskii, N.L. Aceves, R.R. Arteaga, M.M. Escalona, R.D. Fernández. 2002. Pronóstico del cambio en algunas propiedades de los suelos agrícolas al modificarse las condiciones microclimáticas. *Agrociencia* 36: 267-277.

Crispín, M.A. y Miranda, S. 1978. El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). En: Producción de Granos y Forrajes. Edit. Limusa. México, D.F. pp. 541-552

Debouck, G.D y Hidalgo, R. 1985. Morfología de la planta de frijol común. In: Frijol, investigación y producción. Compilado y editado por M. López Fernández y A. Schoonhoven. CIAT. Cali, Colombia. pp. 7-42

De Santa Olalla M., F. M., P. López F. y A. Calera B. (Eds.). 2005. Agua y agronomía. Mundi-Prensa. España. 606 p.

Doorenbos, J y Kassam, A.H. 1979. Efectos del Agua Sobre el Rendimiento de los Cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje Núm. 33. FAO. Roma. Italy 212 p.

Ewert, F. 2004. Modelling Plant Responses to Elevated CO₂: How Important is Leaf Area Index?. *Annals of Botany*, Volumen 93, Ussue 6. Pp. 619-627. URL <<http://aob.oxfordjournals.org/content/93/6/619.short>> [Consulta: 17 Febrero 2011]

FAO. 1994. ECOCROP 1. The adaptability level of the FAO crop environmental requirements database. Versión 1.0. AGLS. FAO. Rome, Italy.

FAO (Food and Agriculture Organization), 2003: World Agriculture Towards 2015/2030. http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/004/y3557e/y3557e00.htm.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2008). Climate change adaptation and mitigation: Challenges and opportunities for food security. In: High-level conference on world food security: The challenges of climate change and bioenergy. Rome, 3 – 5 June 2008

FIRA, 2001. Guillermo Sánchez Rodríguez, José Antonio Manríquez Núñez, Fernando Antonio Martínez Mendoza e Luis Ángel López Ibarra. FIRA Boletín Informativo Núm. 316 Volumen XXXIII 9a. Época Año XXX Mayo 2001 El Frijol en México Competitividad y Oportunidades De Desarrollo.

Frantz M. J., Commetti, N. N and Bugbee B. Night temperature has a minimal effect on respiration and growth in rapidly growing plants. *Annals of Botany* 94. Mayo 2004, pp. 155-166.

Gaucín P. D.D y Torres G.E. 2009. Panorama Agroalimentario del Frijol. Dirección General Adjunto de Inteligencia Sectorial-Dirección de Análisis Económico y Sectorial de Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura(FIRA).Documento en línea. <<http://www.fira.gob.mx/InfEsp/Paginar.jsp?app=IECO&tema=9>> [Consulta: 02 Enero 2011]

Gay C (Ed.). 2003. Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. UNAM, México. 220 pp. <http://ccaunam.atmosfcu.unam.mx/cambio/libro.html> Gay, C., C. Conde, O. Sánchez. 2006a. Escenarios de Cambio Climático para México. Temperatura y Precipitación. http://www.atmosfera.unam.mx/cambio/escenarios/escenarios_3A_mapas_y_datos.htm

Gay, C., F. Estrada, C. Conde, H. Eakin y L. Villers. 2006. Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Climate Change*, 79:259-288.

Hansen, J., L. Nazarenko, R. Ruedy, M. Sato, J. Willis, A. Del Genio, D. Koch, A. Lacis, K. Menon, S. Lo, T. Novakov, J. Perlwitz, G. Russell, G. A. Schmidt y N. Tausnev. 2005. Earth's Energy Imbalance: Confirmation and Implications. *Science*, 308: 1431-1435.

IMTA. Extractor rápido de información climatológica de México ERIC III. Publ. CNA-IMTA. Base de datos en CD, v.1.0. 2006.

INIFAP, 2003. Catalogo de cultivos por región agroecológica y su demanda óptima de agua. 68 Pag.

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 [Equipo de redacción principal: Pachau R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

IPCC, 2007 b: Resumen para Responsables de Políticas. En, Cambio Climático 2007: Impactos y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido

IPCC, 2007c. General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment (TGICA). Página 10

IPCC-WGI:2007: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt,: Resúmen Técnico. En: Cambios Climáticos 2007: Base Física de la Ciencia. Aportes del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambios Climáticos [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos. Pag.69.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2009) The Intergovernmental Panel on Climate Change. Dirección URL:<: <http://www.ipcc.ch> >[Consulta: 22 Septiembre 2009].

Kaufmann, R. and S. Snell. 1997. A biophysical model of corn yield: Integrating climatic and social determinants. American Journal of Agricultural Economics 79, 178–190

Keeling, C.D., R.B. Bacastow, and T.P. Whorf, Measurements of the concentration of carbón dioxide at Mauna Loa Observatory, Hawaii, Carbon Dioxide Review: 1982, edited by W.C. Clark, pp 377-385, Oxford University Press, New York, 1982.

Lambreva, M. Stoyanova-Koleva D., Baldjiev G, Tsonev T. Early acclimation changes in the photosynthetic apparatus of vean plants during short-term exposure to elevated CO_2 concentration under high temperature and light intensity Agriculture Ecosystem & Environment 106, 2004, pp. 219-232

Lobell, D. B., J. I. Ortiz-Monasterio, G. P. Asner, P. A. Matson, R. L. Naylor y W. P. Falcón. 2005. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. Field Crops Research 94:250-256.

Lépiz, I. R. 1983. Origen y descripción botánica. En: Frijol en el Noroeste de México. Tecnologías de Producción. SARH-INIA-CIPAC. CAEVACU. CPIPEAS. Culiacán, Sin., México. 29 p.

Martin, D.L., J.R. Gilley, O.W. Baumer. 1993. Water requirements for irrigation. En National Engineering Handbook. Chapter 2, part 623 (section 15). USDA. Washington, EEUU. 405 p.

Nacional Autónoma de México. Dirección URL: <http://www.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/2010_guia%20escenarios_cc.pdf> [Consulta: 22 Julio

Monge, L. 1981. Cultivos Básicos. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. 219-260 pp.

McSweeney, C., New, M. y Lizcano, G. 2008. Change Country Profiles. Mexico. United Nations Development Programme. Funded by the National Communications Support Programme (NCSP) and the UK Department for International Development (DfID). Dirección URL:< <http://country-profiles.geog.ox.ac.uk> > [Consulta: 15 Febrero 2011]

Newton, P. C. D., R. Andre C., G. R. Edwards y P. A. Niklaus. 2007. *Agroecosystems in a changing climate*. CRC Taylor & Francis. New York. 364 p.

Nikolskii G., I., O. Bakhlaeva E., A. Contreras B., y Ch. V. Ordaz. 2001. *Assesment of changes in soil properties as dependent on hydrotermic conditions of plowlands (by the example of Mexico)*. *Eurasian Soil Science*, 35: 1031-1036.

Nikolskii, Yu.N., Castillo-Alvarez, M., Bakhlaeva, O.S, Roman-Caballero, X.A., and Maslov, B.S. *The influence of the possible global climate change on the properties of Mexican soils*. *Eurasian Soil Science*. Vól. 39, núm. 11, 2006, pp. 1164–1169.

Ortiz S.C.A. 1982. *Agrometeorología Cuantitativa*. Dpto. de Suelos, Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. 221 p

Parry, M., 1993. *Climate change and the future of Agriculture*. *International Journal of Environment and Pollution*, Vol. 3, Nos. 1 - 3, pp. 13-30.

Pegov, C.A., P.M. Jomyakov. 1991. *Modelación del desarrollo de los sistemas ecológicos*. *Gidrometeoizdat*. San Petersburgo, Rusia. 223 pp.

Peng Shaobing, Huang Jianliang, Sheehy J.E, Laza R.C, Visperas, R.M, Zhong X., Centeno G.S., Khush G. V and Cassman K. G. *Agricultural Sciences*, vol. 101 num. 27, Julio 2004, pp. 9971-9975

Rodríguez C y Maldonado F.D.J.1983. *Tecnología de producción*. En: *Frijol en el Noroeste de México*. SARH-INIA-CIPAC-CAEVACU-CPIEAS. Culiacán, Sin., México. pp. 71-98.

Roger, H.H; Bingham, G.E; Cure, J.D; Smith, J.M and Surano, K.A. 1983. *Responses of selected plant species to elevated carbon dioxide in the field*. *J. Environ. Qual.*, Vol 12, no 4. Pag 569-574

Rosenzweig, C., F.N. Tubiello, R. Goldberg, E. Mills and J. Bloomfi eld, 1993: *Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change*. *Global Environ. Chang.*, 12, 197–202.

Sage, R.,F., Sharkey T. D., Seemann Jeffrey R. *Acclimation of photosynthesis to elevated CO₂ in five C3 species*. *Plant Physiology*, Vol. 89, num 2. Febrero, 1989,pp. 590-596.

Sánchez, E. P., Larque S. A., Nava, S. T. y Trejo C. *Respuesta de plantas de maíz y frijol al enriquecimiento de dióxido de carbono*. *Agrociencias* Vól. 34, núm. 003. Mayo-Junio 2000, pp. 311-320.

Schwartz, F.H y Gálvez, E.G. 1980. *Problemas de Producción del Frijol: Enfermedades, Insectos, Limitaciones Edáficas y Climáticas de Phaseolus vulgaris*. CIAT. Cali, Colombia. 344 p

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).2007. Dirección URL: <http://www.campomexicano.gob.mx/portal_sispro/index >[Consulta: 25 Julio 2009]

Sistema de Seguimiento, Monitoreo y Evaluación del Desarrollo Rural Sustentable Municipal. Secretaría De Agricultura y Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera. Dirección URL: < <http://www.frijol.gob.mx/index.php?portal=frijol> > [Consultada. 20 de Julio 2009]

Summerfield, R.J. y Roberts, E.H. 1985. *Phaseolus vulgaris*. In: CRC Handbook of Flowering. Volume I (Abraham H. Halevy Ed.) CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, USA. pp. 139-148.

Toledo, V. M. 1992. What is ethnoecology?: origins, scope and implications of a rising discipline. *Etnoecológica* 1:5–21.

Tetumo G., J., I. Nikolskii G., C. Ortiz, S., L. Tijerina C, R. Arteaga R. 2001. Evaluación del impacto del riego sobre algunas propiedades de suelos a través del índice hidrotérmico. *Agrociencia* 35: 137-147

Terrazas M. L., Nikolskii G. I, Herrera G. S. H. Castillo A. M. y Exebio G. A. A. Efecto de alteración de fertilidad del suelo en vulnerabilidad de frijol y trigo bajo riego al cambio climático. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. I, núm.1, enero-marzo de 2010, pp.87-102.

Vitousek. P.M. Global Environmental Change: An Introduction. *Ecologist System*. Vol 23 1992, pp.1-14

Villalobos, F. R y Retana B.J.A. 1999. Estudios de cambio climático en Costa Rica, componente agrícola, evaluación de la vulnerabilidad de la agricultura de Costa Rica al cambio climático. Ministerio del Ambiente y Energía-Instituto Meteorológico Nacional. [Documento en línea]. Dirección URL <<http://cglobal.imn.ac.cr/Pdf/adaptacion/Vulnerabilidad%20en%20Frijol.pdf>. [Consultado en marzo 2011]

White, J. W. 1985. Conceptos básicos de fisiología del frijol. En: frijol, investigación y producción. Editado por Marcoliano López, Fernando Fernández y Aart van Schoonhoven. CIAT. 43-60.

8. ANEXOS

Anexo A: Caracterización climática del escenario base (1951-1980)

Cuadro 1. Valores promedio anuales de la temperatura del aire (T^{2000}), precipitación (Pr^{2000}), radiación global (Rg^{2000}) del índice climático (IHT_v^{2000}) para el inicio del siglo XXI típico para algunos municipios con producción de frijol bajo temporal en México.

Municipio	Estado.	IHT_{EC} (adim)	Pr_{EC} (mm)	T_{EC} (°C)	Rg_{EC} (MJ m ⁻² año ⁻¹)	IHT (adim)	Pr (mm)	T (°C)	Rg (MJ m ⁻² año ⁻¹)	Altitud (m)
Acatzingo de Hgo.	Puebla	1.63	387.4	19.9	2,458	0.69	704	18.05	6,627	1,800
Aquismón	San Luis Potosí	1.74	702.7	26.8	2,743	0.32	2,248	24.43	7,081	15
Chicontepec	Veracruz	1.05	777.6	26.4	2,681	0.49	1,515	23.86	6,690	5
Chontla	Veracruz	1.46	704.5	23.5	2,785	0.54	1,420	24.27	6,812	937
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	7.88	129.2	27.5	2,884	1.53	408	21.26	7,380	1,300
Ciudad Valles	San Luis Potosí	2.6	112.8	24.1	1,690	0.18	1,359	24.32	6,807	8
Cotaxtla	Veracruz	1.23	395.2	19.7	1,384	0.27	1,229	25.93	6,191	2,240
Cuencame	Durango	2.74	290.6	19.9	3,216	2.07	330	19.01	7,035	913
El Higo	Veracruz	1.63	298.6	18.5	1,544	0.36	1,008	25.12	6,962	252
El Naranjo	San Luis Potosí	2.14	117.5	18.4	1,615	0.14	1,347	23.05	6,559	95
Espinal	Veracruz	1.25	730.4	20.1	2,722	0.51	1,520	24.53	6,735	775
Ignacio Llave	Veracruz	12.16	32	19.9	1,487	0.33	898	24.46	7,359	2,072
Isla	Veracruz	4.68	74.6	25.8	1,392	0.3	997	25.71	7,397	1,670
Ixcaquixtla	Puebla	2.16	445.1	19.8	3,113	1	679	20.95	6,754	2,259
Jose Azueta	Veracruz	2.26	140.8	25.2	1,408	0.21	1,350	25.56	7,355	355
Juan Aldama	Zacatecas	2.12	386.7	18.2	3,286	1.6	429	18.74	7,244	1,900
Palmar de Bravo	Puebla	2.72	312.3	27.8	3,543	1.52	438	14.99	7,429	1,800
Panuco	Veracruz	1.51	369.5	21.3	1,619	0.38	1,035	24.35	7,180	1,344
San Andrés Tuxtla	Veracruz	0.73	553.5	23.5	1,595	0.29	1,343	24.5	7,188	1,139
San Ciró Acosta	San Luis Potosí	9.45	167.7	22.4	2,894	1.14	591	21.78	7,434	920
San Juan Bautista	Veracruz	0.85	507	27.9	1,617	0.23	1,690	24.81	7,130	1,500
San Vicente	San Luis Potosí	2.01	147.7	22.4	1,742	0.25	1,005	23.66	7,221	2,321
Santa Clara	Durango	1.58	402.2	21.4	3,064	1.28	458	17.18	6,739	2,208
Santiago Ixcuintla	Nayarit	0.93	1207.1	16.6	2,668	0.57	1,349	26.93	7,326	160
Sombrerete	Zacatecas	1.37	469.7	24.9	2,976	1.01	561	16.62	6,668	549
Tamasopo	San Luis Potosí	1.52	170	24.2	1,742	0.13	1,892	22.99	7,019	1,254
Tamuín	San Luis Potosí	3.03	94.4	24.7	1,603	0.24	1,010	25.28	6,702	100
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	1.29	219.9	23.9	1,759	0.15	1,903	24.93	7,088	2,240
Tantoyuca	Veracruz	1.3	649.6	24.7	2,660	0.56	1,317	23.35	6,583	1,748
Tempoal	Veracruz	1.31	354.5	24.4	1,524	0.32	1,079	23.73	6,774	84
Tepic	Nayarit	0.87	938.5	18.7	2,233	0.42	1,209	19.73	6,962	60
Tlacotalpan	Veracruz	2.27	158.7	20.3	1,461	0.19	1,601	25.6	7,619	2,450
Tuxpan	Veracruz	0.67	581.4	29.5	1,440	0.24	1,493	25.28	6,201	100
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	7.94	180.4	18.2	3,334	1.73	376	15.83	6,883	17

