



UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO
UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ARIDAS



EFFECTO DEL CAMBIO EN LOS PATRONES DEL CLIMA
SOBRE EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

PRESENTA:

GERARDO ESQUIVEL ARRIAGA



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

Bermejillo, Durango, Mayo 2011



EFFECTO DEL CAMBIO EN LOS PATRONES DEL CLIMA SOBRE EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS

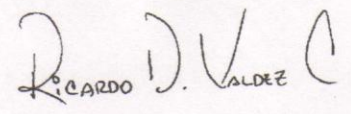
Tesis realizada por **Gerardo Esquivel Arriaga** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ARIDAS

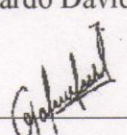
DIRECTOR: _____


Ph. D. Ignacio Sánchez Cohen

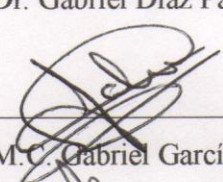
ASESOR: _____


Dr. Ricardo David Valdez Cepeda

ASESOR: _____


Dr. Gabriel Díaz Padilla

ASESOR: _____


M.C. Gabriel García Herrera

ASESOR: _____


Dr. Armando López Santos

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** y a la **Coordinación de Posgrado de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo** por el financiamiento y facilidades para realizar mis estudios de maestría.

Al **Ph. D. Ignacio Sánchez Cohen, Dr. Ricardo David Valdez Cepeda, Dr. Gabriel Díaz Padilla, M.C. Gabriel García Herrera y el Dr. Armando López Santos** por el apoyo, asesoría, orientación e importantes observaciones para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al **programa TIES Michigan State University – Universidad Autónoma Chapingo** y al **Global Observatory for Ecosystem Services**, de **Michigan State University**, por permitirme haber realizado una estancia profesional en tan prestigiada institución, y al personal administrativo, investigador y de apoyo por las atenciones otorgadas.

Al **Laboratorio de Agromapas Digitales (LADIGS)** del **Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias**, adscrito al campo experimental Cotaxtla, Veracruz, por su ayuda en la elaboración de mapas contenidos en este documento.

Al personal administrativo y académico de Posgrado, así como a mis compañeros de grupo y a las generaciones 2008-2009 y 2010-2011 por la convivencia a lo largo de mi formación profesional.

A mis compañeros, amigos y a todas las personas que de manera directa o indirectamente formaron parte de mi desarrollo durante mi estancia en esta institución.

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS	x
I. INTRODUCCIÓN	1
I.I OBJETIVO GENERAL	4
1.1.1 Objetivos Específicos.....	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1 El sistema climático	6
2.2 Factores naturales del sistema climático	8
2.2.1 Ciclos orbitales.....	8
2.2.2 Fluctuaciones en la Radiación Solar	9
2.2.3 Erupciones volcánicas	10
2.2.4 Oscilaciones internas del sistema climático	10
2.2.4.1 El Niño – Oscilación del Sur (ENOS)	11
2.2.4.2 Oscilación Decenal del Pacífico.....	12
2.2.4.3 Oscilación del Atlántico Norte.....	14
2.2.5 El efecto invernadero natural	14
2.2.6 Aerosoles.....	15
2.3 Factores humanos (antropogénicos).....	16
2.3.1 Incremento en la concentración de gases de invernadero	16
2.3.2 Cambios en el uso del suelo	19
2.3.3 Cambios en el clima urbano	20

2.3.4 Aerosoles y otros contaminantes.....	21
2.4 Cambio climático	22
2.4.1 El efecto invernadero natural y efecto invernadero amplificado	24
2.5 Cambio climático y Agricultura.....	28
2.5.1 Cambio climático y Agricultura en México.....	32
2.6 Modelación y simulación de procesos	36
2.7 Modelos climáticos	38
2.8 Modelos de cultivo.....	41
2.9 Métodos y Herramientas de Reducción de escala (Downscaling)	43
2.9.1 Reducción de escala dinámica	45
2.9.2 Reducción de escala Empírica (estadística)	46
2.10 Statistical Downscaling Model (SDSM).....	50
2.11 ClimGen	53
2.12 EPIC	56
III. MATERIALES Y MÉTODOS	59
3.1 Localización geográfica	59
3.1.1. Orografía y Geología.....	60
3.1.2 Características climatológicas.....	60
3.1.3 Características Hidrográficas	61
3.1.4 Suelos dominantes, Agricultura y Vegetación	62
3.2 Descripción del enfoque metodológico.....	63
3.2.1.- Selección de estaciones meteorológicas	64
3.2.2 Proceso de Reducción de Escala	67

3.2.3 Generador climático ClimGen	79
3.2.4 Obtención de Rendimientos actuales de maíz.....	82
3.2.5 Obtención de rendimientos con el modelo EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator).....	83
3.2.6 Mapas de temperatura, precipitación y producción de maíz.....	86
IV. RESULTADOS Y/O DISCUSION	88
4.1 Temperatura Máxima	88
4.2 Temperatura Mínima.....	92
4.3 Precipitación.....	96
4.4 Rendimientos de Maíz grano en condición actual y escenario	101
V. CONCLUSIONES	106
VI. LITERATURA CITADA	108
VII. ANEXOS	122

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del sistema climático global.....	6
Figura 2. Cambios orbitales de la Tierra (ciclos de Milankovitch).....	8
Figura 3. Ciclo de manchas solares.....	9
Figura 4. Impactos climáticos en el mundo durante un evento de El Niño	12
Figura 5. Concentraciones de gases de efecto invernadero	17
Figura 6. Efecto invernadero natural	25
Figura 7. Emisión mundial de CO ₂ por consumo de combustibles fósiles	27
Figura 8. Generación de escenarios climáticos SDSM versión 4.2.	52
Figura 9. Localización geográfica del estado de Durango.	59
Figura 10. Climas del estado de Durango.	61
Figura 11. Regiones hidrológicas del estado de Durango.....	62
Figura 12. Enfoque metodológico considerado en el estudio.	64
Figura 13. Estaciones climatológicas consideradas en les estudio.	66
Figura 14. Pantalla de inicio de SDSM.....	69
Figura 15. Varianza explicada por los predictores.....	71
Figura 16. Matriz de correlación.	72
Figura 17. Resultados de la calibración del modelo	73
Figura 18. Generador climático en SDSM.....	74
Figura 19. Resumen estadístico para los datos observados.....	75
Figura 20. Resumen estadístico para los datos modelados.	76
Figura 21. Comparación de resultados observados y modelados.	77

Figura 22. Imagen que indica que el escenario fue realizado.	78
Figura 23. Pantalla inicial de CLIMGEN	80
Figura 24. Pantalla de trabajo de EPIC	84
Figura 25. Mapas de temperatura máxima media anual en condiciones actuales y bajo escenario de cambio climático.	89
Figura 26. Incrementos y decrementos de la Temperatura Máxima Media Anual Actual versus escenario.....	91
Figura 27. Mapas de temperatura mínima media anual en condiciones actuales y bajo escenario de cambio climático	93
Figura 28. Incrementos y decrementos de la Temperatura Mínima Media Anual Actual versus escenario.....	95
Figura 29. Mapas de precipitación media anual en condiciones actuales y bajo escenario de cambio climático	98
Figura 30. Incrementos y decrementos en la Precipitación Media Anual Actual versus escenario	100
Figura 31. Mapas de rendimientos de maíz de temporal en condiciones actuales y bajo cambio climático en el estado de Durango.....	103
Figura 32. Incrementos y decrementos en los rendimientos de maíz en la actualidad versus escenario	105
Figura 33. Municipios del estado de Durango	126

LISTA DE ABREVIATURAS

APSIM	Agricultural Production Systems sIMulator
CCmaC	Centro Canadiense de Análisis y Modelación Climática
ENOS	El Niño – Oscilación del Sur
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator
ERIC	Extractor Rápido de Información Climatológica
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GAPS 3.1	General-Purpose Atmospheric Plant Soil Simulator
GCMs	Modelos de Circulación General
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
LAMs	Modelos de Área Limitada
LARS-WG	Long Ashton Research Station Weather Generator
MAACV	Model of Agricultural Adaptation to Climatic Variation
OAN	Oscilación del Atlántico Norte
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
PDO	Oscilación Decadal del Pacífico
RCMs	Modelos Climáticos Regionales
SDSM	Modelo Estadístico de Reducción de Escala
UHI	Isla de Calor Urbana
WGs	Generadores de tiempo

EFFECTO DEL CAMBIO EN LOS PATRONES DEL CLIMA SOBRE EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS

RESUMEN

Escenarios futuros de temperatura y precipitación para el período 2010-2050 se realizaron para el Estado de Durango y se obtuvieron los posibles impactos en el rendimiento sobre el cultivo de maíz grano en condiciones de temporal. Se eligieron estaciones climáticas que mantuvieran antigüedad, consistencia y homogeneidad en la información. Se realizó un proceso de reducción de escala espacial a partir de un Modelo de Circulación General para la evaluación de los impactos regionales del cambio climático; posteriormente se usó un modelo de cultivo para obtener los rendimientos y poder realizar comparaciones de las condiciones actuales con respecto a las obtenidas en los escenarios bajo cambio climático. La temperatura máxima en promedio a lo largo del estado aumentó en 1.1 °C, mientras que para la temperatura mínima incrementa en 0.3 ° C; respecto a la precipitación arrojó un incremento de 200 mm en promedio en el estado; referente a los rendimientos se espera que exista un incremento en las partes altas de estado con respecto a las partes bajas. De forma general las variables de temperatura, precipitación y rendimientos en condiciones actuales y bajo escenario de cambio climático varían de manera heterogénea con decrementos e incrementos en algunos puntos del Estado de Durango.