Nota: Los datos climáticos corresponden a los valores anuales promedio al inicio del siglo XXI (durante el periodo 1951-1980). Rg^{2000} : radiación global, T^{2000} : temperatura del aire, Pr^{2000} : lámina de precipitación, e IHT^{2000} : índice climático. El subíndice EC indica el valor de la variable durante la estación de crecimiento

Anexo B: Valores y cambios de temperatura, precipitación y radiación neta durante la estación de crecimiento del cultivo de frijol, para escenarios de cambio climático en algunos municipios con producción de frijol bajo temporal en México

Cuadro 2. Radiación neta (MJ m^{-2}) durante la estación de crecimiento de frijol de temporal para algunos municipios de México, de acuerdo con dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 y bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio	Estado	Esc Actual	Modelo GFDL-CM-2.0			Modelo MPIECHAM-5		
			A2	B1	B2	A2	B1	B2
Acatzingo de Hgo.	Puebla	1,184	1,238	1,224	1,230	1,248	1,231	1,237
Aquismon	San Luis Potosí	1,770	1,829	1,816	1,825	1,854	1,834	1,843
Chicontepec	Veracruz	1,820	1,875	1,863	1,871	1,896	1,879	1,887
Chontla	Veracruz	1,888	1,948	1,935	1,944	1,968	1,951	1,960
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	1,529	1,611	1,588	1,602	1,630	1,601	1,616
Ciudad Valles	San Luis Potosí	600	639	633	639	649	641	647
Cotaxtla	Veracruz	796	817	817	820	843	833	837
Cuencame	Durango	1,661	1,734	1,714	1,729	1,781	1,737	1,754
El Higo	Veracruz	878	896	896	901	934	918	925
El Naranjo	San Luis Potosí	469	501	496	502	509	502	508
Espinal	Veracruz	1,891	1,935	1,927	1,933	1,952	1,939	1,945
Ignacio Llave	Veracruz	727	762	759	759	778	771	772
Isla	Veracruz	726	759	757	757	778	770	771
Ixcaquixtla	Puebla	1,659	1,747	1,726	1,734	1,767	1,741	1,749
Jose Azueta	Veracruz	698	733	736	737	745	740	744
Juan Aldama	Zacatecas	1,676	1,747	1,728	1,743	1,799	1,754	1,771
Palmar de Bravo	Puebla	1,628	1,665	1,655	1,659	1,675	1,662	1,666
Panuco	Veracruz	953	973	973	978	1,009	995	1,002
San Andrés Tuxtla	Veracruz	944	970	970	972	996	984	988
San Cirio Acosta	San Luis Potosí	1,649	1,737	1,713	1,726	1,759	1,728	1,742
San Juan Bautista	Veracruz	936	964	964	966	991	977	980
San Vicente	San Luis Potosí	618	654	649	655	665	657	663
Santa Clara	Durango	1,432	1,490	1,473	1,485	1,530	1,492	1,506
Santiago Ixcuintla	Nayarit	1,888	1,926	1,919	1,924	1,930	1,921	1,926
Sombrerete	Zacatecas	1,388	1,440	1,426	1,437	1,476	1,444	1,457
Tamasopo	San Luis Potosí	583	622	616	622	630	621	628
Tamuín	San Luis Potosí	603	642	642	646	652	646	653
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	678	722	715	721	732	723	730
Tantoyuca	Veracruz	1,804	1,859	1,847	1,855	1,878	1,862	1,870
Tempoal	Veracruz	849	869	868	873	906	891	897
Tepic	Nayarit	1,250	1,302	1,292	1,302	1,328	1,307	1,318
Tlacotalpan	Veracruz	746	777	776	776	796	789	790
Tuxpan	Veracruz	893	906	907	911	936	927	932
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	1,587	1,653	1,635	1,646	1,675	1,649	1,662

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General de la Atmósfera; Esc. Actual. Se refiere a los valores del escenario base a principio del siglo XXI

Cuadro 3. Cambio en la variable de radiación neta ($\Delta Rn\%$) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal para algunos municipios de acuerdo con dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0, bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio	Estado	Modelo GFDL-CM-2.0			Modelo MPIECHAM-5		
		A2	B1	B2	A2	B1	B2
Acatzingo de Hgo.	Puebla	4.6	3.43	3.88	5.46	4.02	4.51
Aquismon	San Luis Potosí	3.37	2.61	3.08	4.78	3.6	4.15
Chicontepec	Veracruz	3.01	2.38	2.81	4.18	3.25	3.71
Chontla	Veracruz	3.16	2.5	2.96	4.25	3.31	3.79
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	5.35	3.88	4.75	6.59	4.72	5.66
Ciudad Valles	San Luis Potosí	6.53	5.6	6.61	8.2	6.8	7.92
Cotaxtla	Veracruz	2.72	2.7	3.1	5.96	4.65	5.16
Cuencame	Durango	4.37	3.15	4.08	7.19	4.53	5.57
El Higo	Veracruz	2.11	2.08	2.68	6.35	4.6	5.38
El Naranjo	San Luis Potosí	6.77	5.79	7	8.46	7.03	8.39
Espinal	Veracruz	2.35	1.91	2.21	3.21	2.56	2.88
Ignacio Llave	Veracruz	4.73	4.42	4.41	6.99	5.99	6.11
Isla	Veracruz	4.53	4.31	4.29	7.13	6.12	6.23
Ixcaquixtla	Puebla	5.31	4.07	4.52	6.53	4.91	5.43
Jose Azueta	Veracruz	5.14	5.53	5.63	6.84	6.1	6.7
Juan Aldama	Zacatecas	4.23	3.1	3.98	7.3	4.65	5.67
Palmar de Bravo	Puebla	2.24	1.65	1.87	2.87	2.08	2.33
Panuco	Veracruz	2.04	2.05	2.6	5.91	4.39	5.11
San Andrés Tuxtla	Veracruz	2.68	2.69	2.94	5.49	4.22	4.57
San Ciró Acosta	San Luis Potosí	5.33	3.91	4.68	6.65	4.81	5.66
San Juan Bautista	Veracruz	3.08	3.01	3.24	5.89	4.45	4.78
San Vicente	San Luis Potosí	5.79	5.04	5.92	7.6	6.35	7.33
Santa Clara	Durango	4.07	2.86	3.74	6.84	4.2	5.21
Santiago Ixcuintla	Nayarit	1.98	1.61	1.89	2.22	1.75	2.02
Sombrerete	Zacatecas	3.72	2.73	3.51	6.33	4.05	4.96
Tamasopo	San Luis Potosí	6.53	5.5	6.54	7.95	6.48	7.64
Tamuín	San Luis Potosí	6.47	6.5	7.26	8.13	7.27	8.38
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	6.46	5.51	6.44	8.04	6.67	7.66
Tantoyuca	Veracruz	3.06	2.4	2.86	4.15	3.21	3.69
Tempoal	Veracruz	2.36	2.33	2.91	6.78	4.94	5.72
Tepic	Nayarit	4.17	3.39	4.18	6.24	4.53	5.42
Tlacotalpan	Veracruz	4.23	4.04	4	6.78	5.81	5.92
Tuxpan	Veracruz	1.53	1.67	2.1	4.87	3.83	4.42
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	4.18	3.02	3.76	5.56	3.93	4.78

Nota: $\Delta Rn = (Rn^{2050} - Rn^{2000})100/Rn^{2000}$; Los símbolos 2000 y 2050 corresponden al inicio y mediados del siglo XXI, respectivamente; MCGs: Modelos de Circulación General de la Atmósfera

Cuadro 4. Precipitación (mm) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal para algunos municipios, de acuerdo con dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 y bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio	Estado	Esc Actual	Modelo GFDL-CM-2.0			Modelo MPIECHAM-5		
			A2	B1	B2	A2	B1	B2
Acatzingo de Hgo.	Puebla	387	342	362	362	307	332	335
Aquismon	San Luis Potosí	703	623	660	660	518	586	582
Chicontepec	Veracruz	778	741	769	768	613	668	670
Chontla	Veracruz	705	659	669	676	656	653	674
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	129	130	123	123	109	119	117
Ciudad Valles	San Luis Potosí	113	134	132	137	117	119	124
Cotaxtla	Veracruz	395	345	367	373	393	401	409
Cuencame	Durango	291	243	263	262	261	272	274
El Higo	Veracruz	299	265	281	285	306	309	316
El Naranjo	San Luis Potosí	118	143	140	146	115	121	125
Espinal	Veracruz	730	640	686	682	570	624	624
Ignacio Llave	Veracruz	32	37	38	39	31	34	34
Isla	Veracruz	75	95	93	96	76	79	81
Ixcaquixtla	Puebla	445	603	488	490	378	413	409
Jose Azueta	Veracruz	141	160	154	158	163	154	160
Juan Aldama	Zacatecas	387	368	368	373	374	369	378
Palmar de Bravo	Puebla	312	296	307	307	230	255	254
Panuco	Veracruz	369	327	333	341	397	382	393
San Andrés Tuxtla	Veracruz	554	531	539	550	533	540	551
San Ciró Acosta	San Luis Potosí	168	156	163	163	109	129	128
San Juan Bautista	Veracruz	507	465	488	498	526	531	544
San Vicente	San Luis Potosí	148	187	182	189	143	151	156
Santa Clara	Durango	402	358	381	380	376	388	392
Santiago Ixcuintla	Nayarit	1207	1227	1185	1209	1282	1211	1251
Sombrerete	Zacatecas	470	474	488	488	429	450	453
Tamasopo	San Luis Potosí	170	205	201	209	173	178	184
Tamuín	San Luis Potosí	94	104	107	110	91	97	100
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	220	257	255	263	226	232	239
Tantoyuca	Veracruz	650	633	652	651	498	547	548
Tempoal	Veracruz	355	331	337	344	363	360	368
Tepic	Nayarit	939	993	988	1005	946	955	969
Tlacotalpan	Veracruz	159	199	195	201	163	169	174
Tuxpan	Veracruz	581	509	546	556	573	590	604
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	180	181	180	180	145	159	158

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General de la Atmósfera; Esc. Actual. Se refiere a los valores del escenario base a principio del siglo XXI

Cuadro 5. Cambio en la variable de Precipitación (ΔPr %) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal para algunos municipios de acuerdo con dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0, bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio	Estado	Modelo GFDL-CM-2.0-CM-2.0			Modelo MPIECHAM-5		
		A2	B1	B2	A2	B1	B2
Acatzingo de Hgo.	Puebla	-11.69	-6.61	-6.61	-20.79	-14.21	-13.48
Aquismon	San Luis Potosí	-11.34	-6.06	-6.06	-26.26	-16.62	-17.13
Chicontepec	Veracruz	-4.64	-1.06	-1.28	-21.11	-14.12	-13.85
Chontla	Veracruz	-6.45	-5.02	-4.06	-6.84	-7.34	-4.33
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	0.67	-5.09	-5.09	-15.77	-7.7	-9.59
Ciudad Valles	San Luis Potosí	19.02	16.96	21.16	3.9	5.79	9.65
Cotaxtla	Veracruz	-12.68	-7.04	-5.57	-0.62	1.38	3.5
Cuencame	Durango	-16.5	-9.51	-9.75	-10.1	-6.57	-5.61
El Higo	Veracruz	-11.1	-6.01	-4.46	2.41	3.42	5.69
El Naranjo	San Luis Potosí	21.43	19.39	24.52	-2.1	2.65	6.78
Espinal	Veracruz	-12.37	-6.09	-6.58	-22	-14.61	-14.51
Ignacio Llave	Veracruz	14.95	19.3	21.3	-3.17	5.81	7.69
Isla	Veracruz	27.54	24.76	28.3	1.79	6.54	8.96
Ixcaquixtla	Puebla	35.42	9.54	10.04	-15.16	-7.16	-8.16
Jose Azueta	Veracruz	13.75	9.08	12.24	15.64	9.28	13.58
Juan Aldama	Zacatecas	-4.75	-4.81	-3.5	-3.17	-4.57	-2.32
Palmar de Bravo	Puebla	-5.19	-1.7	-1.67	-26.31	-18.42	-18.65
Panuco	Veracruz	-11.62	-9.81	-7.82	7.34	3.43	6.44
San Andrés Tuxtla	Veracruz	-4.02	-2.63	-0.71	-3.69	-2.4	-0.46
San Ciró Acosta	San Luis Potosí	-6.84	-2.59	-2.59	-35.05	-23.12	-23.88
San Juan Bautista	Veracruz	-8.29	-3.77	-1.71	3.76	4.65	7.34
San Vicente	San Luis Potosí	26.69	23.36	27.96	-3.32	2.24	5.4
Santa Clara	Durango	-11.04	-5.32	-5.44	-6.42	-3.6	-2.57
Santiago Ixcuintla	Nayarit	1.63	-1.84	0.18	6.24	0.34	3.67
Sombrerete	Zacatecas	0.96	3.84	4	-8.66	-4.15	-3.52
Tamasopo	San Luis Potosí	20.59	18.45	22.73	1.59	4.79	8.38
Tamuín	San Luis Potosí	10.39	13.35	16.68	-3.59	2.97	6.17
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	17.02	16.01	19.5	2.72	5.6	8.7
Tantoyuca	Veracruz	-2.61	0.36	0.21	-23.38	-15.82	-15.58
Tempoal	Veracruz	-6.51	-4.83	-3.01	2.44	1.42	3.72
Tepic	Nayarit	5.8	5.27	7.09	0.77	1.75	3.3
Tlacotalpan	Veracruz	25.7	22.56	26.4	3	6.42	9.4
Tuxpan	Veracruz	-12.48	-6.17	-4.32	-1.51	1.49	3.93
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	0.48	-0.08	-0.08	-19.58	-11.86	-12.35

Nota: $\Delta Rn = (Pr^{2050} - Pr^{2000})100/Pr^{2000}$; Los símbolos 2000 y 2050 corresponden al inicio y mediados del siglo XXI, respectivamente; MCGs: Modelos de Circulación General de la Atmósfera

Cuadro 6. Temperatura (°C) durante la estación de crecimiento del frijol de temporal para algunos municipios, de acuerdo con dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 y bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO₂ para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio	Estado	Esc Actual	Modelo GFDL-CM-2.0			Modelo MPIECHAM-5		
			A2	B1	B2	A2	B1	B2
Acatzingo de Hgo.	Puebla	19.88	21.56	21.18	21.33	21.86	21.39	21.56
Aquismon	San Luis Potosí	26.58	28.1	27.7	27.93	28.59	28.04	28.3
Chicontepec	Veracruz	27.45	29.09	28.69	28.93	29.63	29.07	29.34
Chontla	Veracruz	27.93	29.42	29.16	29.21	30.09	29.62	29.71
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	24.05	25.64	25.22	25.62	26.09	25.54	25.96
Ciudad Valles	San Luis Potosí	19.41	20.45	20.32	20.48	20.75	20.53	20.7
Cotaxtla	Veracruz	25.77	26.41	26.37	26.52	27.44	26.94	27.13
Cuencame	Durango	21.62	22.65	22.47	22.64	23.62	23.03	23.24
El Higo	Veracruz	25.2	25.88	25.83	25.99	26.91	26.36	26.56
El Naranjo	San Luis Potosí	18.2	19.15	19.04	19.19	19.46	19.26	19.42
Espinal	Veracruz	27.75	29.45	29.02	29.29	29.91	29.34	29.64
Ignacio Llave	Veracruz	21.33	23.17	22.75	23.03	23	22.62	22.89
Isla	Veracruz	23.5	24.38	24.3	24.34	24.77	24.57	24.63
Ixcaquixtla	Puebla	22.4	24.06	23.65	24.01	24.67	24.08	24.47
Jose Azueta	Veracruz	22.4	23.34	23.27	23.27	23.77	23.57	23.6
Juan Aldama	Zacatecas	21.42	22.35	22.27	22.34	23.08	22.72	22.82
Palmar de Bravo	Puebla	16.64	18.02	17.74	17.94	18.53	18.1	18.32
Panuco	Veracruz	24.6	25.29	25.28	25.36	26.09	25.73	25.84
San Andrés Tuxtla	Veracruz	23.9	24.71	24.65	24.76	25.44	25.06	25.19
San Ciró Acosta	San Luis Potosí	24.7	25.87	25.58	25.78	26.44	25.98	26.2
San Juan Bautista	Veracruz	24.37	25.07	25.01	25.18	26.08	25.51	25.72
San Vicente	San Luis Potosí	18.73	19.71	19.6	19.71	20.02	19.81	19.94
Santa Clara	Durango	20.3	21.38	21.18	21.36	22.42	21.77	21.99
Santiago Ixcuintla	Nayarit	29.45	30.64	30.49	30.55	31.29	30.86	30.95
Sombrerete	Zacatecas	18.74	19.88	19.64	19.85	20.85	20.17	20.42
Tamasopo	San Luis Potosí	18.6	19.6	19.48	19.62	19.89	19.68	19.84
Tamuín	San Luis Potosí	20.47	21.89	21.63	21.87	21.99	21.7	21.94
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	20.03	20.77	20.73	20.85	21.21	21.04	21.18
Tantoyuca	Veracruz	26.86	28.41	28.04	28.28	28.95	28.42	28.68
Tempoal	Veracruz	23.7	24.47	24.4	24.53	25.32	24.87	25.03
Tepic	Nayarit	22.35	23.56	23.34	23.55	24.09	23.63	23.87
Tlacotalpan	Veracruz	22.27	23.11	23.05	23.07	23.53	23.34	23.39
Tuxpan	Veracruz	25.77	26.45	26.4	26.56	27.46	26.93	27.12
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	17.96	19.61	19.2	19.48	20.21	19.62	19.93

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General de la Atmósfera; Esc. Actual. Se refiere a los valores del escenario base a principio del siglo XXI

Cuadro 7. Cambio en la Temperatura ($\Delta T\%$) durante le estación de crecimiento del frijol de temporal para algunos municipios de acuerdo con dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0, bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio	Estado	Modelo GFDL -CM-2.0			Modelo MPIECHAM-5		
		A2	B1	B2	A2	B1	B2
Acatzingo de Hgo.	Puebla	8.47	6.54	7.31	10.01	7.62	8.45
Aquismon	San Luis Potosí	5.73	4.23	5.08	7.58	5.53	6.48
Chicontepec	Veracruz	5.97	4.5	5.39	7.92	5.88	6.89
Chontla	Veracruz	5.36	4.41	4.6	7.76	6.07	6.4
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	6.61	4.88	6.54	8.5	6.2	7.96
Ciudad Valles	San Luis Potosí	5.36	4.68	5.48	6.91	5.76	6.63
Cotaxtla	Veracruz	2.5	2.33	2.91	6.49	4.54	5.28
Cuencame	Durango	4.77	3.93	4.71	9.25	6.53	7.51
El Higo	Veracruz	2.71	2.51	3.13	6.78	4.6	5.39
El Naranjo	San Luis Potosí	5.19	4.62	5.43	6.92	5.82	6.7
Espinal	Veracruz	6.14	4.58	5.54	7.79	5.74	6.8
Ignacio Llave	Veracruz	8.61	6.63	7.94	7.8	6.05	7.28
Isla	Veracruz	3.74	3.41	3.58	5.41	4.57	4.81
Ixcaquixtla	Puebla	7.42	5.6	7.21	10.14	7.49	9.24
Jose Azueta	Veracruz	4.18	3.9	3.9	6.1	5.24	5.34
Juan Aldama	Zacatecas	4.36	3.96	4.27	7.75	6.09	6.55
Palmar de Bravo	Puebla	8.3	6.62	7.79	11.38	8.77	10.11
Panuco	Veracruz	2.8	2.76	3.1	6.07	4.6	5.06
San Andrés Tuxtla	Veracruz	3.4	3.13	3.58	6.45	4.83	5.39
San Ciró Acosta	San Luis Potosí	4.74	3.58	4.37	7.03	5.17	6.09
San Juan Bautista	Veracruz	2.87	2.65	3.33	7.03	4.69	5.53
San Vicente	San Luis Potosí	5.23	4.66	5.27	6.9	5.81	6.5
Santa Clara	Durango	5.31	4.33	5.2	10.43	7.22	8.33
Santiago Ixcuintla	Nayarit	4.04	3.54	3.74	6.25	4.78	5.08
Sombrerete	Zacatecas	6.09	4.79	5.91	11.25	7.61	8.96
Tamasopo	San Luis Potosí	5.35	4.7	5.47	6.94	5.82	6.66
Tamuín	San Luis Potosí	6.97	5.7	6.85	7.45	6.03	7.2
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	3.71	3.5	4.1	5.93	5.05	5.76
Tantoyuca	Veracruz	5.76	4.37	5.26	7.77	5.78	6.78
Tempoal	Veracruz	3.23	2.96	3.5	6.85	4.95	5.62
Tepic	Nayarit	5.39	4.41	5.37	7.8	5.73	6.79
Tlacotalpan	Veracruz	3.78	3.5	3.63	5.68	4.82	5.04
Tuxpan	Veracruz	2.67	2.45	3.06	6.56	4.5	5.27
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	9.19	6.88	8.47	12.54	9.21	10.97

Nota: $\Delta Rn = (T^{2050} - T^{2000}) / T^{2000} \times 100$; Los símbolos 2000 y 2050 corresponden al inicio y mediados del siglo XXI, respectivamente; MCGs: Modelos de Circulación General de la Atmósfera

Anexo C: Valores fisiológicos del frijol, para el cálculo del rendimiento potencial máximo en municipios con producción bajo temporal para el escenario actual y para predicciones de cambio climático

Cuadro 8. Valores fisiológicos para las estaciones climatológicas utilizadas en el desarrollo de la metodología FAO-IIASA (2000) para el cálculo del rendimiento máximo potencial ($Y_{m\acute{a}x}$) de los municipios con producción de frijol de temporal hacia un horizonte de evaluación al año.

Estación	Estado	Latitud	<i>n</i>	<i>IC</i>	<i>IAF</i>	<i>Fm</i>	Fecha de siembra
Acatzingo de Hidalgo	Puebla	18.98	100	0.23	3	30	1 abril al 9 julio
Agua Buena Tamasopo	San Luis Potosí	21.95	110	0.23	3	25.6	1 noviembre-18 febrero
Altamira Ciudad Santos	San Luis Potosí	21.67	110	0.23	3	25	1 noviembre-18 febrero
Aquismon	San Luis Potosí	21.62	100	0.23	3	34	1 noviembre-18 febrero
Atotonilco Cuencame	Durango	24.63	125	0.23	3	25	1 de junio a 3 de septiembre
Chicayan Tempoal	Veracruz	21.62	90	0.23	2.3	34.8	1 septiembre a 29 de noviembre
Ciudad Valles	San Luis Potosí	21.98	110	0.23	3	25	1 noviembre-18 febrero
Cuencame	Durango	24.9	125	0.23	3	22	1 de junio a 3 de octubre
Dobladero José Azuela	Veracruz	18.12	90	0.23	2.3	34	1 diciembre 28 de febrero
El Choy Ciudad Valles	San Luis Potosí	22	110	0.23	3	25	1 noviembre-18 febrero
El Coco Tamuin	San Luis Potosí	22.13	110	0.23	3	24	1 noviembre-18 febrero
El Higo Tempoal	Veracruz	21.77	90	0.23	2.3	35	1 septiembre a 29 de noviembre
El Naranjo Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	22.52	110	0.23	3	26	1 noviembre-18 febrero
El Olivo Panuco	Veracruz	21.83	110	0.23	3	25.6	1 noviembre 18 de febrero
El Pujal Ciudad Valles	San Luis Potosí	21.83	110	0.23	3	25	1 noviembre-18 febrero
El Refugio Antiguo Morelos	San Luis Potosí	22.38	110	0.23	3	25.6	1 noviembre-18 febrero
El Tigre Ciudad Valles	San Luis Potosí	22.23	110	0.23	3	26	1 noviembre-18 febrero
González Ortega Sombrerete	Zacatecas	23.97	120	0.23	3	26	15 de junio 13 de octubre
Ixcatepec	Veracruz	21.23	120	0.23	3	27.5	1 mayo 28 de agosto
Juan Aldama	Zacatecas	24.28	120	0.23	3	24	15 de junio 13 de octubre
La Florencia San Juan Evangelista	Veracruz	17.65	90	0.23	2.3	34.8	1 septiembre a 29 de noviembre
Las Charcas Tierra Blanca	Veracruz	18.58	90	0.23	2.3	32	1 diciembre a 28 de febrero
Los Capulines Cotaxtla	Veracruz	18.87	90	0.23	2.3	34	1 septiembre a 29 de noviembre
Los Hules Chalma	Veracruz	21.17	120	0.23	3	18	1 mayo 28 de agosto
Los Mangos Hueyapan de Ocampo	Veracruz	18.28	90	0.23	2.3	34.8	1 septiembre a 29 de noviembre
Mata de Limones Isla	Veracruz	18.1	90	0.23	2.3	34.8	1 diciembre a 28 de febrero
Melchor Ocampo Espinal	Veracruz	20.33	120	0.23	3	27.5	1 mayo 28 de agosto
Palmar de Bravo	Puebla	18.82	110	0.23	3	26	1 abril al 9 julio
Pánuco	Veracruz	22.05	90	0.23	2.3	35	1 septiembre a 29 de noviembre
Pedro Montoya Rio verde	San Luis Potosí	21.65	100	0.23	3	35	1 noviembre-18 febrero
Platón Sánchez	Veracruz	21.28	120	0.23	3	27.5	1 mayo 28 de agosto
San Francisco Rio Verde	San Luis Potosí	22.07	100	0.23	3	34.9	1 noviembre-18 febrero
San Miguel Acula	Veracruz	18.57	90	0.23	2.3	34	1 diciembre a 28 de febrero
Santa Clara	Durango	24.47	125	0.23	3	25	1 de junio a 3 de octubre
Santa Cruz Aquismón	San Luis Potosí	21.7	100	0.23	3	34.9	1 noviembre-18 febrero
Santa Rosa Ciudad Valles	San Luis Potosí	22.02	110	0.23	3	25	1 noviembre-18 febrero
Santa Trinidad Panuco	Veracruz	21.88	90	0.23	2.3	34.8	1 septiembre a 29 de noviembre
Santiago Ixcuintla	Nayarit	21.82	100	0.23	3	31	1 junio 8 sept
Sombrerete	Zacatecas	23.63	120	0.23	3	25.8	15 de junio 13 de octubre
Tamos Panuco	Veracruz	22.22	90	0.23	2.3	35	1 septiembre a 29 de noviembre
Tantizohuiche Ciudad Valles	San Luis Potosí	21.8	110	0.23	3	25	1 noviembre-18 febrero
Tantoyuca	Veracruz	21.35	120	0.23	3	19	1 mayo 28 de agosto
Tempoal de Sánchez	Veracruz	21.52	90	0.23	2.3	34.8	1 abril al 9 julio
Tepexi de Rodríguez	Puebla	18.58	110	0.23	3	23.8	1 abril al 9 julio
Tepic	Nayarit	21.5	100	0.23	3	33.8	1 julio a 8 octubre
Tuxpan de Rodríguez Cano	Veracruz	20.95	90	0.23	2.3	34	1 septiembre a 29 de noviembre
Velasco Tamuin	San Luis Potosí	22.18	110	0.23	3	24	1 noviembre-18 febrero
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	21.92	120	0.23	3	26	1 noviembre-18 febrero

Nota: *n*: días del ciclo de crecimiento del cultivo; *IC*: índice de cosecha; *IAF* Índice de Área foliar, *Fm*: Fotosíntesis máxima

Cuadro 9. Cambios en el índice de área foliar (*IAF%*) durante le estación de crecimiento del frijol de temporal para algunos municipios con dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0, bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y B2 hasta 478 ppm

Estaciones	Estado	A2	B1	B2
Acatzingo de Hidalgo	Puebla	3.78	3.58	3.53
Agua Buena Tamasopo	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53
Altamira Ciudad Santos	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53
Aquismon	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53
Atotonilco Cuencame	Durango	3.78	3.58	3.53
Chicayan Tempoal	Veracruz	3.78	3.58	3.53
Ciudad Valles	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53
Cuencame	Durango	2.9	2.75	2.7
Dobladero José Azuela	Veracruz	3.78	3.58	3.53
El Choy Ciudad Valles	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53
El Coco Tamuín	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53
El Higo Tempoal	Veracruz	3.78	3.58	3.53
El Naranjo Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53
El Olivo Panuco	Veracruz	3.78	3.58	3.53
El Pujal Ciudad Valles	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53
El Refugio Antiguo Morelos	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53
El Tigre Ciudad Valles	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53
González Ortega Sombrerete	Zacatecas	3.78	3.58	3.53
Ixcatepec	Veracruz	3.78	3.58	3.53
Juan Aldama	Zacatecas	3.78	3.58	3.53
La Florencia San Juan Evangelista	Veracruz	3.78	3.58	3.53
Las Charcas Tierra Blanca	Veracruz	3.78	3.58	3.53
Los Capulines Cotaxtla	Veracruz	3.78	3.58	3.53
Los Hules Chalma	Veracruz	3.78	3.58	3.53
Los Mangos Hueyapan de Ocampo	Veracruz	3.78	3.58	3.53
Mata de Limones Isla	Veracruz	3.78	3.58	3.53
Melchor Ocampo Espinal	Veracruz	2.9	2.75	2.7
Palmar de Bravo	Puebla	2.9	2.75	2.7
Pánuco	Veracruz	2.9	2.75	2.7
Pedro Montoya Río verde	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53
Platón Sánchez	Veracruz	3.78	3.58	3.53
San Francisco Río Verde	San Luis Potosí	2.9	2.75	2.7
San Miguel Acula	Veracruz	2.9	2.75	2.7
Santa Clara	Durango	2.9	2.75	2.7
Santa Cruz Aquismón	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53
Santa Rosa Ciudad Valles	San Luis Potosí	2.9	2.75	2.7
Santa Trinidad Panuco	Veracruz	2.9	2.75	2.7
Santiago Ixcuintla	Nayarit	3.78	3.58	3.53
Sombrerete	Zacatecas	2.9	2.75	2.7
Tamos Panuco	Veracruz	3.78	3.58	3.53
Tantizohuiche Ciudad Valles	San Luis Potosí	2.9	2.75	2.7
Tantoyuca	Veracruz	2.9	2.75	2.7
Tempoal de Sánchez	Veracruz	2.9	2.75	2.7
Tepexi de Rodríguez	Puebla	3.78	3.58	3.53
Tepic	Nayarit	2.9	2.75	2.7
Tuxpan de Rodríguez Cano	Veracruz	3.78	3.58	3.53
Velasco Tamuín	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	3.78	3.58	3.53

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General de la Atmósfera

Anexo D: Rendimiento máximo potencial ($Y_{m\acute{a}x}$) en municipios con producción de frijol bajo temporal, actual y para escenarios de cambio climático para un horizonte de evaluación al año 2050