Palabras Clave: Cambio Climático, Reducción de Escala, Temperatura, Precipitación.

EFFECT OF CHANGE IN WEATHER PATTERNS ON CROP YIELD

SUMMARY

Temperature and precipitation scenarios for the period 2010-2050 were made for Durango State and the possible impacts on grain maize yield under rain-fed conditions were obtained. Weather stations were chosen that would maintain consistency and uniformity in the information over time. Spatial downscaling was conducted from a General Circulation Model to assess regional impacts of climate change. Subsequently, a crop model was used to compute yields and allow comparison of current conditions with those obtained under climate change scenarios. The maximum temperature on average throughout the state increased by 1.1 ° C, while the minimum temperature increased by 0.3 ° C and precipitation rose by 200 mm on average in the state. Crop yields are expected to increase in the upper parts of the state compared to the lowlands. In general, the variables of temperature, precipitation and yields in current conditions and under climate change scenarios vary in a heterogeneous way with decreases and increases in some parts of the state of Durango.

Keywords: Climate Change, Downscaling, Temperature, Precipitation.

Gerardo Esquivel Arriaga¹, Ignacio Sanchez Cohen²

¹Tesista, ²Director

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el clima de la Tierra ha variado, reflejando las complejas interacciones y dependencias solares, oceánicas, terrestres, atmosféricas y de todos los componentes vivos que conforman el planeta Tierra (Kliejunas *et al.*, 2009; NSF, 2009; TERI, 2009; Monckton, 2007). Sin embargo, en el último siglo se ha observado que el cambio ha sido un poco más acelerado, a diferencia de la fase natural cuando los cambios se produjeron lenta y definidamente (TERI, 2009).

Los procesos físicos que causan el cambio climático están científicamente documentados. Tanto las actividades humanas y la variabilidad natural están contribuyendo al calentamiento global y regional (The National Academies, 2008a; IPCC, 2007a). La mayor contribución conocida proviene de la combustión de combustibles fósiles, que libera el gas de dióxido de carbono a la atmósfera. Los gases de efecto invernadero (que en la actualidad se habla de compuestos de efecto invernadero (CEI) que incluyen gases y sólidos) afectan al clima al alterar la radiación de longitud de onda corta (Rsw, por sus siglas en inglés) y la radiación de onda larga (Rlw, por sus siglas en inglés), las cuales forman parte del equilibrio energético de la Tierra. La variación de la abundancia de la atmósfera o las propiedades de estos gases y partículas, puede conducir a un calentamiento o enfriamiento del sistema climático (Kliejunas *et al.*, 2009; IPCC 2007a).

Actualmente, la investigación en la ciencia del clima esta enfocada en un núcleo de pocas líneas de investigación y excelentes revisiones están disponibles respecto al tema (Wilby, 2007). Estas líneas de investigación incluyen: 1) medición,

estimación y monitoreo de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera; 2) la sensibilidad y los forzamientos radiativos: que comprende el desarrollo de escenarios y evaluaciones a través de modelos para la simulación del sistema tierra - océano - atmósfera para modelar las respuestas a estímulos externos; 3) procesos de reducción de escala (Downscaling) de las salidas de los Modelos de Circulación General (GCMs) que son usados para proyectar el cambio climático global, y 4) la descripción y la traducción de los datos climáticos a futuro para los profesionales y tomadores de decisiones en todas las escalas (Ziervogel *et al.*, 2008; Magaña, 2009).

El estado del arte de los Modelos de Circulación General es que pueden reproducir procesos importantes a escala global y continental acerca de la atmósfera y predecir el clima futuro bajo diferentes emisiones de escenarios (Chen *et al.*, 2010; Chu *et al.*, 2010; Hashmi *et al.*, 2010; Li y Qi, 2010).

Sin embargo, las salidas de los modelos de circulación general no pueden satisfacer las crecientes demandas de la comunidad científica, políticos, tomadores de decisiones y del público en general para la evaluación realista de los impactos regionales de la variabilidad natural del clima y de los proyectados respecto al cambio climático. Resultados tan pobres de los GCMs a escala local y regional, han dado lugar al desarrollo de métodos de reducción de escala que hacen que la resolución sea más fina y precisa dentro de la gruesa malla de resolución de los GCMs (Chu *et al.*, 2010; Li y Qi, 2010; Tryhorna y DeGaetano, 2010; Ziervogel *et al.*, 2008).

Con base en los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) a escala global y regional los efectos del cambio climático se verán reflejados en muchos sectores de nuestra sociedad. El cambio climático agrava las preocupaciones sobre la producción agrícola y seguridad alimentaria en todo el mundo (Rosenzweig, 2007). Una de las herramientas para evaluar el impacto del clima en la producción agrícola, es mediante la modelación de cultivos. Además de su importancia científica, la simulación de rendimientos en las plantas tiene una aplicación práctica en el manejo de los sistemas de cultivo, en la formación de poblaciones, comercialización, elaboración de políticas agrícolas, zonificación de zonas agrícolas y en muchas otras ramas de la actividad agrícola (Krishnan *et al.*, 2009).

Los factores climáticos son algunos de los principales limitantes de la producción agrícola, mientras que la agricultura tiene un historial de responder a las cambiantes condiciones, ya sean económicas, sociales, políticas o relacionadas con el clima; el posible aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos y otros desafíos que plantea el cambio climático ahora da lugar a la necesidad de volver a evaluar la capacidad de adaptación de los sistemas agrícolas (Wreford *et al.*, 2010).

Por lo anterior, el adecuado entendimiento del cambio climático nos permitirá tener una mejor perspectiva de los cambios que están sucediendo a nivel global, y que tendrán impactos a escala local y regional, y poder discernir sobre las posibles situaciones y/o toma de decisiones respecto a un evento determinado, mediante el uso de la modelación climática y la modelación de cultivos.

I.I OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto sobre el rendimiento de maíz grano en condiciones de secano para el estado de Durango en los próximos 30 años, mediante la generación de escenarios de cambio climático con base en las variables climatológicas de temperatura y precipitación utilizando técnicas estadísticas de reducción de escala.

1.1.1 Objetivos Específicos

- 1) Comparar la situación actual de temperaturas máximas y mínimas con la del escenario de los próximos 30 años.
- 2) Comparar la situación actual de la precipitación con la del escenario de los próximos 30 años.
- 3) Pronosticar los rendimientos de maíz en condiciones de secano para el estado de Durango haciendo uso de escenarios climáticos generados mediante técnicas de re-escalado.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

El cambio climático es uno de los problemas ambientales más importantes a nivel global que enfrenta el mundo hoy en día. Un fuerte consenso científico ha determinado que la tendencia que se observó de un gran calentamiento en el siglo XX seguirá su curso en los próximos decenios y que las actividades humanas son el motor más importante para muchos de los cambios observados (The National Academies, 2009).

Para entender lo que es el fenómeno del cambio climático global, primero hay que entender lo que es el clima. El clima terrestre es producto de la constante y compleja interacción entre la atmósfera, los océanos, las capas de hielo y nieve, los continentes y algo muy importante, la vida en el planeta (Kliejunas *et al.*, 2009; NSF, 2009; TERI, 2009; Monckton, 2007; Conde, 2006).

Cuando un elemento o variable meteorológico (a) como la precipitación o la temperatura es diferente al valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de la radiación solar recibida o incluso cambios en las características del planeta resultado de la actividad humana (TERI, 2009; IPCC, 2007a). Las formas de variabilidad del clima son muchas y, por tanto, pronosticarlo a largo plazo no es fácil. Es por ello que, distinguir qué produce cambios en el clima de un año a otro o en escalas mayores de tiempo, constituye un reto científico (The National Academies, 2010a; TERI, 2009; IPCC, 2007a; Magaña, 2004).

2.1 El sistema climático

El sistema climático se compone de complejas interacciones solares, oceánicas, terrestres, atmosféricas y de los componentes vivos que conforman el planeta Tierra (Figura 1). Particularmente las funciones importantes son desempeñadas por la radiación global, el ciclo del agua y el ciclo del carbono; sin embargo las complejas interacciones entre los componentes individuales del sistema climático que sufran cualquier cambio o alteración en alguno estos elementos afectará de alguna manera a los demás componentes (Kliejunas *et al.*, 2009; NSF, 2009; TERI, 2009; Monckton, 2007; IPCC 2007a).