Cuadro 10. Rendimiento Potencial Máximo ($Y_{m\acute{a}x}$) para algunos municipios con producción de frijol bajo temporal, de acuerdo con dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 y bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio	Estado	Actual	Modelo GFDL-CM-2.0 (Ton)			Modelo MPIECHAM-5 (Ton)		
			A2	B1	B2	A2	B1	B2
Acatzingo de Hgo.	Puebla	2.34	1.86	1.84	1.72	1.88	1.85	1.82
Aquismon	San Luis Potosí	1.85	1.57	1.55	1.52	1.59	1.55	1.53
Chicontepec	Veracruz	2.34	1.63	1.61	1.58	1.65	1.63	1.6
Chontla	Veracruz	1.38	1.58	1.35	1.53	1.61	1.57	1.55
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	2.3	2.04	2.04	1.99	2.1	2.07	2.02
Ciudad Valles	San Luis Potosí	1.71	1.41	1.39	1.41	1.55	1.54	1.49
Cotaxtla	Veracruz	1.6	1.98	1.28	1.45	1.54	1.51	1.48
Cuencame	Durango	1.85	1.6	1.57	1.54	1.61	1.58	1.55
El Higo	Veracruz	1.74	1.47	1.45	1.42	1.48	1.45	1.43
El Naranjo	San Luis Potosí	1.86	1.61	1.58	1.55	1.62	1.59	1.56
Espinal	Veracruz	1.85	1.6	1.57	1.55	1.62	1.58	1.56
Ignacio Llave	Veracruz	2.42	2.07	2.07	2.03	2.13	2.1	2.06
Isla	Veracruz	2.4	1.63	1.62	1.58	1.66	1.64	1.61
Ixcaquixtla	Puebla	2.32	1.88	1.88	1.84	1.94	1.91	1.87
Jose Azueta	Veracruz	1.59	1.58	1.34	1.53	1.6	1.56	1.54
Juan Aldama	Zacatecas	1.47	1.37	1.17	1.33	1.4	1.37	1.35
Palmar de Bravo	Puebla	1.9	1.35	1.34	1.26	1.38	1.36	1.33
Panuco	Veracruz	1.86	1.57	1.41	1.46	1.53	1.49	1.47
San Andrés Tuxtla	Veracruz	2.64	1.93	2.17	1.87	1.95	1.9	1.89
San Ciro Acosta	San Luis Potosí	1.65	1.36	1.33	1.32	1.4	1.35	1.34
San Juan Bautista	Veracruz	2.67	1.88	1.87	1.83	1.91	1.89	1.85
San Vicente	San Luis Potosí	2.3	1.56	1.55	1.52	1.59	1.57	1.54
Santa Clara	Durango	2.69	1.68	1.9	1.63	1.71	1.67	1.65
Santiago Ixcuintla	Nayarit	1.69	1.38	1.34	1.34	1.4	1.35	1.35
Sombrerete	Zacatecas	2.41	1.76	1.88	1.72	1.8	1.77	1.74
Tamasopo	San Luis Potosí	1.76	1.3	1.46	1.26	1.32	1.27	1.27
Tamuín	San Luis Potosí	2.01	1.54	1.61	1.5	1.58	1.54	1.52
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	1.7	1.6	1.37	1.55	1.64	1.61	1.58
Tantoyuca	Veracruz	1.92	1.32	1.49	1.28	1.34	1.3	1.29
Tempoal	Veracruz	1.88	1.5	1.48	1.46	1.5	1.49	1.48
Tepic	Nayarit	2.05	1.56	1.76	1.51	1.59	1.54	1.53
Tlacotalpan	Veracruz	1.5	1.4	1.19	1.35	1.44	1.4	1.38
Tuxpan	Veracruz	1.71	1.43	1.4	1.38	1.44	1.41	1.39
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	2.71	2.14	2.13	2.08	2.18	2.15	2.11

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General de la Atmósfera; Esc. Actual. Se refiere a los valores del escenario base a principio del siglo XXI

Anexo E: Índice Climático (*IHT*) en municipios con producción de frijol bajo temporal, actual y para escenarios de cambio climático para un horizonte de evaluación al año 2050

Cuadro 11. Índice climático (*IHT*) para algunos municipios con producción de frijol bajo temporal, de acuerdo con dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 y bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio	Estado	Esc. Actual	Modelo GFDL-CM-2.0			Modelo MPIECHAM-5		
			A2	B1	B2	A2	B1	B2
Acatzingo de Hgo.	Puebla	1.63	2.22	1.98	1.99	2.34	2.02	2.08
Aquismón	San Luis Potosí	1.74	3.33	2.64	2.65	2.58	2.14	2.24
Chicontepec	Veracruz	1.05	1.43	1.22	1.23	1.67	1.34	1.36
Chontla	Veracruz	1.46	1.86	1.7	1.7	1.82	1.74	1.68
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	7.88	7.09	10.82	10.93	13.77	10.65	10.81
Ciudad Valles	San Luis Potosí	2.6	2.45	2.46	2.45	2.57	2.54	2.5
Cotaxtla	Veracruz	1.23	1.39	1.3	1.26	1.57	1.41	1.37
Cuencame	Durango	2.74	3.49	2.99	3.03	3.63	3.21	3.22
El Higo	Veracruz	1.63	1.88	1.74	1.7	2.05	1.83	1.79
El Naranjo	San Luis Potosí	2.14	1.9	1.9	1.91	2.04	2.01	2
Espinal	Veracruz	1.25	1.85	1.48	1.5	2.17	1.64	1.69
Ignacio Llave	Veracruz	12.16	14.7	12.06	12.38	12.55	12.07	11.91
Isla	Veracruz	4.68	4.46	4.45	4.48	4.31	4.3	4.24
Ixcaquixtla	Puebla	2.16	1.88	2.9	2.91	3.87	2.95	3.05
Jose Azueta	Veracruz	2.26	2.16	2.33	2.33	1.88	2.05	2
Juan Aldama	Zacatecas	2.12	2.89	2.51	2.55	2.66	2.43	2.43
Palmar de Bravo	Puebla	2.72	3.53	3.21	3.21	3.78	3.42	3.56
Panuco	Veracruz	1.51	1.66	1.58	1.56	1.65	1.59	1.56
San Andrés Tuxtla	Veracruz	0.73	0.86	0.76	0.76	0.87	0.8	0.79
San Cirilo Acosta	San Luis Potosí	9.45	14.29	12.36	12.45	15.31	12.04	12.62
San Juan Bautista	Veracruz	0.85	1	0.91	0.89	0.98	0.89	0.87
San Vicente	San Luis Potosí	2.01	1.9	1.91	1.9	2	1.96	1.92
Santa Clara	Durango	1.58	1.81	1.64	1.65	1.97	1.79	1.79
Santiago Ixcuintla	Nayarit	0.93	1.21	1.11	1.1	1.12	1.08	1.05
Sombrerete	Zacatecas	1.37	1.46	1.35	1.36	1.67	1.5	1.51
Tamasopo	San Luis Potosí	1.52	1.35	1.35	1.35	1.55	1.48	1.46
Tamuín	San Luis Potosí	3.03	3.87	3.18	3.21	3.16	3.06	3
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	1.29	1.2	1.19	1.18	1.32	1.27	1.25
Tantoyuca	Veracruz	1.3	1.8	1.53	1.55	2.19	1.7	1.73
Tempoal	Veracruz	1.31	1.53	1.37	1.36	1.69	1.49	1.48
Tepic	Nayarit	0.87	0.79	0.78	0.78	1.05	0.94	0.95
Tlacotalpan	Veracruz	2.27	2.24	2.22	2.24	2.07	2.08	2.05
Tuxpan	Veracruz	0.67	0.78	0.71	0.7	0.82	0.73	0.72
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	7.94	14.77	14.25	14.34	10.35	9.31	9.38

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General de la Atmósfera; Esc. Actual. Se refiere a los valores del escenario base a principio del siglo XXI

Cuadro 12. Cambio en el índice climático (% ΔIHT) durante le estación de crecimiento del frijol de temporal para algunos municipios de acuerdo con dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0, bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio	Estado	Modelo GFDL -CM-2.0			Modelo MPIECHAM-5		
		A2	B1	B2	A2	B1	B2
Acatzingo de Hgo.	Puebla	35.72	21.44	21.93	43.59	23.78	27.37
Aquismon	San Luis Potosí	91.76	51.77	52.54	48.61	23.5	29.11
Chicontepec	Veracruz	35.8	15.98	16.96	59.2	27.49	29.72
Chontla	Veracruz	27.68	16.1	16.26	24.66	18.81	14.75
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	-10.12	37.32	38.61	74.68	35.12	37.16
Ciudad Valles	San Luis Potosí	-5.9	-5.48	-5.8	-1.14	-2.31	-3.91
Cotaxtla	Veracruz	12.96	5.4	2.39	27.9	14.22	10.95
Cuencame	Durango	27.69	9.29	10.64	32.49	17.14	17.72
El Higo	Veracruz	15.32	6.31	3.92	25.62	11.76	9.36
El Naranjo	San Luis Potosí	-11.08	-11.06	-10.61	-4.46	-6.21	-6.76
Espinal	Veracruz	47.8	18.55	19.79	73.3	31.11	34.73
Ignacio Llave	Veracruz	20.89	-0.77	1.85	3.23	-0.68	-2.05
Isla	Veracruz	-4.75	-4.89	-4.4	-7.9	-8.13	-9.39
Ixcaquixtla	Puebla	-12.66	34.45	35	79.35	36.74	41.51
Jose Azueta	Veracruz	-4.15	3.11	3.3	-16.81	-9.4	-11.41
Juan Aldama	Zacatecas	36.29	18.66	20.17	25.52	14.85	14.7
Palmar de Bravo	Puebla	29.79	18.1	18.24	39.07	25.9	30.9
Panuco	Veracruz	9.84	4.28	3.08	8.95	5.06	3.36
San Andrés Tuxtla	Veracruz	17.8	4.52	4.28	19.73	9.74	8.37
San Ciró Acosta	San Luis Potosí	51.2	30.83	31.7	61.94	27.34	33.57
San Juan Bautista	Veracruz	17.68	7.28	4.73	16.08	5.01	2.61
San Vicente	San Luis Potosí	-5.38	-4.99	-5.3	-0.62	-2.55	-4.3
Santa Clara	Durango	14.87	3.85	4.83	25.01	13.17	13.57
Santiago Ixcuintla	Nayarit	31.1	19.61	18.96	21.37	16.07	12.92
Sombrerete	Zacatecas	6.34	-1.57	-0.68	21.76	9.54	10.49
Tamasopo	San Luis Potosí	-11.04	-11.02	-11.36	1.67	-2.94	-4.26
Tamuín	San Luis Potosí	27.56	4.89	5.73	4.12	0.74	-1.01
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	-7.06	-7.59	-8.28	2.46	-1.56	-3.31
Tantoyuca	Veracruz	38.45	17.89	18.85	68.44	30.96	33.31
Tempoal	Veracruz	16.68	4.02	3.54	28.45	13.75	12.69
Tepic	Nayarit	-9.01	-10.4	-10.66	20.61	7.71	9.12
Tlacotalpan	Veracruz	-1.36	-1.97	-1.06	-8.83	-8.32	-9.43
Tuxpan	Veracruz	16.66	6.85	4.72	22.96	9.55	7.28
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	85.91	79.42	80.46	30.3	17.17	18.03

Nota: $\Delta IHT = (IHT^{2050} - IHT^{2000})/IHT^{2000}$; Los símbolos 2000 y 2050 corresponden al inicio y mediados del siglo XXI, respectivamente; Modelos de Circulación General de la Atmósfera

Anexo F: Componentes de la productividad y productividad ($\Delta Y_{m\acute{a}x}$, ΔK_{hidr} , ΔF_a y ΔY) en municipios con producción de frijol bajo temporal, actual y para escenarios de cambio climático para un horizonte de evaluación al año 2050

Cuadro 13. Índice hídrico (K_{hidr}) para algunos municipios con producción de frijol bajo temporal, de acuerdo con dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 y bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio	Estado	Esc.Actual	Modelo GFDL-CM-2.0			Modelo MPIECHAM-5		
			A2	B1	B2	A2	B1	B2
Acatzingo de Hgo.	Puebla	0.61	0.45	0.5	0.5	0.43	0.49	0.48
Aquismon	San Luis Potosí	0.58	0.3	0.38	0.38	0.39	0.47	0.45
Chicontepec	Veracruz	0.95	0.7	0.82	0.81	0.6	0.75	0.73
Chontla	Veracruz	0.68	0.54	0.59	0.59	0.55	0.58	0.6
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	0.13	0.14	0.09	0.09	0.07	0.09	0.09
Ciudad Valles	San Luis Potosí	0.38	0.41	0.41	0.41	0.39	0.39	0.4
Cotaxtla	Veracruz	0.81	0.72	0.77	0.79	0.64	0.71	0.73
Cuencame	Durango	0.37	0.29	0.33	0.33	0.28	0.31	0.31
El Higo	Veracruz	0.61	0.53	0.58	0.59	0.49	0.55	0.56
El Naranjo	San Luis Potosí	0.47	0.53	0.53	0.52	0.49	0.5	0.5
Espinal	Veracruz	0.8	0.54	0.67	0.67	0.46	0.61	0.59
Ignacio Llave	Veracruz	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Isla	Veracruz	0.21	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23	0.24
Ixcaquixtla	Puebla	0.46	0.53	0.35	0.34	0.26	0.34	0.33
Jose Azueta	Veracruz	0.44	0.46	0.43	0.43	0.53	0.49	0.5
Juan Aldama	Zacatecas	0.47	0.35	0.4	0.39	0.38	0.41	0.41
Palmar de Bravo	Puebla	0.37	0.28	0.31	0.31	0.26	0.29	0.28
Panuco	Veracruz	0.66	0.6	0.63	0.64	0.61	0.63	0.64
San Andrés Tuxtla	Veracruz	1.38	1.17	1.32	1.32	1.15	1.25	1.27
San Ciro Acosta	San Luis Potosí	0.11	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.08
San Juan Bautista	Veracruz	1.18	1	1.1	1.13	1.02	1.12	1.15
San Vicente	San Luis Potosí	0.5	0.53	0.52	0.53	0.5	0.51	0.52
Santa Clara	Durango	0.63	0.55	0.61	0.6	0.51	0.56	0.56
Santiago Ixcuintla	Nayarit	1.08	0.82	0.9	0.91	0.89	0.93	0.96
Sombrerete	Zacatecas	0.73	0.69	0.74	0.73	0.6	0.67	0.66
Tamasopo	San Luis Potosí	0.66	0.74	0.74	0.74	0.65	0.68	0.69
Tamuín	San Luis Potosí	0.33	0.26	0.31	0.31	0.32	0.33	0.33
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	0.78	0.83	0.84	0.85	0.76	0.79	0.8
Tantoyuca	Veracruz	0.77	0.56	0.65	0.65	0.46	0.59	0.58
Tempoal	Veracruz	0.76	0.65	0.73	0.74	0.59	0.67	0.68
Tepic	Nayarit	1.15	1.26	1.28	1.28	0.95	1.07	1.05
Tlacotalpan	Veracruz	0.44	0.45	0.45	0.45	0.48	0.48	0.49
Tuxpan	Veracruz	1.49	1.28	1.4	1.43	1.22	1.36	1.39
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	0.13	0.07	0.07	0.07	0.1	0.11	0.11

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General de la Atmósfera; Esc. Actual. Se refiere a los valores del escenario base a principio del siglo XXI

Cuadro 14. Índice de fertilidad (F_v) para algunos municipios con producción de frijol bajo temporal, de acuerdo con dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 y bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio	Estado	Esc. Actual	Modelo GFDL-CM-2.0			Modelo MPECHAM-5		
			A2	B1	B2	A2	B1	B2
Acatzingo de Hgo.	Puebla	0.76	0.6	0.68	0.68	0.55	0.64	0.64
Aquismón	San Luis Potosí	0.74	0.37	0.48	0.48	0.48	0.57	0.6
Chicontepec	Veracruz	0.68	0.76	0.72	0.72	0.76	0.76	0.76
Chontla	Veracruz	0.76	0.71	0.76	0.76	0.71	0.74	0.76
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Ciudad Valles	San Luis Potosí	0.48	0.5	0.5	0.5	0.48	0.48	0.5
Cotaxtla	Veracruz	0.72	0.76	0.72	0.72	0.76	0.76	0.76
Cuencame	Durango	0.45	0.37	0.42	0.4	0.36	0.4	0.4
El Higo	Veracruz	0.76	0.71	0.74	0.76	0.64	0.71	0.74
El Naranjo	San Luis Potosí	0.57	0.68	0.68	0.68	0.64	0.64	0.68
Espinal	Veracruz	0.72	0.71	0.76	0.76	0.57	0.76	0.76
Ignacio Llave	Veracruz	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Isla	Veracruz	0.3	0.3	0.3	0.3	0.31	0.31	0.31
Ixcaquixtla	Puebla	0.57	0.71	0.42	0.42	0.35	0.42	0.4
Jose Azueta	Veracruz	0.6	0.57	0.55	0.55	0.71	0.64	0.64
Juan Aldama	Zacatecas	0.57	0.42	0.48	0.48	0.48	0.5	0.5
Palmar de Bravo	Puebla	0.45	0.36	0.4	0.4	0.35	0.37	0.36
Panuco	Veracruz	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
San Andrés Tuxtla	Veracruz	0.48	0.57	0.51	0.51	0.57	0.54	0.53
San Cirilo Acosta	San Luis Potosí	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
San Juan Bautista	Veracruz	0.57	0.59	0.59	0.58	0.59	0.58	0.57
San Vicente	San Luis Potosí	0.64	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
Santa Clara	Durango	0.76	0.71	0.76	0.76	0.68	0.74	0.74
Santiago Ixcuintla	Nayarit	0.59	0.72	0.71	0.71	0.71	0.68	0.68
Sombrerete	Zacatecas	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
Tamasopo	San Luis Potosí	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
Tamuín	San Luis Potosí	0.4	0.35	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	0.72	0.71	0.71	0.71	0.76	0.72	0.72
Tantoyuca	Veracruz	0.76	0.71	0.76	0.76	0.57	0.74	0.74
Tempoal	Veracruz	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
Tepic	Nayarit	0.57	0.54	0.53	0.52	0.68	0.59	0.59
Tlacotalpan	Veracruz	0.6	0.6	0.6	0.6	0.64	0.64	0.64
Tuxpan	Veracruz	0.46	0.53	0.47	0.47	0.56	0.49	0.47
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23

Nota: MCGs: Modelos de Circulación General de la Atmósfera; Esc. Actual. Se refiere a los valores del escenario base a principio del siglo XXI

Cuadro 15. Productividad del cultivo de frijol (*Y*) para algunos de acuerdo con dos MCGs ECHAM5/MPI y GFDL-CM-2.0 y bajo escenarios de cambio climático con crecimiento de CO_2 para A2 hasta 536 ppm, para B1 hasta 491 ppm y para B2 hasta 478 ppm.