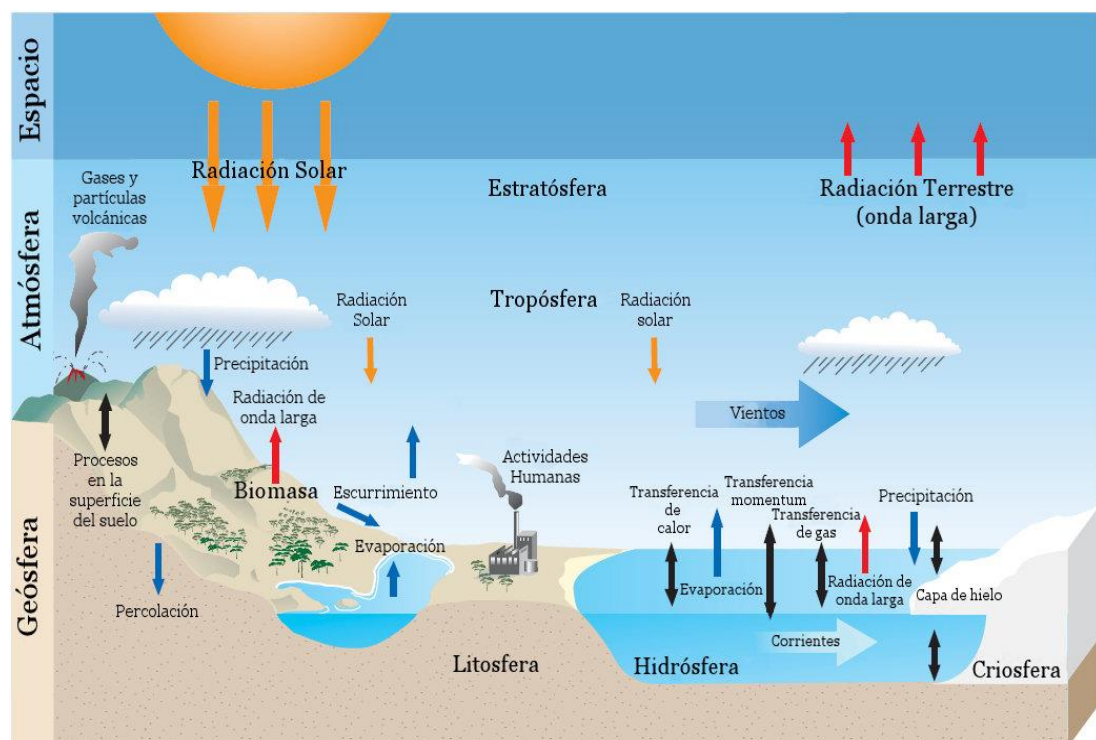


Figura 1. Los componentes del sistema climático global implican a la atmósfera (incluyendo la troposfera y la estratosfera); la geósfera (la cual incluye la tierra sólida (litósfera), los océanos, ríos, y las masas internas de agua (hidrósfera) y la nieve, hielo y permafrost (criósfera)); y la biosfera (la zona de transición dentro de la cual existe la mayoría de la vida vegetal y animal y la mayoría de la materia orgánica viviente y muerta (biomasa) la cual puede ser encontrada). La figura también muestra los principales procesos físicos que toman lugar dentro del sistema climático y como ejercen una influencia sobre el clima. Fuente: (www.bom.gov.au).

En este sentido, el clima terrestre es controlado por el balance energético que existe entre los diversos factores que componen el sistema climático. De forma general, la tierra intercepta la radiación solar y esta energía es la que en última instancia controla el clima del planeta sin embargo cómo y cuánta de esta energía es distribuida, almacenada o reflejada al espacio, son factores que también juegan un papel trascendental en definir las características del clima global (The National Academies, 2010a; 2001; Staines, 2008).

La mayoría de las veces el termino clima es utilizado de forma similar como estado del tiempo. El clima es típicamente descrito por las estadísticas de un conjunto de variables atmosféricas y de superficie, en un periodo largo de tiempo, tales como la temperatura, precipitación, viento, humedad, nubosidad, humedad del suelo, temperatura superficial del mar, entre otras variables; el período habitual es mínimo de 30 años (TERI, 2009; Kliejunas *et al.*, 2009; IPCC, 2007a; The National Academies, 2001). El estado del tiempo es la manifestación diaria del clima, el cual se manifiesta en horas o incluso en días (TERI, 2009; Cowie, 2007).

En adición al ciclo anual del clima, los climas globales y regionales están en un perpetuo estado de cambio en escalas de tiempo que van de meses a millones de años. Una variedad de factores puede conducir a cambios de clima en estas escalas de tiempo, algunos internos al sistema climático y otros externos, nos ocurren naturalmente y otros derivados de actividades humanas (The National Academies, 2010a; 2006; TERI, 2009; Monckton, 2007; IPCC, 2007a; 2007b).

2.2 Factores naturales del sistema climático

2.2.1 Ciclos orbitales

Uno de los factores naturales más importantes responsables del cambio climático son las variaciones o cambios en el patrón orbital de la Tierra alrededor del Sol, también conocida como ciclos de Milankovitch, esto en honor al astrónomo que los identificó, y tienen periodicidades que van de los miles a los cientos de miles de años y han sido señaladas como la causa principal de las glaciaciones. Estas variaciones determinan dónde y cuándo es que la Tierra recibe la mayor cantidad de energía solar, afectando la cantidad de energía que es reflejada y absorbida, y consecuentemente al balance energético neto (Figura 2). El eje de rotación de la tierra está inclinado lejos desde la perpendicular al plano de su órbita alrededor del sol. Esta inclinación es responsable de nuestras estaciones, y un ligero cambio en la inclinación del eje las afectaría (TERI, 2009; Staines, 2008; IPCC, 2007a; Monckton, 2007, The National Academies, 2006).

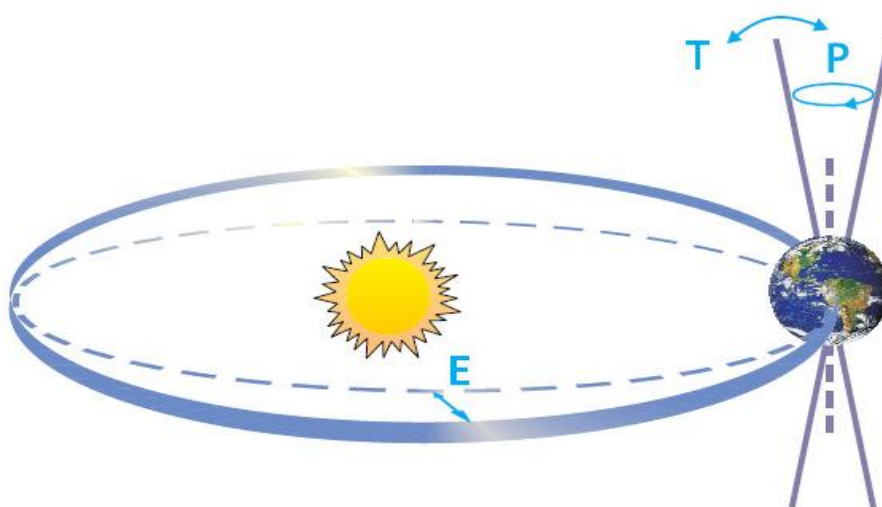


Figura 2. Esquema de los cambios orbitales de la Tierra (ciclos de Milankovitch) que derivaron las glaciaciones. "T" denota la inclinación (u oblicuidad) del eje de la Tierra, "E" denota cambios en la excentricidad de la órbita (debido a las variaciones en el eje menor de la elipse), y "P" denota la precesión, es decir; los cambios en la dirección del eje de la inclinación del eje en un punto dado de la órbita. Fuente: IPCC, 2007a.

2.2.2 Fluctuaciones en la Radiación Solar

Los cambios físicos dentro del sol pueden alterar la intensidad del carácter de la energía solar entrante. Algunas veces se presentan estallidos en el Sol y otras veces disminuye relativamente el calor que emana, al tiempo que la variación de posiciones de la Tierra también contribuye a calentamientos y enfriamientos diferenciales (López, 2009; Kliejunas *et al.*, 2009; Monckton, 2007; Buchdahal, 2002).

Con relación a lo anterior, la luminosidad del Sol varía dependiendo de muchos factores, el número de manchas solares en su superficie, por ejemplo. Diversos análisis de la variabilidad de la luminosidad solar, algunos desde el siglo pasado indican la existencia de un ciclo de luminosidad con una periodicidad de aproximadamente 11 años (Figura 3). La relación entre la luminosidad solar y la temperatura terrestre es una muestra de la gran influencia que pequeños cambios en la energía irradiada por el Sol tienen sobre el clima de la Tierra (The National Academies, 2010a; Scafetta, 2010; Staines, 2008; Ruzmaikin, 2007; Moussas *et al.*, 2005; Weng, 2005).

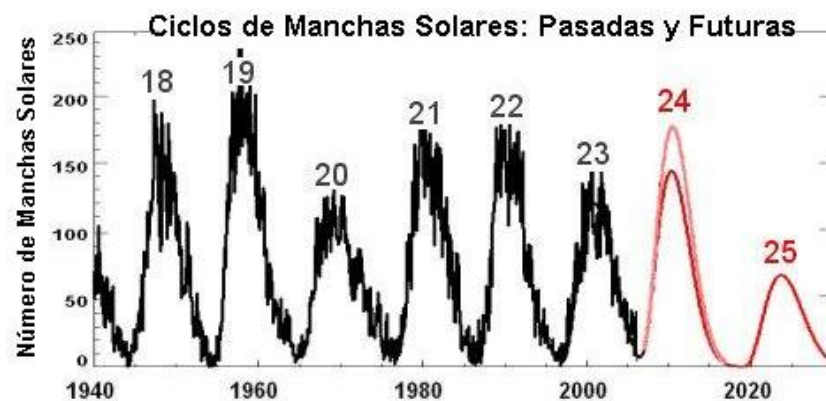


Figura 3. Ciclo de manchas solares. Fuente: http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2006/10may_longrange/

2.2.3 Erupciones volcánicas

Una erupción volcánica es otro factor natural que contribuye al cambio climático y conduce a cambios a corto plazo (TERI, 2009). Grandes erupciones son relativamente poco frecuentes (menos de una por decenio), pero rápidamente se pueden inyectar grandes volúmenes de material dentro de la atmósfera (The National Academies, 2010b). El efecto radiativo de una erupción volcánica depende de su magnitud y ubicación, la época del año, la orientación vertical de la erupción, y los tipos y tamaños de la eyección (Robock, 2000).

Las erupciones principalmente añaden grandes cantidades de ceniza, hollín, SO₂ (dióxido de azufre) y vapor de agua a la atmósfera, lo que disminuye la cantidad de radiación solar que llega a la superficie, de tal modo que induce a un enfriamiento de la Tierra (The National Academies, 2010b; 2006; 2001; TERI, 2009). Este enfriamiento, por su parte puede inyectar una anomalía dentro del funcionamiento interno del sistema climático que puede tener impactos durante decenios o por periodos más grandes de tiempo (López, 2009; Glasow *et al.*, 2009; Shindell *et al.*, 2003; Crowley, 2000).

2.2.4 Oscilaciones internas del sistema climático

Incluso en ausencia de cualquier influencia externa, el sistema climático fluctúa naturalmente en escalas de tiempo que van de meses a miles de años. Hay diversas fluctuaciones naturales bien conocidas que han sido identificadas por análisis estadísticos a partir de la observación de datos. Éstas incluyen a El Niño –

Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación Decenal del Pacífico y la Oscilación del Atlántico Norte.

2.2.4.1 El Niño – Oscilación del Sur (ENOS)

El Niño, calentamiento anómalo de la región oriental del Pacífico ecuatorial que se produce en Navidad todos los años, fue nombrado por primera vez por los pescadores peruanos siglos atrás. Los cambios en el perfil térmico de las corrientes oceánicas alteran el viento, la temperatura superficial del mar y los patrones de precipitación en el Pacífico tropical, y deriva a través de efectos climáticos en gran parte del mundo (D'Aleo y Easterbrook, 2010; Chen y Cane, 2008; Ye y Hsieh, 2006; IPCC, 2001).

El ENOS consta de tres fases, una de calentamiento: El Niño; una de enfriamiento: La Niña; y una fase neutral. El Niño y La Niña están asociados tanto con la sequía como con las inundaciones en muchas regiones del mundo (The National Academies, 2010a; Liao *et al.*, 2010). El fenómeno del niño ocurre en escalas de tiempo de 3 a 8 años e implica un ciclo de vida bien definido de calentamiento y enfriamiento en la parte central del Océano Pacífico tropical, con cambios asociados en los patrones de presión superficiales (la Oscilación del Sur) y la circulación de Walker (Huffman, 2010; López, 2009; González *et al.*, 2003). Cuando el Niño es suficientemente severo puede devastar dos terceras partes del mundo mediante sequías e inundaciones e inducir otros fenómenos meteorológicos extremos (Figura 4).

El evento más fuerte de El Niño fue reportado en los años de 1997-1998, en todo el mundo. Fue implicado en las inundaciones catastróficas en la costa de Perú y Ecuador, la sequía en el altiplano de Perú y Bolivia, la región Noreste de Brasil, e Indonesia, Nueva Guinea y Australia, entre otros (López, 2009; Cane, 2005).

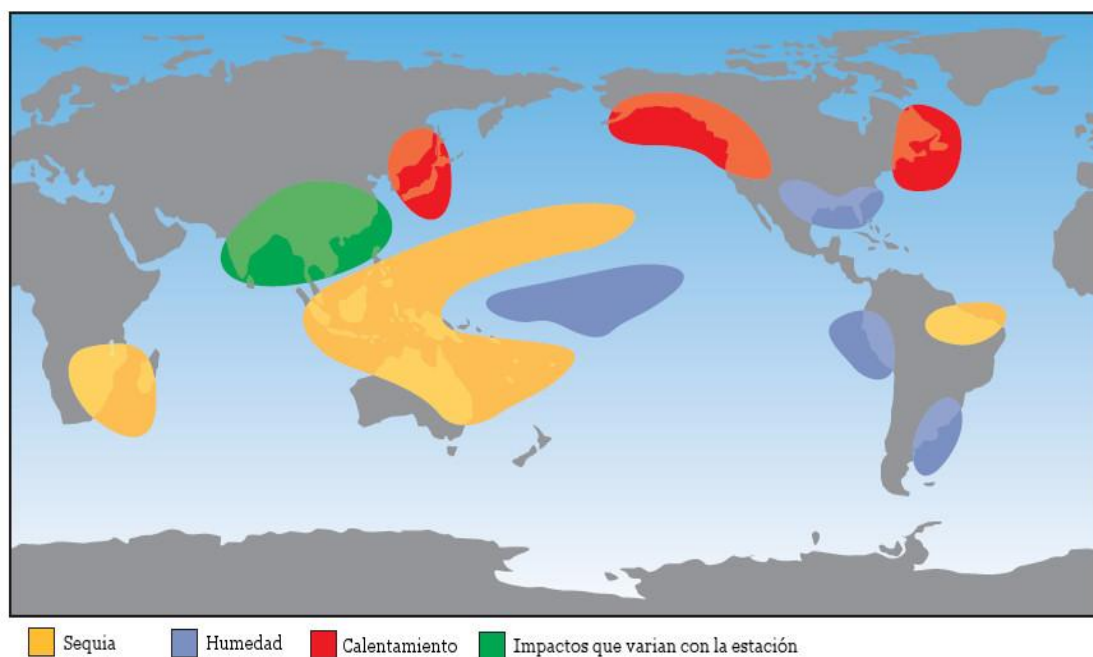


Figura 4. Los patrones de los impactos climáticos alrededor del mundo durante un evento de El Niño. Fuente: (www.bom.gov.au).

2.2.4.2 Oscilación Decenal del Pacífico

La Oscilación Decenal del Pacífico (ODP) es una fluctuación a largo plazo del Océano Pacífico que fue descubierto por primera vez en 1996 con base en los registros de las temperaturas superficiales del mar en el Océano Pacífico. La ODP aumenta y disminuye aproximadamente cada 20 o 30 años. En la fase cálida del evento, la temperatura superficial del mar tiende a ser anormalmente fría en el centro

del Pacífico Norte coincidente con un calentamiento inusual de la temperatura superficial de mar a lo largo de la costa oeste de las América's. En la fase fría del evento; las temperaturas superficiales del mar en el centro y este del pacífico sufren un enfriamiento y son rodeadas por temperaturas cálidas en el norte, oeste y sur que se asemeja a la forma de una herradura (Mantua *et al.*, 1997; Mantua y Hare, 2001; Schneider y Cornuelle, 2005; Viles y Goudie, 2003).

Dos características principales distinguen la ODP del fenómeno de El Niño Oscilación Sur (ENOS): (1) en el siglo XX el evento de la OPD persistió de 20 a 30 años, mientras que los eventos típicos de ENOS persistieron de 6 a 18 meses, (2) las huellas climáticas de la ODP son más visibles en el Pacífico Norte/ sector de América del Norte, mientras que las firmas secundarias existen en los trópicos - todo lo contrario de ENSO (D'Aleo y Easterbrook, 2010).

Un número creciente de evidencias pone de manifiesto una fuerte tendencia en los impactos de la ODP sobre el hemisferio sur, con importantes anomalías sobre el clima superficial en latitudes medias en el sur del Océano Pacífico, Australia y América del Sur. Varios estudios encontraron evidencia sólo para dos ciclos completos de la ODP en el siglo pasado: regímenes de enfriamiento de la ODP prevalecieron a partir de 1890-1924 y de nuevo entre 1947-1976, mientras que regímenes de calentamiento de la ODP dominaron desde 1925-1946 y desde 1977 hasta (al menos) mediados de 1990 (Mantua y Hare, 2001; Houghton *et al.*, 2001).

2.2.4.3 Oscilación del Atlántico Norte

La Oscilación del Atlántico Norte (OAN) es el modo más importante de variabilidad en la circulación atmosférica en el hemisferio norte (Fernández *et al.*, 2010; Arkin *et al.*, 2007; Bojariu y Gimeno, 2003; Gimeno *et al.*, 2002; Greatbatch, 2001), la cual fue descubierta originalmente por Gilbert Walker.