Municipio	Estado	Actual	Modelo GFDL-CM-2.0			Modelo MPIECHAM-5		
			A2	B1	B2	A2	B1	B2
Acatzingo de Hgo.	Puebla	0.76	0.6	0.68	0.68	0.55	0.64	0.64
Aquismón	San Luis Potosí	0.74	0.37	0.48	0.48	0.48	0.57	0.6
Chicontepec	Veracruz	0.68	0.76	0.72	0.72	0.76	0.76	0.76
Chontla	Veracruz	0.76	0.71	0.76	0.76	0.71	0.74	0.76
Ciudad del Maíz	San Luis Potosí	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Ciudad Valles	San Luis Potosí	0.48	0.5	0.5	0.5	0.48	0.48	0.5
Cotaxtla	Veracruz	0.72	0.76	0.72	0.72	0.76	0.76	0.76
Cuencame	Durango	0.45	0.37	0.42	0.4	0.36	0.4	0.4
El Higo	Veracruz	0.76	0.71	0.74	0.76	0.64	0.71	0.74
El Naranjo	San Luis Potosí	0.57	0.68	0.68	0.68	0.64	0.64	0.68
Espinal	Veracruz	0.72	0.71	0.76	0.76	0.57	0.76	0.76
Ignacio Llave	Veracruz	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Isla	Veracruz	0.3	0.3	0.3	0.3	0.31	0.31	0.31
Ixcaquixtla	Puebla	0.57	0.71	0.42	0.42	0.35	0.42	0.4
Jose Azueta	Veracruz	0.6	0.57	0.55	0.55	0.71	0.64	0.64
Juan Aldama	Zacatecas	0.57	0.42	0.48	0.48	0.48	0.5	0.5
Palmar de Bravo	Puebla	0.45	0.36	0.4	0.4	0.35	0.37	0.36
Panuco	Veracruz	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
San Andrés Tuxtla	Veracruz	0.48	0.57	0.51	0.51	0.57	0.54	0.53
San Ciró Acosta	San Luis Potosí	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
San Juan Bautista	Veracruz	0.57	0.59	0.59	0.58	0.59	0.58	0.57
San Vicente	San Luis Potosí	0.64	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
Santa Clara	Durango	0.76	0.71	0.76	0.76	0.68	0.74	0.74
Santiago Ixcuintla	Nayarit	0.59	0.72	0.71	0.71	0.71	0.68	0.68
Sombrerete	Zacatecas	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
Tamasopo	San Luis Potosí	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
Tamuín	San Luis Potosí	0.4	0.35	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Tancanhuitz de Santos	San Luis Potosí	0.72	0.71	0.71	0.71	0.76	0.72	0.72
Tantoyuca	Veracruz	0.76	0.71	0.76	0.76	0.57	0.74	0.74
Tempoal	Veracruz	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
Tepic	Nayarit	0.57	0.54	0.53	0.52	0.68	0.59	0.59
Tlacotalpan	Veracruz	0.6	0.6	0.6	0.6	0.64	0.64	0.64
Tuxpan	Veracruz	0.46	0.53	0.47	0.47	0.56	0.49	0.47
Villa de Arriaga	San Luis Potosí	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23

Nota: Edo. Modelos ECHAM5/MPI-OM y GFDL-CM-2.0; escenarios climáticos B1 (491 ppm), B2 (478 ppm) y A2 (536 ppm).

Anexo G: Evaluación Integral de la productividad y sus componentes del cultivo de frijol de temporal y de riego ante escenarios de cambio climático en un horizonte de evaluación al 2050

Cuadro 16. Cambio en las componentes de la productividad y de la productividad ($\Delta Y_{m\acute{a}x}$, ΔK_{hidr} , ΔF_v y ΔY) del frijol de temporal y de riego de acuerdo a los escenarios de cambio climático **A2** en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 536ppm a nivel del año 2050 en algunos municipios y Distritos de Riego de México

Municipio y/o Distrito de Riego	Estado	$\Delta Y_{m\acute{a}x}$		ΔK_{hidr}		ΔF_v		ΔY	
		GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM
Producción de frijol de temporal									
Acatzingo de Hgo.	Puebla	4.6	5.5	-26.3	-30.4	-21.1	-27.6	-53.8	-59.6
Aquismon	SLP	3.4	4.8	-47.9	-32.7	-50.0	-35.1	-77.8	-62.5
Chicontepec	Veracruz	3.0	4.2	-26.4	-37.2	11.8	11.8	-42.8	-50.4
Chontla	Veracruz	3.2	4.2	-21.7	-19.8	-6.6	-6.6	-16.4	-12.6
Ciudad del Maíz	SLP	5.4	6.6	11.3	-42.8	0.0	0.0	-1.2	-47.7
Ciudad Valles	SLP	6.5	8.2	6.3	1.2	4.2	0.0	-8.6	-8.6
Cotaxtla	Veracruz	2.7	6.0	-11.5	-21.8	5.6	5.6	15.3	-20.6
Cuencame	Durango	4.4	7.2	-21.7	-24.5	-17.8	-20.0	-44.3	-47.3
El Higo	Veracruz	2.1	6.4	-13.3	-20.4	-6.6	-15.8	-31.6	-42.9
El Naranjo	SLP	6.8	5.6	12.5	4.7	19.3	12.3	16.0	2.5
Espinal	Veracruz	2.3	8.5	-32.3	-42.3	-1.4	-20.8	-42.3	-60.1
Ignacio de la Llave	Veracruz	4.7	3.2	-17.3	-3.1	0.0	0.0	-29.1	-14.6
Isla	Veracruz	4.5	7.0	5.0	8.6	0.0	3.3	-28.6	-22.2
Ixcaquixtla	Puebla	5.3	7.1	14.5	-44.2	24.6	-38.6	15.6	-71.4
José Azueta	Veracruz	5.1	6.5	4.3	20.2	-5.0	18.3	-1.7	42.7
Juan Aldama	Zacatecas	4.2	6.8	-26.6	-20.3	-26.3	-15.8	-49.6	-36.0
Palmar de Bravo	Puebla	2.2	7.3	-23.0	-28.1	-20.0	-22.2	-56.1	-59.3
Pánuco	Veracruz	2.0	2.9	-9.0	-8.2	0.0	0.0	-23.2	-24.6
San Andrés Tuxtla	Veracruz	2.7	5.9	-15.1	-16.5	18.8	18.8	-26.5	-26.9
San Ciro Acosta	SLP	5.3	5.5	-33.9	-38.2	0.0	0.0	-45.6	-47.7
San Juan Evangelista	Veracruz	3.1	6.7	-15.0	-13.9	3.5	3.5	-37.9	-36.1
San Vicente	SLP	5.8	5.9	5.7	0.6	6.3	6.3	-23.7	-26.0
Santa Clara	Durango	4.1	7.6	-12.9	-20.0	-6.6	-10.5	-49.1	-54.5
Santiago Ixcuintla	Nayarit	2.0	6.8	-23.7	-17.6	22.0	20.3	-23.7	-17.7
Sombrerete	Zacatecas	3.7	2.2	-6.0	-17.9	0.0	0.0	-31.2	-38.6
Tamasopo	SLP	6.5	6.3	12.4	-1.6	0.0	0.0	-16.9	-26.6
Tamuín	SLP	6.5	8.0	-21.6	-4.0	-12.5	0.0	-47.3	-24.3
Tancanhuitz de Santos	SLP	6.5	8.1	7.6	-2.4	-1.4	5.6	-0.2	-0.3
Tantoyuca	Veracruz	3.1	8.0	-27.8	-40.6	-6.6	-25.0	-53.6	-69.0
Tempoal	Veracruz	2.4	4.1	-14.3	-22.2	0.0	0.0	-31.7	-38.1
Tepic	Nayarit	4.2	6.8	9.9	-17.1	-5.3	19.3	-20.8	-23.5
Tlacotalpan	Veracruz	4.2	6.2	1.4	9.7	0.0	6.7	-5.8	12.0
Tuxpan	Veracruz	1.5	6.8	-14.3	-18.7	15.2	21.7	-17.4	-16.4
Villa de Arriaga	SLP	4.2	4.9	-46.2	-23.3	0.0	0.0	-57.5	-38.2

Municipio y/o Distrito de Riego	Estado	$\Delta Y_{máx}$		ΔK_{hidr}		ΔF_v		ΔY	
		GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM
Producción de frijol de riego									
10 Culiacán-Humaya	Sinaloa	0.0	2.8	-3.2	-11.2	0.0	2.8	16.4	9.0
30 Valsequillo	Puebla	19.4	19.4	-17.6	-20.2	19.4	19.4	56.5	49.2
35 La Antigua	Veracruz	3.2	0.0	-9.9	-2.1	3.2	0.0	52.0	60.1
38 Río Mayo	Sinaloa	-7.5	0.0	0.7	-9.2	-7.5	0.0	1.9	-1.3
63 Guasave	Sinaloa	2.9	2.9	-7.9	-14.5	2.9	2.9	28.1	19.2
75 Río Fuerte	Sinaloa	20.0	15.0	-26.7	-24.8	20.0	15.0	2.0	-2.3
76 Valle del Carrizo	Sinaloa	35.1	29.7	-41.2	-39.4	35.1	29.7	1.8	-0.7
84 Guaymas	Sonora	0.0	0.0	13.8	13.4	0.0	0.0	20.5	20.7

Nota: $\Delta Y_{máx} = (Y_{máx}^{2050} - Y_{máx}^{2000})100/Y_{máx}^{2000}$; $\Delta K_{hidr} = (K_{hidr}^{2050} - K_{hidr}^{2000})100/K_{hidr}^{2000}$; $\Delta F_v = (F_v^{2050} - F_v^{2000})100/F_v^{2000}$;
 Los símbolos 2000 y 2050 corresponden al inicio y mediados del siglo XXI, respectivamente; Modelos de Circulación General de la Atmósfera

Cuadro 17. Cambio en las componentes de la productividad y de la productividad ($\Delta Y_{m\acute{a}x}$, ΔK_{hidr} , ΔF_v y ΔY) del frijol de temporal y de riego de acuerdo a los escenarios de cambio climático **B2** en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 536ppm a nivel del año 2050 en algunos municipios y Distritos de Riego de México

Municipio y/o Distrito de Riego	Estado	$\Delta Y_{m\acute{a}x}$		ΔK_{hidr}		ΔF_v		ΔY	
		GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM	GFDL	ECHAM
Producción de frijol de temporal									
Acatzingo de Hgo.	Puebla	3.9	4.5	-18.0	-21.5	-10.5	-15.8	-46.0	-48.6
Aquismon	SLP	3.1	4.2	-34.4	-22.5	-35.1	-18.9	-65.1	-48.1
Chicontepec	Veracruz	2.8	3.7	-14.5	-22.9	5.9	11.8	-38.9	-41.1
Chontla	Veracruz	3.0	3.8	-14.0	-12.9	0.0	0.0	-4.6	-2.3
Ciudad del Maíz	SLP	4.7	5.7	-27.9	-27.1	0.0	0.0	-37.4	-35.8
Ciudad Valles	SLP	6.6	7.9	6.2	4.1	4.2	4.2	-9.1	-5.3
Cotaxtla	Veracruz	3.1	5.2	-2.3	-9.9	0.0	5.6	-11.4	-12.2
Cuencame	Durango	4.1	5.6	-9.6	-15.1	-11.1	-11.1	-33.0	-36.6
El Higo	Veracruz	2.7	5.4	-3.8	-8.6	0.0	-2.6	-21.6	-27.0
El Naranjo	SLP	7.0	8.4	11.9	7.2	19.3	19.3	11.2	7.4
Espinal	Veracruz	2.2	2.9	-16.5	-25.8	5.6	5.6	-26.5	-34.2
Ignacio de la Llave	Veracruz	4.4	6.1	-1.8	2.1	0.0	0.0	-17.9	-13.2
Isla	Veracruz	4.3	6.2	4.6	10.4	0.0	3.3	-30.9	-23.6
Ixcaquixtla	Puebla	4.5	5.4	-25.9	-29.3	-26.3	-29.8	-56.8	-60.1
José Azueta	Veracruz	5.6	6.7	-3.2	12.9	-8.3	6.7	-14.9	16.5
Juan Aldama	Zacatecas	4.0	5.7	-16.8	-12.8	-15.8	-12.3	-36.7	-30.0
Palmar de Bravo	Puebla	1.9	2.3	-15.4	-23.6	-11.1	-20.0	-50.1	-57.1
Pánuco	Veracruz	2.6	5.1	-3.0	-3.3	0.0	0.0	-24.1	-23.4
San Andrés Tuxtla	Veracruz	2.9	4.6	-4.1	-7.7	6.3	10.4	-27.8	-27.2
San Ciró Acosta	SLP	4.7	5.7	-24.1	-25.1	0.0	0.0	-39.3	-39.1
San Juan Evangelista	Veracruz	3.2	4.8	-4.5	-2.5	1.8	0.0	-33.3	-32.4
San Vicente	SLP	5.9	7.3	5.6	4.5	6.3	6.3	-26.0	-25.7
Santa Clara	Durango	3.7	5.2	-4.6	-12.0	0.0	-2.6	-42.0	-47.3
Santiago Ixcuintla	Nayarit	1.9	2.0	-15.9	-11.4	20.3	15.3	-19.8	-18.3
Sombrerete	Zacatecas	3.5	5.0	0.7	-9.5	0.0	0.0	-28.2	-34.6
Tamasopo	SLP	6.5	7.6	12.8	4.5	0.0	0.0	-19.6	-25.0
Tamuín	SLP	7.3	8.4	-5.4	1.0	0.0	0.0	-29.3	-23.6
Tancanhuitz de Santos	SLP	6.4	7.7	9.0	3.4	-1.4	0.0	-1.9	-3.9
Tantoyuca	Veracruz	2.9	3.7	-15.9	-25.0	0.0	-2.6	-44.0	-50.9
Tempoal	Veracruz	2.9	5.7	-3.4	-11.3	0.0	0.0	-25.2	-30.3
Tepic	Nayarit	4.2	5.4	11.9	-8.4	-8.8	3.5	-24.7	-29.3
Tlacotalpan	Veracruz	4.0	5.9	1.1	10.4	0.0	6.7	-9.0	8.1
Tuxpan	Veracruz	2.1	4.4	-4.5	-6.8	2.2	2.2	-21.4	-22.6
Villa de Arriaga	SLP	3.8	4.8	-44.6	-15.3	0.0	0.0	-57.5	-34.1
Producción de frijol de riego									
10 Culiacán-Humaya	Sinaloa	0.0	2.8	-4.3	-10.5	0.0	2.8	129.2	7.8
30 Valsequillo	Puebla	16.1	16.1	-12.2	-14.1	16.1	16.1	217.8	54.0
35 La Antigua	Veracruz	3.2	0.0	-8.9	0.1	3.2	0.0	49.3	57.3
38 Río Mayo	Sinaloa	0.0	0.0	-1.0	-10.6	0.0	0.0	139.2	-5.8
63 Guasave	Sinaloa	2.9	5.7	-11.8	-21.7	2.9	5.7	138.5	9.2
75 Río Fuerte	Sinaloa	15.0	7.5	-24.7	-22.7	15.0	7.5	160.3	-10.4
76 Valle del Carrizo	Sinaloa	29.7	27.0	-39.1	-38.3	29.7	27.0	175.1	-3.3
84 Guaymas	Sonora	0.0	0.0	14.4	12.8	0.0	0.0	148.6	16.2