Las anomalías climáticas asociadas con la OAN son más pronunciadas durante el invierno cuando la OAN es más fuerte. Durante los meses de diciembre a marzo, por ejemplo, la OAN llega a alcanzar alrededor del 60% de la varianza total en la presión a nivel del mar sobre el Atlántico Norte. Cuando la OAN se encuentra en una fase positiva, el centro de alta presión subtropical es más fuerte de lo habitual y el centro de baja presión en Islandia es más profundo. La fase positiva se asocia con vientos del oeste que en promedio son más fuertes en las latitudes medias, inviernos cálidos y húmedos en el norte de Europa, inviernos secos en el sur de Europa, inviernos secos y fríos en el norte de Canadá y Groenlandia, e inviernos templados y húmedos en el Este de EE.UU.. La fase negativa se asocia con las anomalías contrarias (Fernández *et al.*, 2010; Arkin *et al.*, 2007; Bojariu y Gimeno, 2003; Gimeno *et al.*, 2002, Greatbatch, 2001).

2.2.5 El efecto invernadero natural

La atmósfera es relativamente transparente a las longitudes de onda de la luz del sol, pero no a la radiación térmica que es emitida desde la superficie de la Tierra. Esta radiación pasa a través de los gases primarios en la atmósfera - nitrógeno,

oxígeno y argón - pero el dióxido de carbono, vapor de agua y algunos otros llamados gases de invernadero absorben una gran proporción de la radiación térmica. Esto significa que cuando hay un equilibrio entre la radiación incidente del sol y la radiación emitida desde la Tierra, una cierta cantidad de calor es almacenado en la atmósfera. Una de las consecuencias de esto es que la temperatura en la superficie de la Tierra es mayor de lo que habría sido si la atmósfera no hubiera contenido gases de efecto invernadero, de hecho 33 °C más caliente. Este es el efecto invernadero natural (Elvingson y Ågren, 2004).

2.2.6 Aerosoles

Los aerosoles son partículas y gotas tan pequeñas (de 10 nm a los 100 µm de diámetro) que se mantienen en suspensión como un gas, en este caso en la atmósfera, durante periodos considerables. Estas partículas, tienen un efecto complejo sobre el balance energético de la Tierra: estas pueden causar tanto enfriamiento al reflejar la luz solar de vuelta al espacio; como calentamiento mediante la absorción y la liberación de energía de calor en la atmósfera. Pequeñas partículas sólidas y líquidas pueden ser desvanecidas dentro de la atmósfera a través de una variedad de procesos naturales y artificiales, incluyendo las erupciones volcánicas, aerosoles en el mar, incendios forestales, y las emisiones generadas a través de las actividades humanas (NSF, 2009; Staines, 2008).

2.3 Factores humanos (antropogénicos)

2.3.1 Incremento en la concentración de gases de invernadero

Las actividades humanas contribuyen en el cambio climático provocando cambios en la atmósfera terrestre en cuanto a las cantidades de gases de efecto invernadero, aerosoles (partículas pequeñas) y la nubosidad se refieren. La mayor contribución conocida proviene de la combustión de combustibles fósiles, que libera el gas de dióxido de carbono a la atmósfera (IPCC, 2007a; 2007b; The National Academies, 2001; TERI, 2009; NSF, 2009).

Los cambios experimentados por las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles en la atmósfera, por la cubierta terrestre y por la radiación solar alteran el balance de energía del sistema climático y son factores causantes del cambio climático. Afectan la absorción, la dispersión y la emisión de radiación en la atmósfera y en la superficie de la Tierra. Los cambios positivos o negativos del balance de energía por efecto de esos factores se expresan en términos de forzamiento radiativo¹, que es la magnitud utilizada para comparar las influencias de naturaleza térmica sobre el clima mundial (The National Academies, 2010a; Staines, 2008; IPCC, 2007a; 2007b; 2001).

¹ El forzamiento radiativo es el cambio de la irradiancia neta (la ascendente menos la descendente), expresado en vatios por metro cuadrado (W/m^2), en la tropopausa por efecto del cambio de un originante externo del sistema climático (por ejemplo, un cambio de la concentración de dióxido de carbono, o de la energía emitida por el Sol).

Las actividades humanas emiten cuatro principales gases de efecto invernadero: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y los halocarbonos (grupo de gases que contienen flúor, cloro y bromo) (Figura 5). Estos gases se acumulan en la atmósfera, provocando un incremento de sus concentraciones con el paso del tiempo. En la era industrial se han producido incrementos significativos de todos estos gases. Todos estos incrementos se atribuyen a las actividades humanas (TERI, 2009; NSF, 2009; IPCC, 2007a; 2007b; 2001).

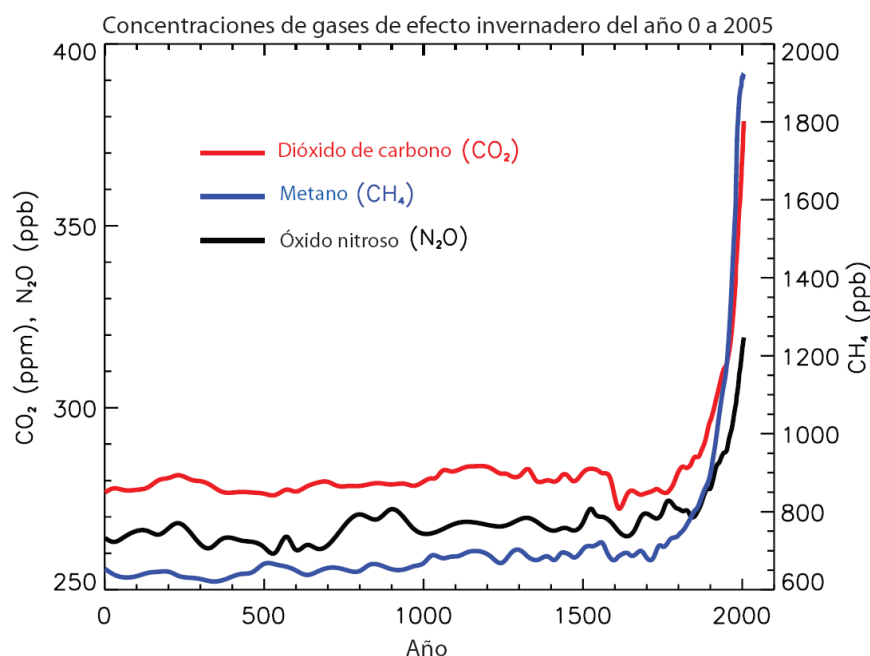


Figura 5. Concentraciones importantes de gases de efecto invernadero de larga vida en los últimos 2000 años. Los incrementos experimentados desde aproximadamente el año 1750 se atribuyen a las actividades humanas de la era industrial. Las unidades de concentración se miden en partes por millones (ppm) o partes por miles de millones (ppb), indicando la cantidad de moléculas de gases de efecto invernadero por millones o miles de millones de moléculas de aire, respectivamente, en una muestra de la atmosférica. Fuente: IPCC, 2007a.

El dióxido de carbono ha aumentado debido al uso de combustibles en el transporte, los sistemas de calefacción y aire acondicionado, la producción de cemento y otros bienes. Con la deforestación se libera CO_2 y se reduce la absorción

de CO₂ de las plantas. El dióxido de carbono se libera también en procesos naturales como la descomposición de la materia vegetal (IPCC, 2007a; The National Academies, 2001). Este gas ha crecido de manera muy elevada, pues ha aumentado en un 35 % desde 1850 (The National Academies, 2008a).

El metano ha aumentado como resultado de las actividades humanas relacionadas con la agricultura, la distribución del gas natural y los vertederos. También hay procesos naturales en los que se libera metano, como por ejemplo, en los humedales (IPCC, 2007a; 2001; The National Academies, 2001). El metano se ha incrementado en 150 %, y además, cada molécula es 25 veces más efectiva para atrapar el calor que el dióxido de carbono (The National Academies, 2008a).

Como resultado de las actividades humanas se emite también el óxido nitroso con el uso de fertilizantes y la quema de combustibles fósiles. Los procesos naturales de los suelos y los océanos también liberan N₂O (TERI, 2009; IPCC, 2007a; 2001). El óxido nitroso, casi 300 veces más eficaz para atrapar el calor que el dióxido de carbono, ha aumentado en más del 20 % (The National Academies, 2008a).

Las concentraciones de halocarbonos han aumentado básicamente debido a las actividades humanas. Entre los halocarbonos principales se incluyen los Clorofluorocarbonos (como CFC-11 y CFC-12), que se utilizaban extensivamente como agentes de refrigeración y en otros procesos industriales; antes de que se conociese que su presencia en la atmósfera causara el agotamiento del ozono en estratosfera; las altas concentraciones de Clorofluorocarbonos han disminuido como

resultado de las regulaciones internacionales diseñadas para proteger la capa de ozono (IPCC, 2007a; 2007b; 2001; The National Academies, 2001).

Continuas mediciones atmosféricas de dióxido de carbono han estado disponibles desde mediados del siglo 20 desde el Observatorio Mauna Loa, Hawai; y de todos los gases de invernadero significativos han sido controlados desde 1980 por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) mediante una red global de monitoreo del aire (Keeling y Whorf, 2005).

2.3.2 Cambios en el uso del suelo

Aunque los seres humanos han estado cambiando la vegetación natural durante miles de años por la tala de bosques y el establecimiento de cultivos (Ruddiman, 2003), el más grande de los cambios regionales en la cobertura de la vegetación continental se ha producido desde mediados del siglo XIX en el hemisferio norte y principios del siglo XX en el Hemisferio Sur (Bertrand *et al*, 2002). Cambios en la cubierta vegetal afectan el clima mediante la modificación de la reflectividad de la superficie y el ciclo hidrológico (The National Academies, 2006a; Tomer y Schilling, 2009; Tu, 2009; Staines, 2008).

Además de estos efectos de radiación directa, los cambios en la cobertura del suelo pueden afectar las fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero y la cantidad de polvo que se levanta a la atmósfera por el viento. Por ejemplo, las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono aumentan con la deforestación,

y las concentraciones de óxido nitroso se incrementan por el uso de fertilizantes nitrogenados en la actividad agrícola (The National Academies, 2006a).

La sustitución de cobertura vegetal por asfalto o concreto ha alterado de forma sustancial la manera en que la Tierra refleja la luz solar e irradia calor. Estos cambios afectan los patrones regionales de evaporación, lluvias e infiltración del agua al subsuelo, afectando la distribución de la energía en el planeta (Staines, 2008; Li *et al.*, 2009; The National Academies, 2006, 2001).

2.3.3 Cambios en el clima urbano

El crecimiento de la urbanización mundial ha sido muy acelerado desde la Segunda Guerra Mundial, de acuerdo a la base de datos poblacional Bureau (Population Reference Bureau²), el 50% de la población mundial (3.4 Billones) se encuentra establecida en las zonas urbanas (Mirzaei y Haghighat, 2010). Las Islas de Calor Urbanas (ICU) se refieren a la observación de aquellas metrópolis y ciudades que tienden a ser más calientes que sus alrededores rurales debido a diferencias físicas entre los paisajes urbanos y los naturales. La contaminación tiene un efecto de calentamiento en una ciudad, en adición al calor liberado por procesos industriales, calefacción de las casas y el uso de automóviles. Cuando las ciudades crecen, el

² (PRB) es una organización sin fines de lucro, la cual presenta informes a todo el mundo acerca de la población, la salud y el medio ambiente. Está localizado en Washington, DC, fue fundada en 1929 por Guy Irving Burch.

efecto de las ICU se hace más fuerte, creando una tendencia de calentamiento artificial en las temperaturas registradas (Giridharan y Kolokotroni, 2009).

El concreto y el asfalto de los ambientes urbanos tienden a reducir la reflectividad de una ciudad comparado con un ambiente natural, y una correspondiente reducción del drenaje natural (Mirzaei y Haghighat, 2010; Memon *et al.*, 2009). Esto aumenta la cantidad de radiación solar absorbida en la superficie. Las ciudades también tienden a tener menos árboles que los alrededores rurales y de ahí que los efectos refrescantes por la sombra y la evapotranspiración sean reducidos (Memon *et al.*, 2009, 2008; Kolokotroni y Giridharan, 2008; McLean, 2007). Los paisajes urbanos tienen otros impactos en el clima local, como la reducción de la velocidad de viento debido al bloqueo por el efecto de los edificios (Mirzaei y Haghighat, 2010; Memon *et al.*, 2009; McLean, 2007; Velazquez *et al.*, 2006; Rosenzweig, 2005).

2.3.4 Aerosoles y otros contaminantes

Las concentraciones naturales de aerosoles troposféricos se mantuvieron relativamente constantes antes de la época industrial. Los aerosoles atmosféricos, que afectan el balance radiativo de la Tierra, son principalmente relacionados con las actividades humanas; los aerosoles sulfatados provienen de la combustión de combustibles fósiles y los aerosoles orgánicos procedentes de la quema de biomasa y los cambio de uso de suelo (The National Academies, 2010b; 2006).

Con base en las estimaciones de los forzamientos climáticos del pasado, parece probable que los aerosoles, en un promedio global, han causado un impacto negativo en el forzamiento radiativo (enfriamiento) que ha tenido que compensar gran parte del forzamiento positivo por los gases de efecto invernadero. A pesar de que la distribución de los aerosoles tiende a ser a escala regional, la respuesta al forzamiento del clima, se espera que ocurra a grandes escalas, incluso hemisféricas y globales (The National Academies, 2001).

En la actualidad se calcula que los aerosoles de origen antropogénico conforman cerca del 10% del total contenido en la atmósfera. Las concentraciones de aerosoles troposféricos varían enormemente en espacio dependiendo de su tamaño, concentración, y distribución vertical (Zwiers y Zhang, 2003; The National Academies, 2008a).

2.4 Cambio climático

El calentamiento de la Tierra provocado por la civilización industrial es un fenómeno complejo, tanto en sus raíces como por su desarrollo y las consecuencias que puede tener. Se sabe que es inducido por el efecto invernadero a causa de las actividades humanas que modifican la composición de la atmósfera terrestre y se suma a la variabilidad natural del clima (IPCC, 2007a; López, 2000).

Desde 1900 la temperatura de la superficie global de la Tierra ha aumentado aproximadamente 0.8 °C, y desde los años 70 en alrededor de 0.5 °C. Este aumento de la temperatura se produjo durante un aumento significativo de la concentración

atmosférica de algunos gases de efecto invernadero, especialmente CO₂ y CH₄, que se sabe que es debido principalmente a las emisiones humanas (Scafetta, 2010, IPCC 2007, IPCC 2007a).

Para el IPCC (2007a), el término “cambio climático” denota un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadístico) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana. Este significado difiere del utilizado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), que describe el cambio climático como un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada en períodos de tiempo comparables.

A su vez, calentamiento global y cambio climático son conceptos estrechamente interrelacionados que en ocasiones son confundidos o utilizados como sinónimos. Cambio climático se refiere a un cambio significativo y persistente en el estado medio del clima o en su variabilidad. El cambio climático ocurre en respuesta a cambios en algunos aspectos del medio ambiente de la Tierra: estos incluyen cambios regulares en la órbita terrestre alrededor del Sol, re-disposición de los continentes a través de movimientos de placas tectónicas, o la modificación antropogénica de la atmósfera, y calentamiento global se refiere al incremento en la

temperatura promedio cerca de la superficie de la Tierra y en las capas más bajas de la atmósfera.

El uso común de “calentamiento global” a menudo se refiere al calentamiento que ha ocurrido como resultado del incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero derivado de las actividades humanas. Calentamiento global es un tipo de cambio climático, y que puede también conducir a otros cambios en las condiciones del clima (NSF, 2009; IPCC 2007a; López, 2000; González *et al.*, 2003).

2.4.1 El efecto invernadero natural y efecto invernadero amplificado

El Sol activa el clima de la Tierra irradiando energía de longitud de onda corta predominantemente en la parte visible o casi visible (por ejemplo ultravioleta) del espectro. Aproximadamente una tercera parte de la energía solar que alcanza la zona superior de la atmósfera terrestre se refleja directamente de nuevo al espacio. Las dos terceras partes restantes son absorbidas por la superficie y, en menor magnitud, por la atmósfera. Para equilibrar la energía entrante absorbida, la Tierra debe, como promedio, irradiar la misma cantidad de energía al espacio. Como la Tierra es mucho más fría que el sol, ésta irradia en longitudes de onda mucho más largas, sobre todo en la parte infrarroja del espectro (Figura 6) (González *et al.*, 2003; López, 2000).

La atmósfera, con la participación de las nubes, absorbe gran parte de esta radiación térmica emitida por los suelos y el océano y la vuelve a irradiar a la Tierra. Esto es lo que se denomina efecto invernadero. Sin embargo, las actividades

humanas, básicamente la quema de combustibles fósiles y la eliminación de bosques, han intensificado grandemente el efecto invernadero natural, dando lugar al calentamiento mundial o a la ampliación de efecto invernadero natural (IPCC, 2007a; 2007b; 2001). Los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el ozono, el metano, el óxido nitroso y los halocarbonos y otros gases industriales. Aparte de los gases industriales (Tabla 1), todos estos gases se producen naturalmente. En conjunto representan menos del 1% de la atmósfera. Ello es suficiente para producir un “efecto de invernadero natural” que mantiene el planeta unos 30° C más caliente de lo normal, lo que es esencial para la vida que conocemos (UNFCCC, 2003).