Nota: $\Delta Y_{m\acute{a}x} = (Y_{m\acute{a}x}^{2050} - Y_{m\acute{a}x}^{2000})100/Y_{m\acute{a}x}^{2000}$; $\Delta K_{hidr} = (K_{hidr}^{2050} - K_{hidr}^{2000})100/K_{hidr}^{2000}$; $\Delta F_v = (F_v^{2050} - F_v^{2000})100/F_v^{2000}$; Los símbolos 2000 y 2050 corresponden al inicio y mediados del siglo XXI, respectivamente; Modelos de Circulación General de la Atmósfera

Anexo H: Mapas de productividad del frijol bajo riego ante escenarios de cambio climático en un horizonte de evaluación al 2050

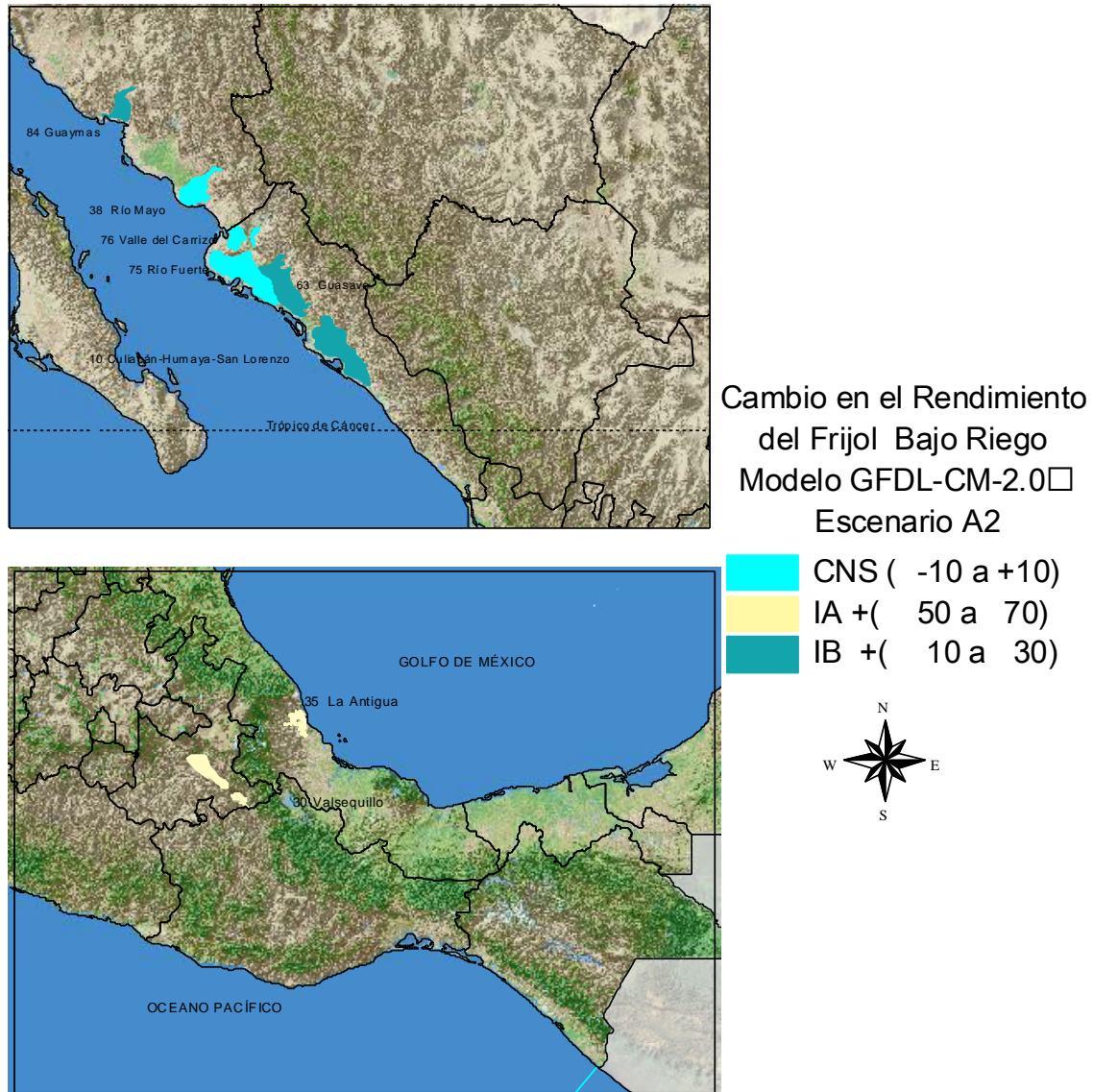


Figura 7. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de riego de acuerdo a los escenarios de cambio climático A2 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 536 ppm por el MCGs GFDL-CM-2.0 para un horizonte de evaluación al año 2050 en algunos Distritos de Riego de México

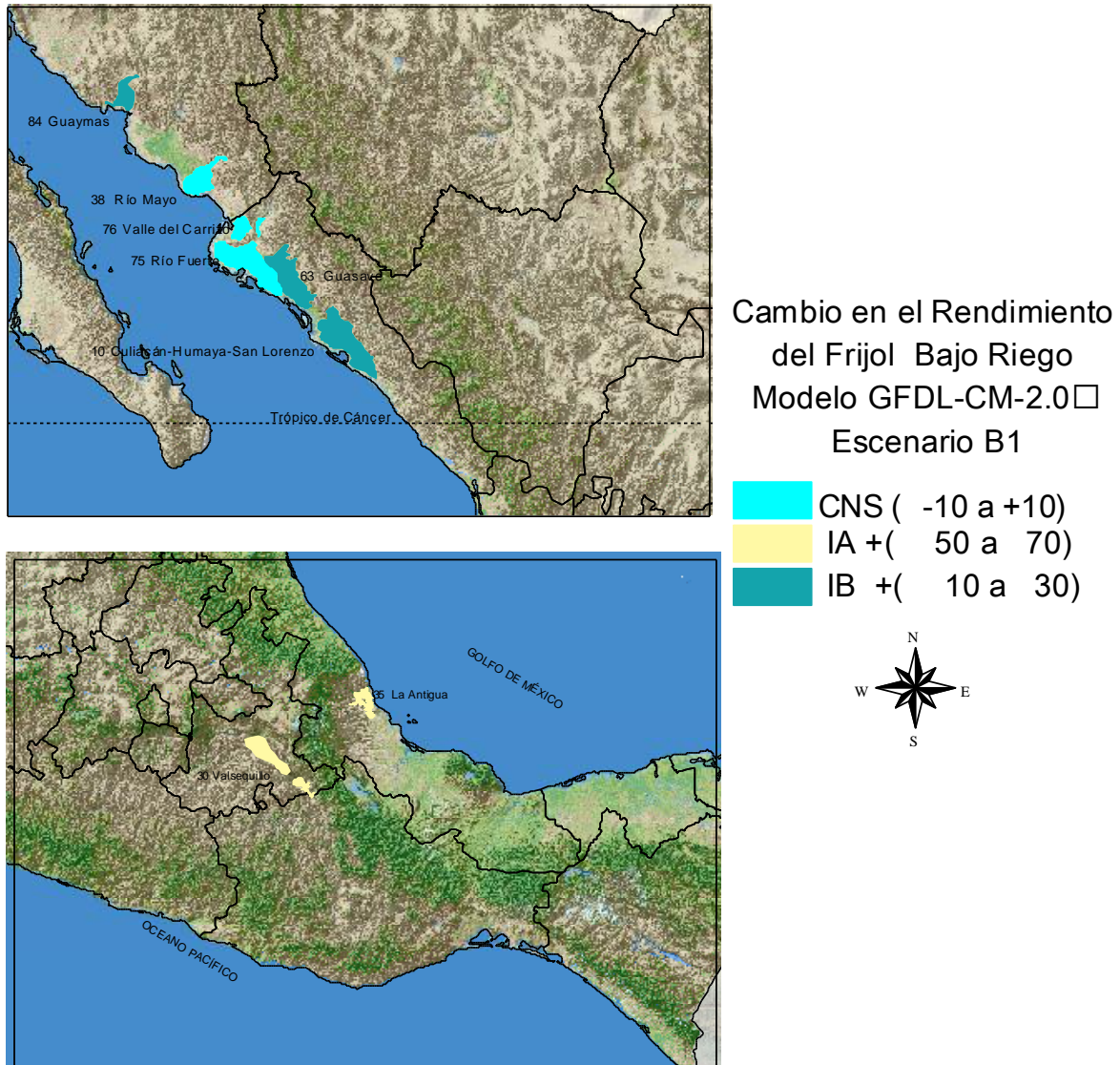


Figura 8. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de riego de acuerdo a los escenarios de cambio climático B1 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 491 ppm para el MCGs GFDL-CM-2.0 para un horizonte de evaluación al año 2050 en algunos Distritos de Riego de México

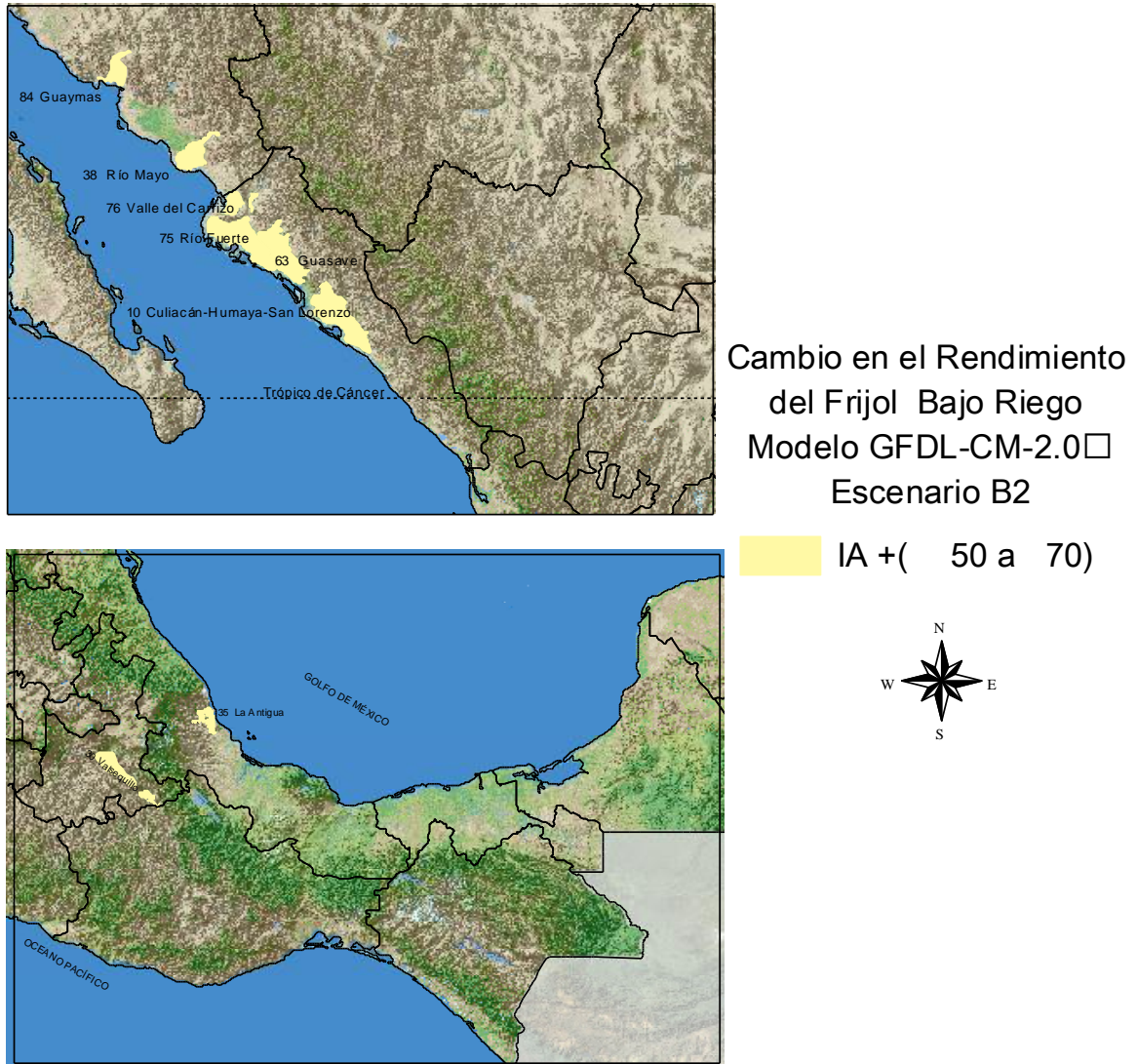


Figura 9. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de riego de acuerdo a los escenarios de cambio climático B2 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 478 ppm para el MCGs GFDL-CM-2.0 para un horizonte de evaluación al año 2050 en algunos Distritos de Riego de México

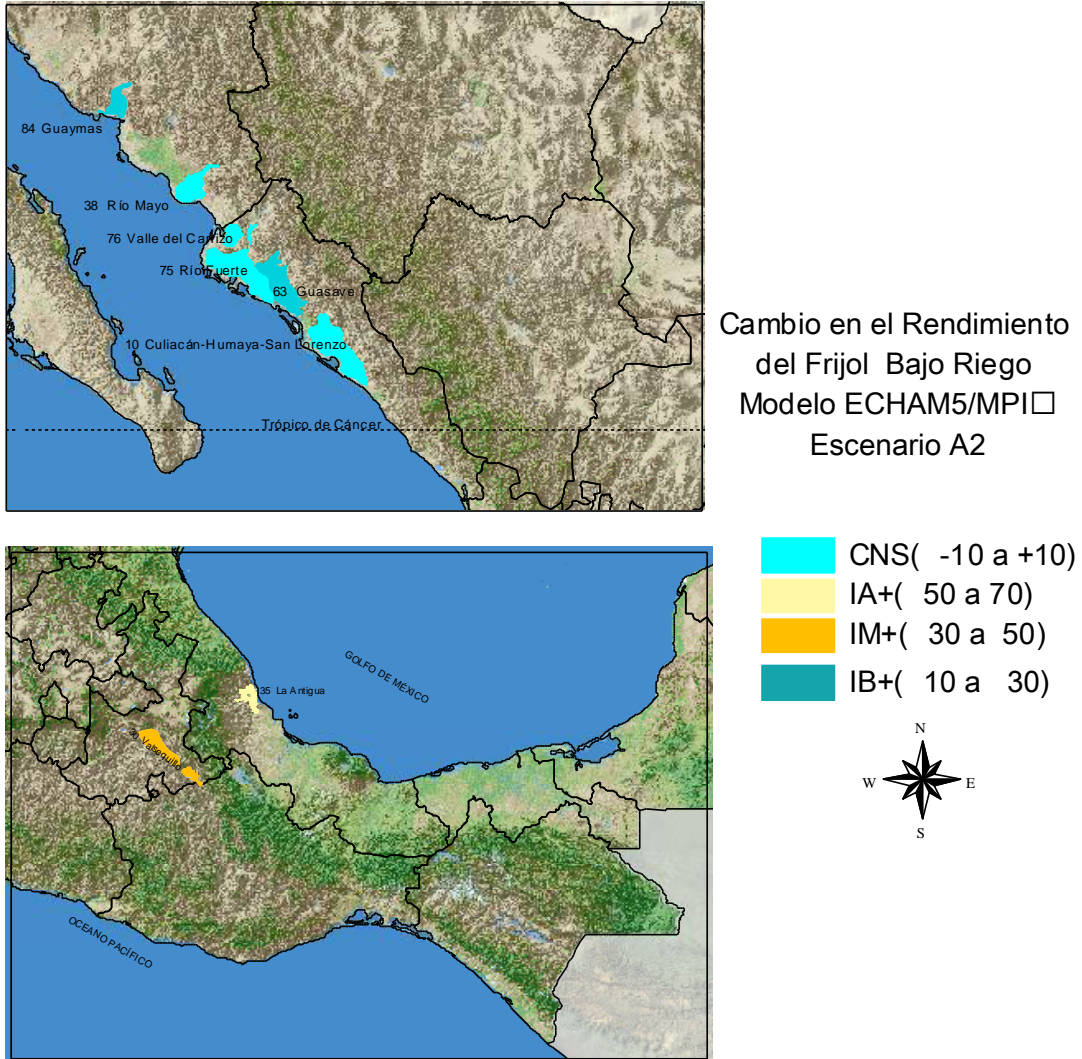


Figura 10. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de riego de acuerdo a los escenarios de cambio climático A2 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 536 ppm por el MCGs ECHAM5/MPI para un horizonte de evaluación al año 2050 en algunos Distritos de Riego de México