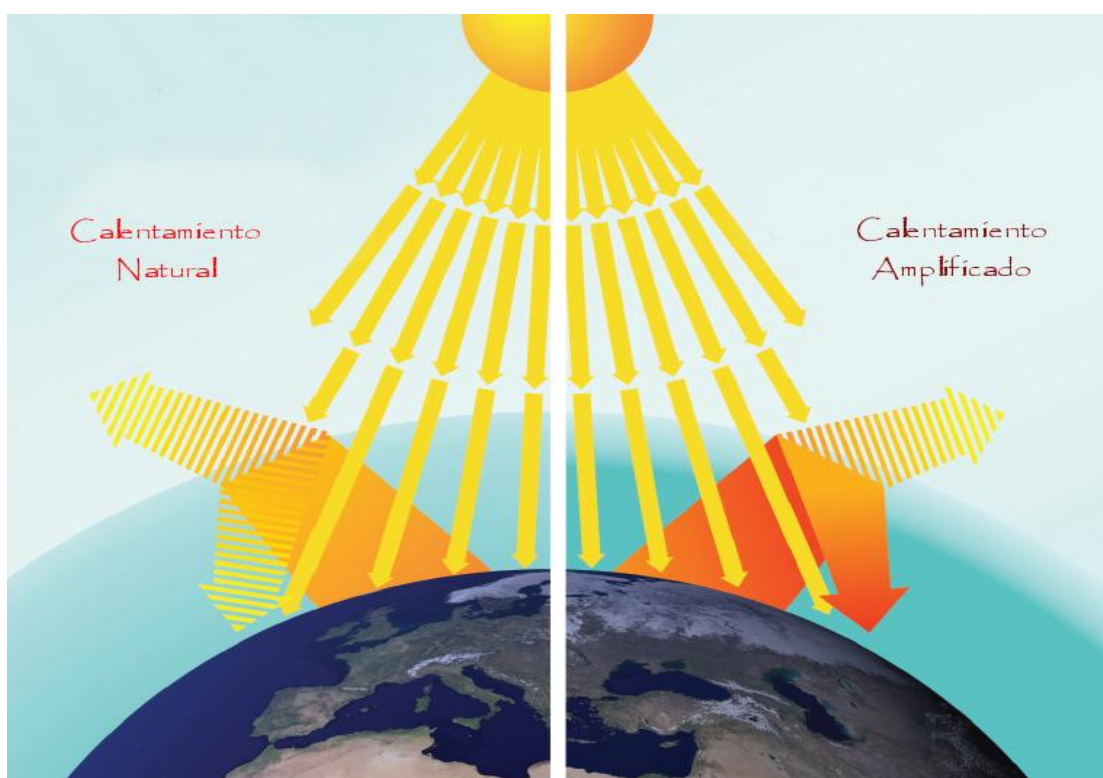


Figura 6. El efecto invernadero es un natural fenómeno por el cual los gases atrapan el calor en la atmósfera, principalmente el vapor de agua, la cual mantiene caliente la superficie de la Tierra. Las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles fósiles y cambios los patrones de cobertura del suelo, están aumentando las concentraciones de algunos de estos gases, amplificando el efecto invernadero natural. Fuente. IPCC, 2007.

GEI	Principales fuentes	Composición Molecular	GWP – SAR (CO ₂ e)	GWP – TAR (CO ₂ e)	Vida media en años	Contribución proporcional al efecto invernadero
Dióxido de carbono	Quema de combustibles fósiles, deforestación, quema de biomasa, producción de cemento	CO ₂	1	1	50 A 200	60 %
Metano	Humedales naturales, sembradíos de arroz, rumiantes, perforaciones de gas natural, conductos de ventilación y transmisión, quema de biomasa, minas de carbón, residuos sólidos.	(CH ₄)	21	23	12 ± 3	20 %
Oxido Nitroso	Fuentes biológicas en suelos y océanos, combustión, quema de biomasa, fertilizantes	(N ₂ O)	310	296	120	6 %
Halocarbonos (incluyen CFCs, HFCs, HCFCs, perfluorocarbonos)	Hidrofluorocarbonos: refrigeración, aire acondicionado, extinguidores, petroquímica, solventes en producción de espumas, refrigerantes, y aerosoles.	Hidrofluorocarbonos:			15 a 264	14%
		HFC-23	11,700	12,000		
		HFC-125	2,800	3,400		
		HFC-134a	1,300	1,300		
		HFC-152a	140	120		
	Perfluorocarbonos: Refrigerantes industriales, aire acondicionado, producción de aluminio, solventes, aerosoles.	HFC-227ea	2,900	3,500	2,600 a 50, 000	
		HFC-236fa	6,300	9,400		
		HFC-4310mee	1,300	1,500		
		CF ₄	6,500	5,700		
		C ₂ F ₆	9,200	11,900		
	Hexafluoruro de azufre: Aislante dieléctrico en transformadores e interruptores de redes de distribución eléctrica, refrigerante industrial, producción de aluminio, magnesio y otros metales.	C ₄ F ₁₀	7,000	8,600	3,200	
		C ₆ F ₁₄	7,400	9,000		
		SF ₆	23,900	22,200		

El potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) permite una contabilidad en términos de equivalentes de CO₂, o CO₂e. Las equivalencias basadas en el potencial de calentamiento global se sustentan en valoraciones realizadas en el SAR: Segundo Informe de Evaluación del IPCC) y en el TAR (Tercer Informe de Evaluación del IPCC, por sus siglas en inglés). Para la contabilidad de Reducciones Certificadas de Emisiones del Mecanismo para un Desarrollo Limpio (CER, por sus siglas en inglés) aplican las equivalencias del SAR. Otros efectos, como la acidificación de los océanos por altas concentraciones de CO₂ no aplican en este esquema de equivalencias. Otros gases de efecto invernadero no incluidos en el Protocolo de Kyoto, son considerados por el Protocolo de Montreal que protege la capa de ozono mediante la progresiva eliminación de esos gases. FUENTE: IPCC, 2001, www.bom.gov.au

Tabla 1. Gases de invernadero influenciados por las actividades humanas según el protocolo de Kyoto.

En 2005, cinco países fueron responsables de poco más de la mitad del CO₂ emitido a nivel mundial por consumo y quema de combustibles fósiles. En ese año se generaron alrededor de 27 mil millones de toneladas de bióxido de carbono, de las cuales 14,823 (54.6%) provinieron de Estados Unidos, China, Rusia, Japón e India. Destacan los casos de Estados Unidos y China, que fueron responsables de aproximadamente 22 y 19%, respectivamente, de las emisiones totales del planeta en ese año (SEMARNAT, 2009a).

México contribuyó, en 2005, con alrededor de 1.4% de las emisiones de GEI a nivel mundial, lo que lo ubica entre los primeros quince países por su volumen de emisión (Figura 7) (SEMARNAT, 2009a). El dióxido de carbono (CO₂) es el GEI antropogénico más importante. Sus emisiones anuales aumentaron en torno a un 80 % entre 1970 y 2004 (IPCC, 2007b).

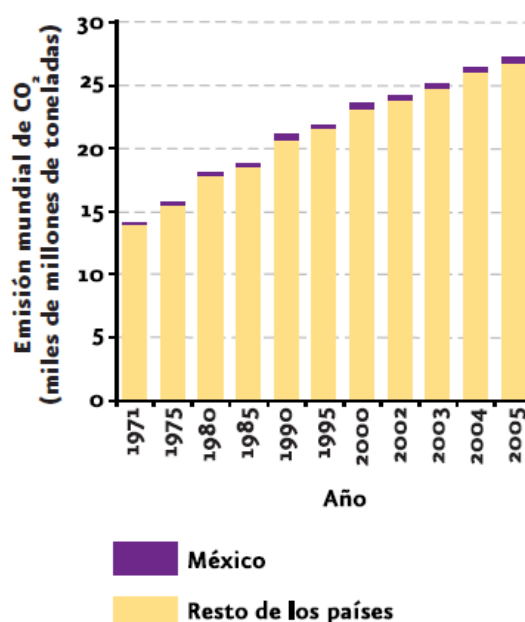


Figura 7. Emisión mundial de CO₂ por consumo de combustibles fósiles, 1971-2005. Fuente: SEMARNAT, 2009a

2.5 Cambio climático y Agricultura

La agricultura aporta más del 99.7% del abastecimiento de los alimentos en el mundo. Con la población humana proyectada para crecer de su nivel de 2005 de 6.5 mil millones a 9-11 millones en 2050, será cada vez más difícil cumplir con las necesidades básicas futuras de alimentación, dados los recursos finitos de la Tierra (Pimentel, 2009).

El cambio climático agrava las preocupaciones sobre la producción agrícola y seguridad alimentaria en todo el mundo (Rosenzweig, 2007). La agricultura es cada vez más una fuente importante de gases que contribuyen al efecto invernadero (Xiong y Khalil, 2009), así como una posible vía para la mitigación del cambio climático mediante el almacenamiento de carbono en los suelos y en la vegetación (FAO, 2002; Falloon *et al.*, 2009; Adhya *et al.*, 2009); sin embargo la agricultura mundial ha de hacer frente a muchos problemas en los próximos decenios, entre ellos está la degradación de los suelos y los recursos hídricos la cual ha de crear grandes presiones en la consecución de la seguridad alimentaria para las poblaciones en pleno crecimiento. Estas condiciones pueden verse agravadas por el cambio climático (FAO, 2002; Adhya *et al.*, 2009; UNFCCC, 2003).

Los efectos potenciales directos del cambio climático en la agricultura se refleja en los cambios estacionales de temperatura y precipitación en las condiciones agroclimáticas (Qaderi y Reid, 2009; Sivakumar *et al.*, 2005), lo cual altera las estaciones de crecimiento, así como los calendarios de siembra y cosecha de los cultivos; la disponibilidad de agua, y la aparición de poblaciones de plagas y

enfermedades. La evapotranspiración, fotosíntesis y producción de biomasa se verían alteradas, así como la aptitud del suelo (Rosegrant *et al.*, 2008; Lichtfouse, 2009).

Dentro del marco de la productividad de los sistemas agrícolas, estos dependen principalmente de la distribución temporal y espacial de la precipitación y de la evaporación, así como de la disponibilidad de recursos de agua dulce para el riego, especialmente de cultivos. Los sistemas de producción de áreas marginales en términos hídricos estarían abocados a una mayor vulnerabilidad climática y a un mayor riesgo en caso de cambio climático, debido a factores como: por ejemplo la degradación de los recursos terrestres por erosión del suelo, la sobreexplotación de las aguas subterráneas y la consiguiente salinización, o el pastoreo excesivo en tierras secas (FAO, 2003; Trethowan *et al.*, 2010; Pimentel, 2009; Bruinsma, 2003).