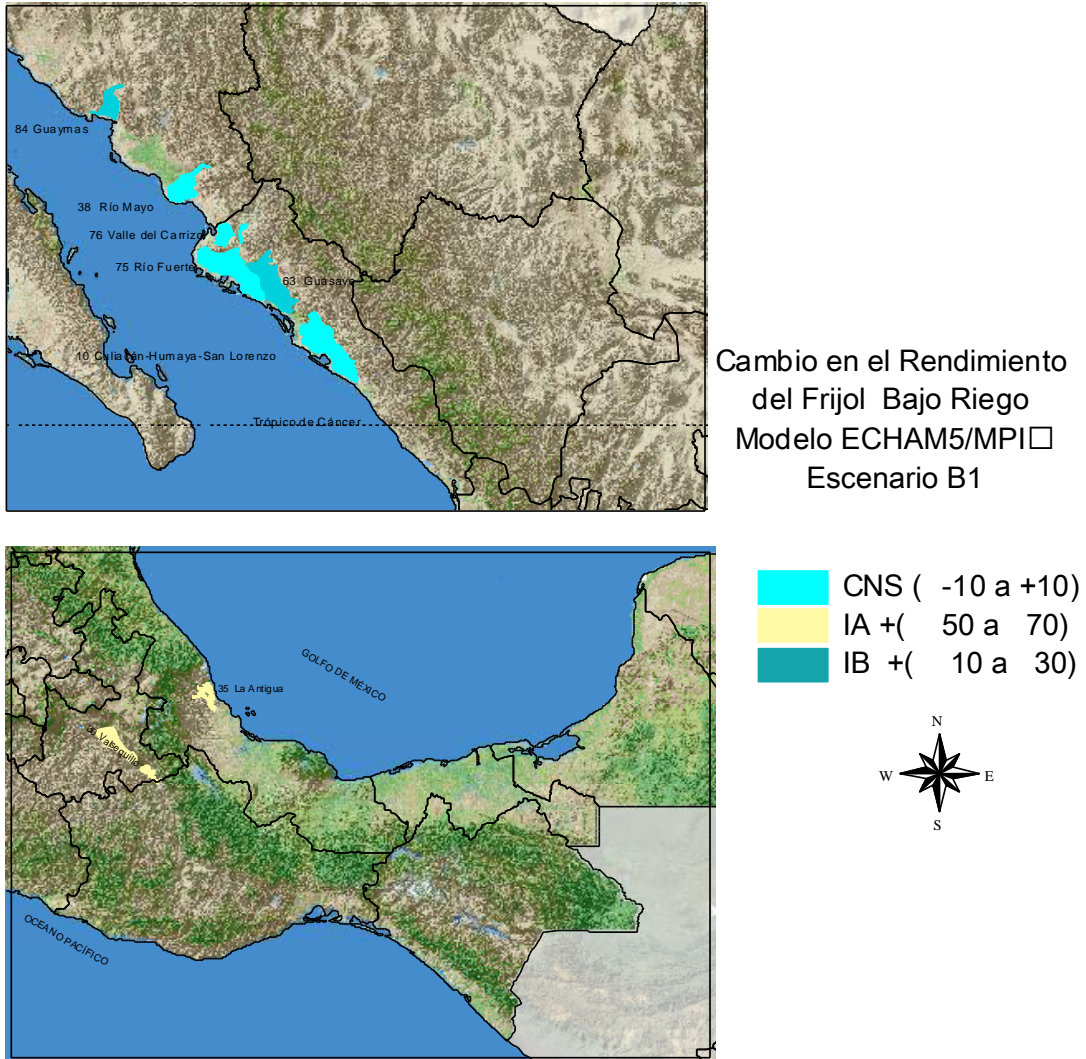


Figura 11. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de riego de acuerdo a los escenarios de cambio climático B1 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 491 ppm para el MCGs ECHAM5/MPI para un horizonte de evaluación al año 2050 en algunos Distritos de Riego de México

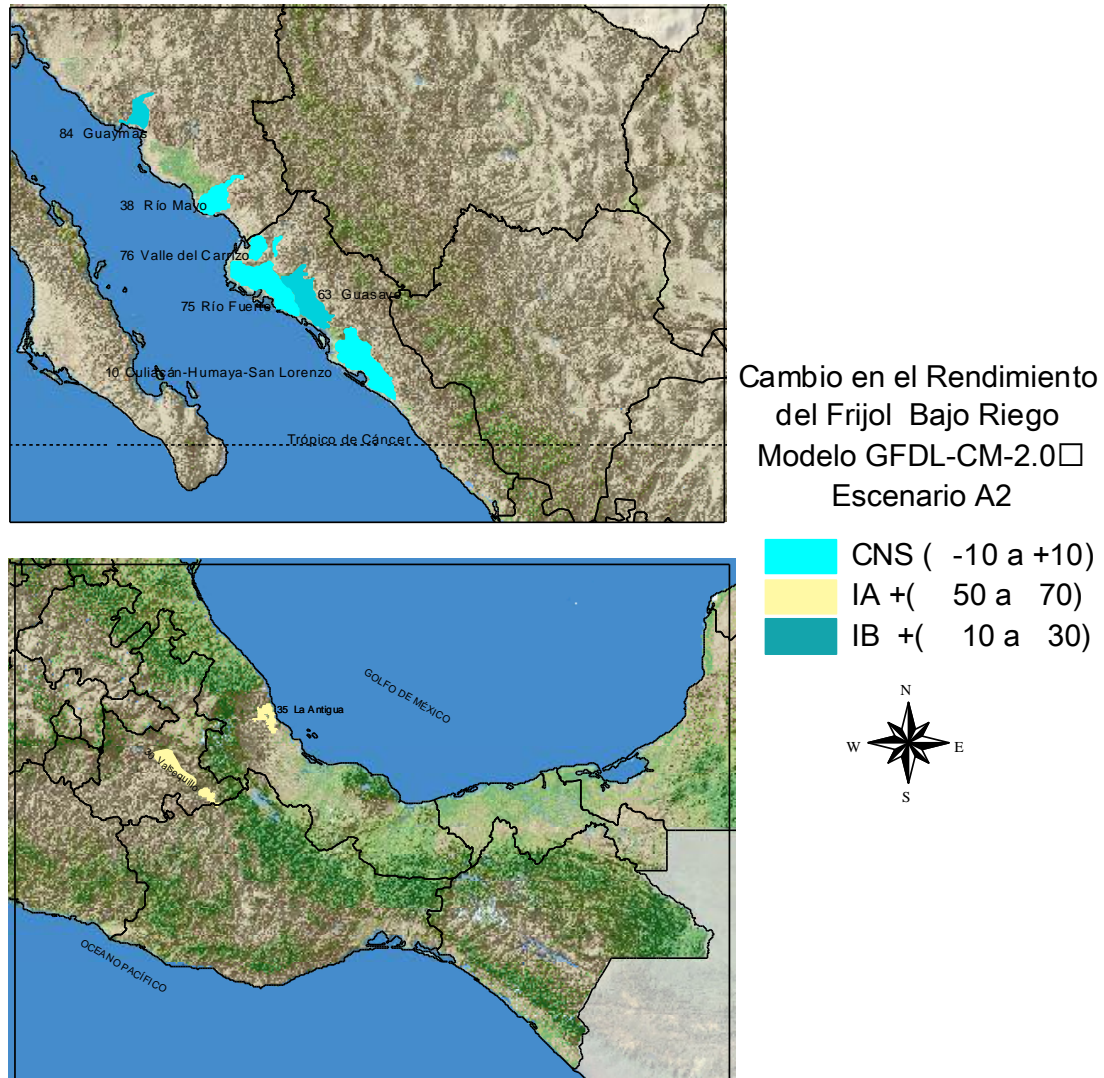


Figura 12. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de riego de acuerdo a los escenarios de cambio climático B2 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 478 ppm para el MCGs ECHAM5/MPI para un horizonte de evaluación al año 2050 en algunos Distritos de Riego de México

Anexo G: Mapas de productividad del frijol bajo temporal ante escenarios de cambio climático en un horizonte de evaluación al 2050

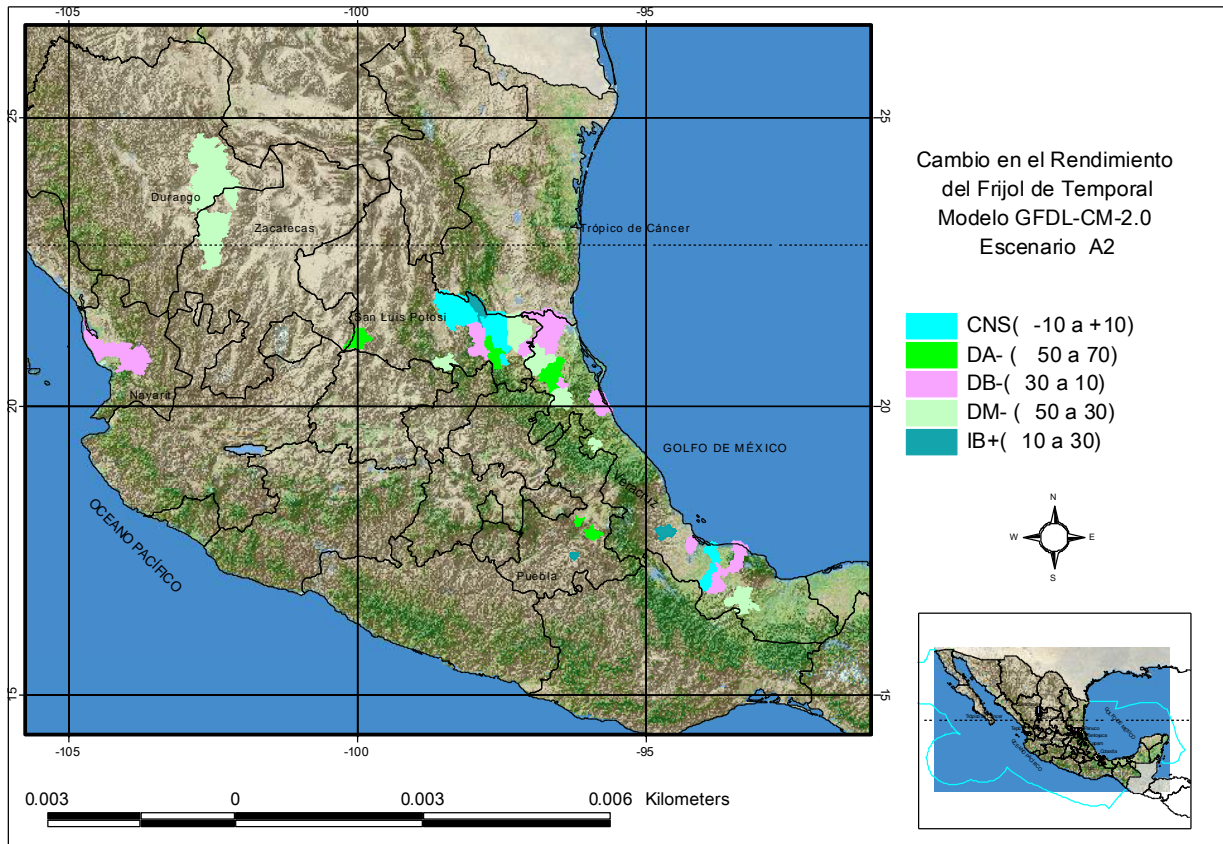


Figura 13. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de temporal de acuerdo a los escenarios de cambio climático A2 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 536 ppm por el MCGs GFDL-CM-2.0 para un horizonte de evaluación al año 2050 en algunos municipios de México

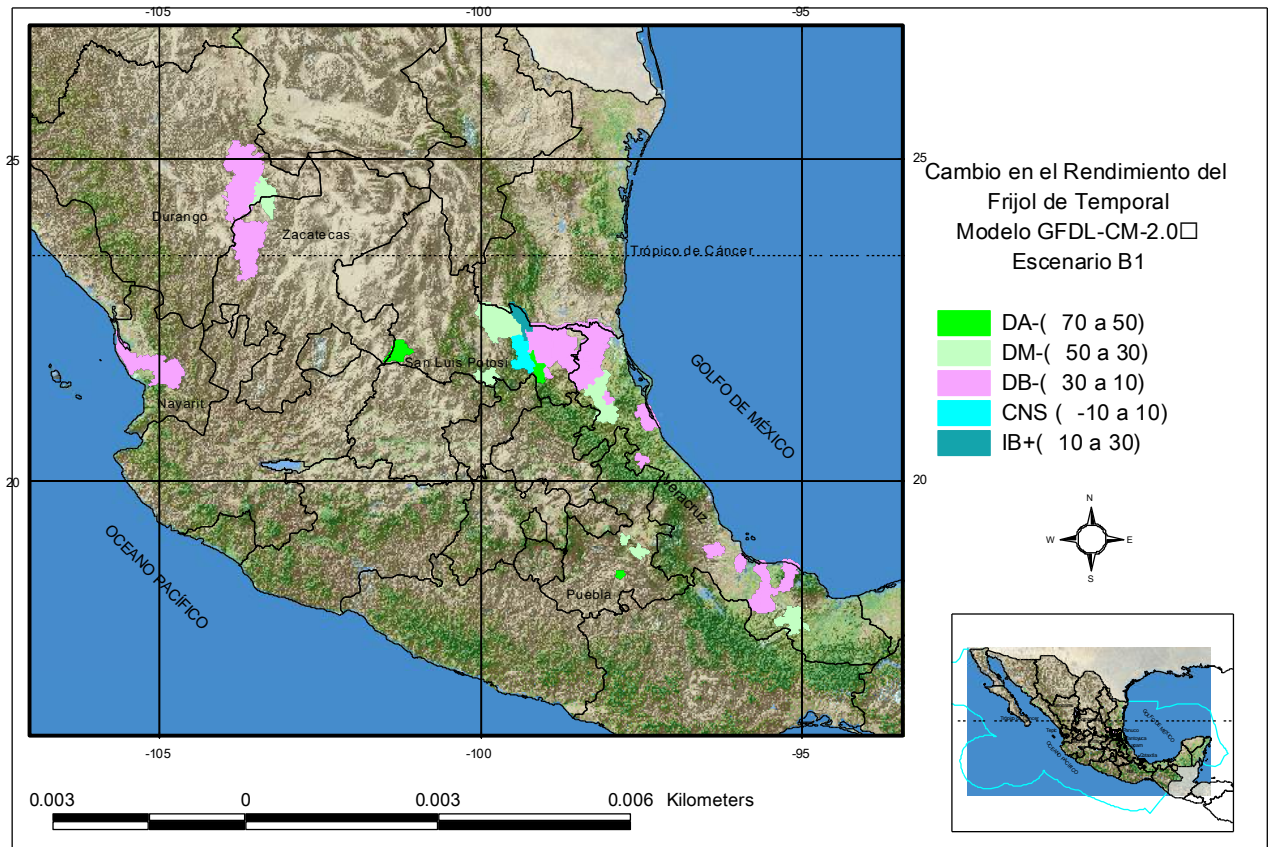


Figura 14. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de temporal de acuerdo a los escenarios de cambio climático B1 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 491 ppm par el MCGs GFDL-CM-2.0 para un horizonte de evaluación al año 2050 en algunos municipios de México

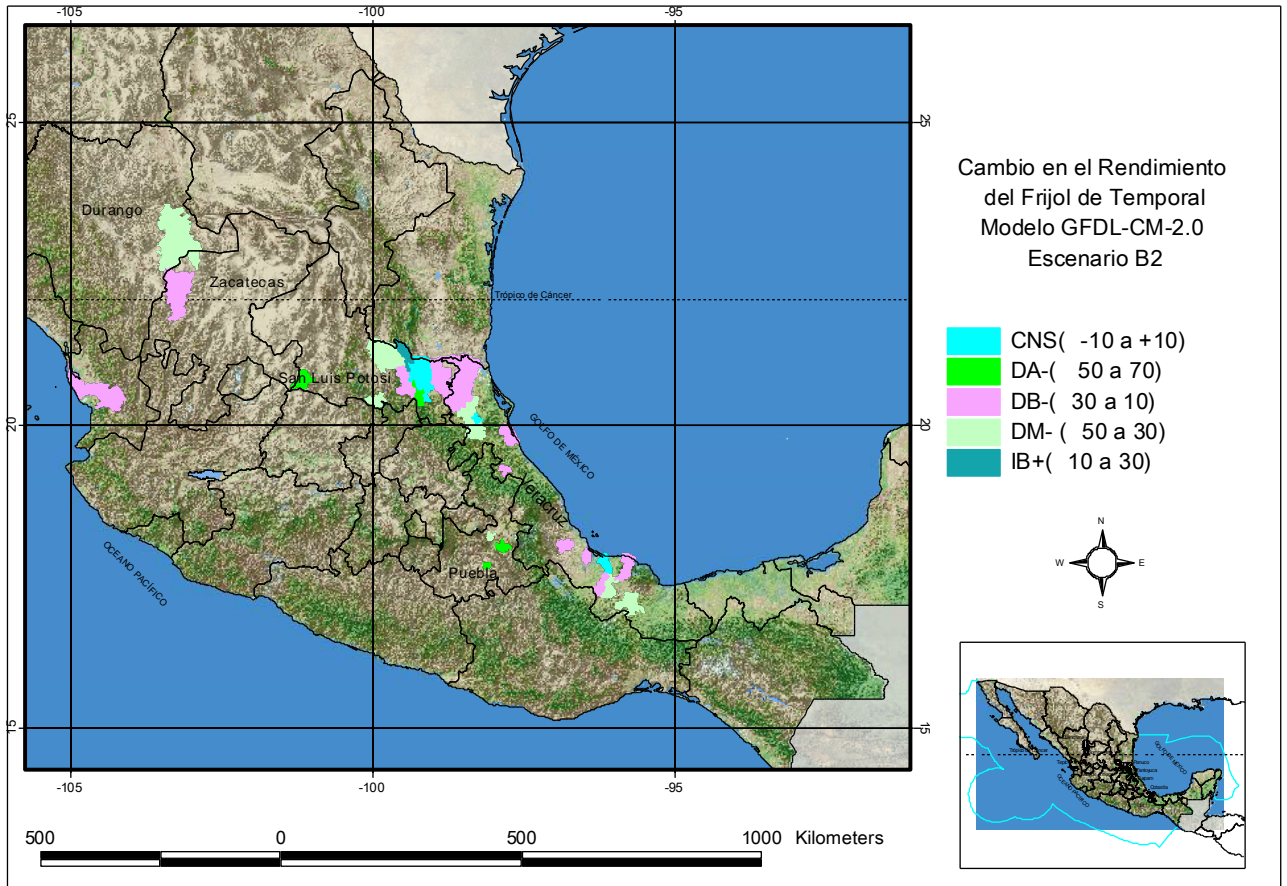


Figura 15. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de temporal de acuerdo a los escenarios de cambio climático B2 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 478 ppm por el MCGs GFDL-CM-2.0 para un horizonte de evaluación al año 2050 en algunos municipios de México

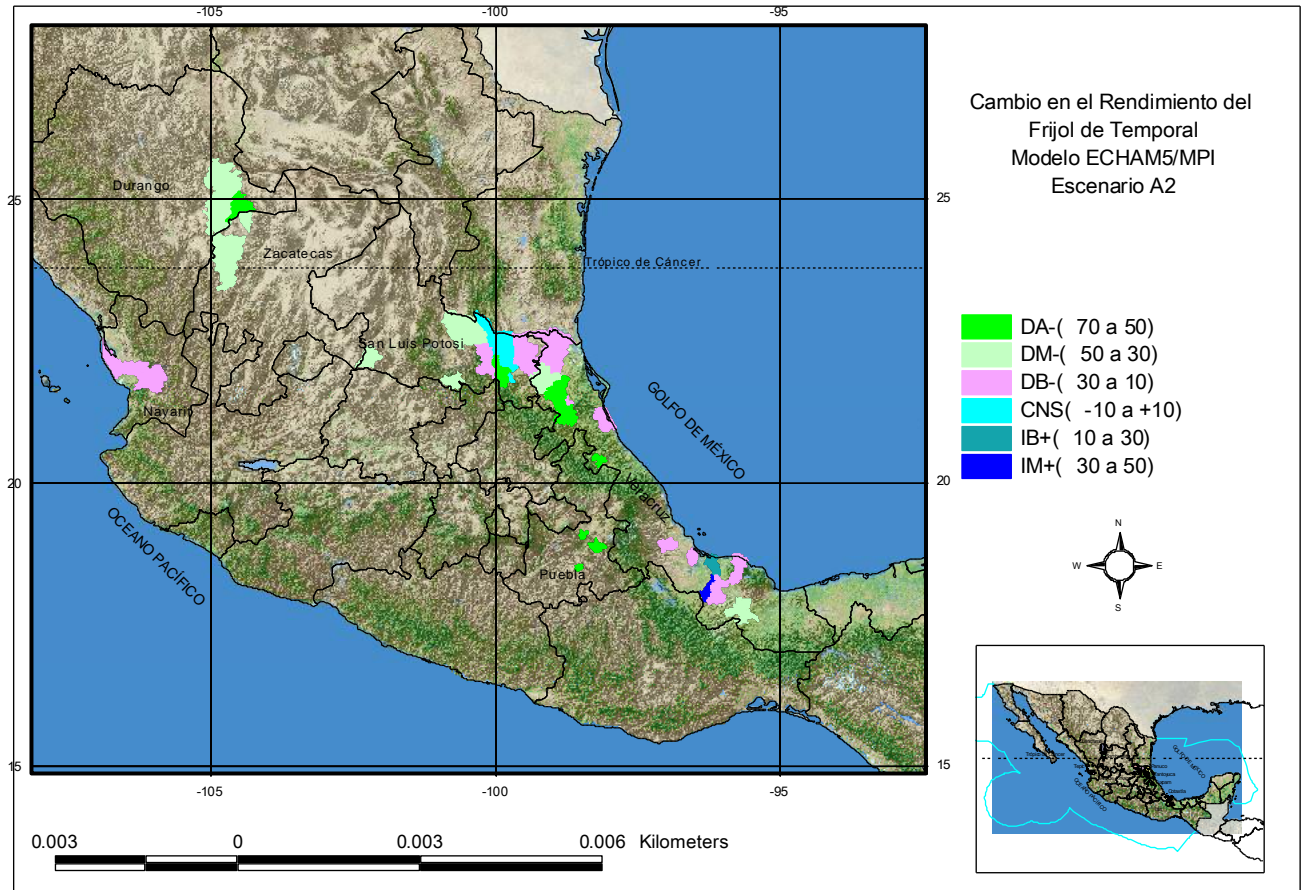


Figura 16. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de temporal de acuerdo a los escenarios de cambio climático A2 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 536 ppm por el MCGs ECHAM55/MPI para un horizonte de evaluación al año 2050 en algunos Distritos de Riego de México

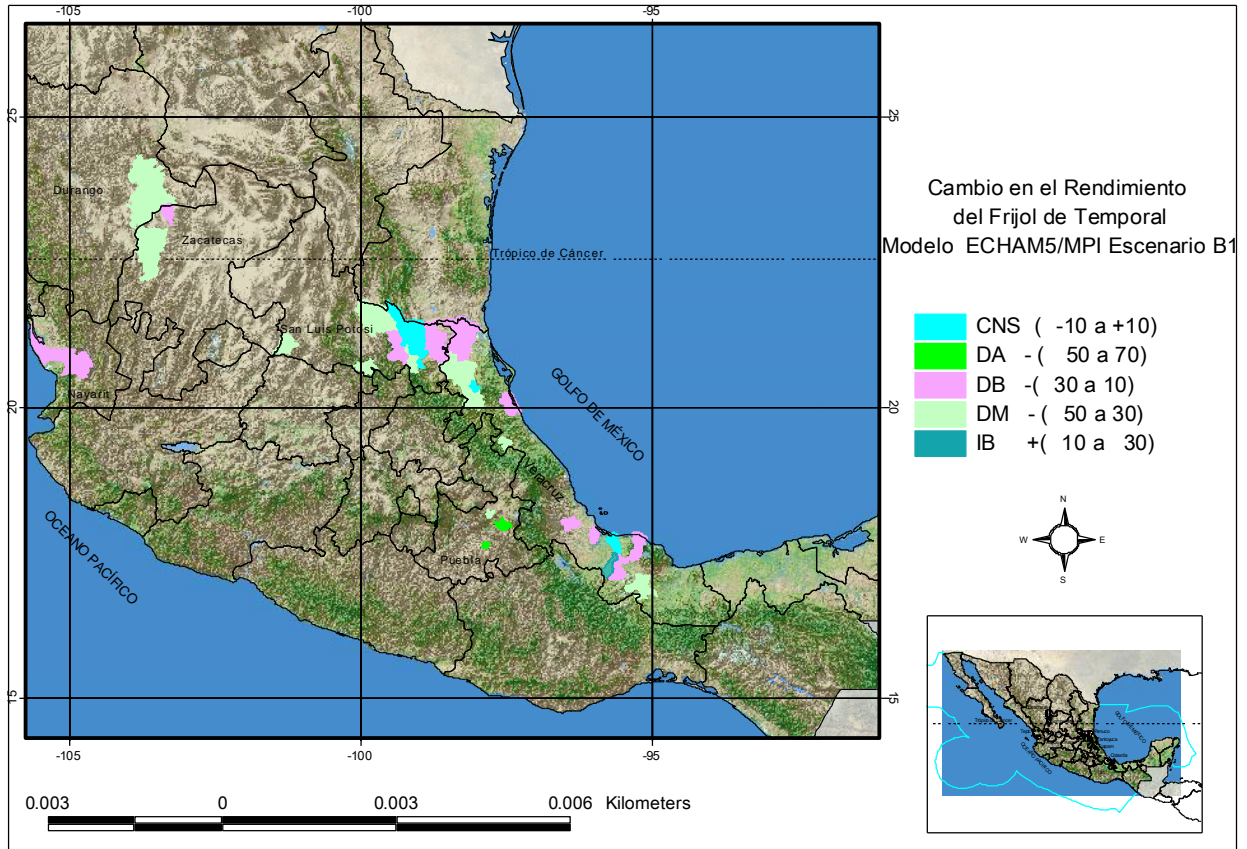


Figura 17. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de temporal de acuerdo a los escenarios de cambio climático B1 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 491 ppm por el MCGs ECHAM55/MPI para un horizonte de evaluación al año 2050 en algunos municipios de México

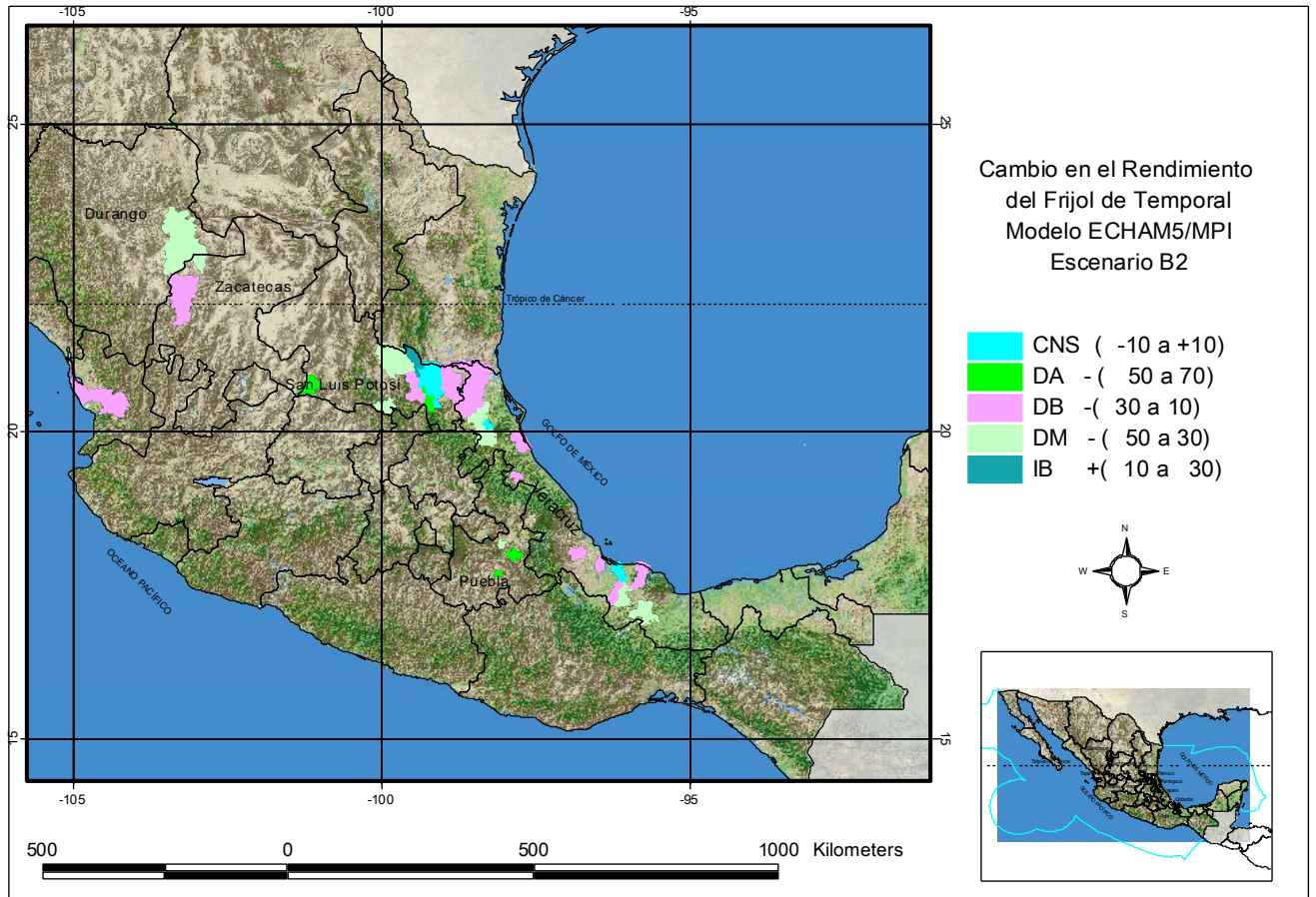


Figura 18. Cambio en la productividad (ΔY) del frijol de temporal de acuerdo a los escenarios de cambio climático B2 en caso de crecimiento de la concentración de CO_2 hasta 478 ppm por el MCGs ECHAM55/MPI para un horizonte de evaluación al año 2050 en algunos municipios de México