En esas áreas marginales, la agricultura en pequeña escala es especialmente vulnerable al cambio y variabilidad del clima, y los factores de estrés socioeconómicos suelen agravar unas condiciones medioambientales ya de por sí difíciles (Bates *et al.*, 2008; Rosenzweig, 2007). El agua desempeña un papel crucial 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 (Bates *et al.*, 2008; Pimentel, 2009; Bruinsma, 2003). 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 (Bates *et al.*, 2008).

Mientras que un déficit excesivo de agua se traduce en vulnerabilidad de la producción, un exceso de agua puede tener también efectos no deseados sobre la productividad de los cultivos, ya directamente (por ejemplo, afectando a las propiedades del suelo y dañando el crecimiento vegetal), ya indirectamente (por ejemplo, impidiendo o retrasando las necesarias labores agrícolas). Los episodios de precipitación intensa, la humedad excesiva del suelo y las crecidas interfieren en la producción de alimentos y en los medios de subsistencia rurales a nivel mundial (Rosenzweig *et al.*, 2002; FAO, 2003; Kurukulasuriya y Rosenthal, 2003).

El cambio climático tendrá efectos muy diversos sobre la agricultura. Se puede esperar que las concentraciones globales de dióxido de carbono en la atmósfera aumenten de 350 ppm a 400 ppm para 2030. El dióxido de carbono hace 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. El aumento de las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera también estimulará la fotosíntesis y tendrá un efecto fertilizante en numerosos cultivos (FAO, 2002; Ainsworth y McGrath, 2010; Qaderi y Reid, 2009). Se prevé que las temperaturas globales medias aumenten entre 1.4 °C y 5.8 °C para 2100. Se prevé un aumento ligero del rendimiento de los cultivos en latitudes de medias a altas, cuando aumente la temperatura media local de 1-3 °C, según el tipo de cultivo, y una disminución a partir de ahí en algunas regiones (FAO, 2002; Kurukulasuriya y Rosenthal, 2003).

A pesar de lo mencionado anteriormente a escala global los agricultores ya están sufriendo de primera mano las consecuencias: fenómenos extremos como incendios, inundaciones o sequías, heladas tempranas o tardías, aumento de la

variabilidad estacional, incremento de la variabilidad inter-estacional e interanual de las precipitaciones con repercusión en los ciclos de cultivo y aparición de nuevas enfermedades en animales y vegetales (Lichtfouse, 2009; Trethowan *et al.*, 2010).

Todos estos fenómenos se reflejan en el aumento actual y futuro del riesgo de pérdida de los rendimientos agrícolas (IPCC, 2007a; Copa-Cogeca, 2008; Rosenzweig, 2007; FAO, 2002). En zonas peor dotadas de agua, especialmente en los trópicos, el aumento de las temperaturas aumentará las pérdidas por evapotranspiración y reducirá los niveles de humedad del suelo. Algunas zonas cultivadas se harán inadecuadas para el cultivo y algunas de las zonas de pastos tropicales pueden hacerse cada vez más áridas. 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 (FAO, 2002; Sivakumar *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2005; Kurukulasuriya y Rosenthal, 2003).

Los procedimientos para pronosticar los efectos de las variaciones climáticas en la agricultura son relativamente recientes. En el decenio de los 1970's fue característico el uso de modelos de regresión para inferir relaciones estadísticas entre el clima y sus efectos potenciales en los rendimientos agrícolas (Conde *et al.*, 2004; Krishnan *et al.*, 2009; Burton y Lim, 2005).

El Fondo de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) decidió, durante la Conferencia Alimentaria Mundial de 1974, establecer un sistema de información y alerta sobre alimentación y agricultura a nivel

mundial, teniendo como objetivos principales el seguimiento de las condiciones del cultivo, así como el pronóstico de rendimientos, especialmente en los países en desarrollo. Esta iniciativa propició el desarrollo de modelos agroclimáticos para la estimación de los impactos del clima en los cultivos (Conde *et al.*, 2004; Tebaldi y Knutti, 2010; White y Hoogenboom, 2010; Lobell, 2010).

2.5.1 Cambio climático y Agricultura en México

En México, los desastres de origen meteorológico ocasionan impactos negativos en la población, el medioambiente y diversos sectores económicos. La magnitud de los fenómenos meteorológicos extremos se ha incrementado, lo cual es difícil atribuir o no directamente al cambio climático; sin embargo el país es cada vez más vulnerable a condiciones extremas de tiempo y clima (SEMARNAT, 2009a).

La agricultura de nuestro país es vulnerable a las variaciones climáticas extremas, como son las sequías, las inundaciones y las heladas, debido a que se desarrolla fundamentalmente en condiciones de secano. Conde *et al.*, (2000) realizaron un estudio sobre el cultivo del maíz utilizando el modelo de simulación CERES-Maize, donde encontraron que los efectos de un cambio climático en los rendimientos de maíz de temporal serían negativos, con acortamientos en la estación de crecimiento del maíz, particularmente en la fase de llenado de grano.

Sin embargo, en los sitios con una altura mayor de los 2000 msnm en el centro de México, los incrementos de temperatura propuestos resultarían benéficos, aún en los casos de decrementos en la precipitación. El cultivo de maíz de temporal

se realiza prácticamente en todo el país, aún en aquellas zonas con climas, suelos o pendientes no propicios. Contrasta con lo anterior el alto consumo del maíz como alimento básico en la mayor parte de la población (Liverman, 1994), tanto rural como urbana (250 kg por habitante/ año).

A su vez, resultados de un estudio reciente (INE, 2007) señalan que un incremento en la temperatura ambiental podría intensificar el desarrollo del cultivo del maíz, debido a una mayor tasa de acumulación de calor. Lo anterior favorecería la reducción del ciclo fenológico, aunque con un potencial decremento en la producción al contar con menos tiempo disponible para absorción de nutrientes, para la intercepción de energía solar y para las actividades metabólicas. Dicha situación podría presentarse para el cultivo de maíz en tres regiones definidas en el estudio como es el Centro de México, Chiapas y Jalisco, con afectación potencial en las fases críticas del cultivo, como la floración, la formación o el llenado del grano, en caso de que los incrementos de temperatura coincidan con alguna de éstas.

En el Distrito de Riego de Río Fuerte, Sinaloa (075) se estima una reducción promedio en la duración del ciclo fenológico del maíz de otoño-invierno, del 4%, 7% y 13%, para los años 2020, 2050 y 2080, con respecto a las condiciones actuales (Ojeda *et al.*, 2006).

De la discusión de los efectos del fenómeno El Niño en México, particularmente en el régimen de lluvias, es claro que la disminución de la precipitación durante veranos de El Niño afecta el ciclo agrícola primavera - verano, fundamental para la producción agrícola en nuestro país. Las prácticas agrícolas de

temporal en México son particularmente sensibles a cualquier alteración en la estación lluvias, ya sea por retraso, por irregularidad o deficiencia persistente en las precipitaciones. Condiciones de sequía pueden provocar desde la pérdida de algunos cultivos, hasta hambrunas y migraciones en vastas regiones del país (Conde *et al.*, 2004).

La sequía asociada a El Niño tiene efectos diferentes dependiendo de la región considerada. Liverman (1990) encontró que en Puebla, los efectos de la sequía para el período de 1982 - 1983 fueron mayores para los productores con acceso a tecnologías agrícolas modernas y créditos, derivados del Plan Puebla (Peña y Ramírez, 1993), que para los productores que siguieron esquemas de agricultura tradicional y aún para los que no sembraron y emigraron temporalmente a las ciudades, debido a que los primeros, además de perder la cosecha, aumentaron sus deudas.

En 1998 padecimos por largos meses un calor abrumador. Ese año fue uno de los más cálidos del siglo por efecto del fenómeno El Niño, el cual a su vez ha sido afectado por el cambio climático, incrementando su frecuencia e intensidad. Tanto en México como en otras regiones del planeta disminuyeron y se retrasaron las lluvias, lo que provocó una grave sequía que afectó a diferentes actividades productivas, entre ellas la agricultura, la ganadería y la pesca. En el 2005, que ha sido el más caliente de los últimos cien años, el retraso en las lluvias de verano resultó en una caída de más de 13% en la producción agrícola del país (SEMARNAT, 2009a).

El área de cultivos dañada fue de 669 mil hectáreas y los costos totales de la sequía ascendieron a cerca de 779 millones de pesos. El cambio climático no sólo afecta los volúmenes de producción, sino también su calidad. A pesar de que se ha manejado que la agricultura puede ser beneficiada por los efectos del cambio climático, la realidad es que no es del todo cierto. Por ejemplo, se ha encontrado que la elevada concentración de CO₂, si bien provoca que en el corto plazo algunos cultivos sean más productivos, también genera que su calidad nutritiva se vea afectada negativamente. Un estudio publicado en 2008 en la revista *Global Change Biology*, indica que el incremento de CO₂ en el aire reduce la concentración de proteínas en diversos tipos de cultivos, en cuyo caso se encuentran cebada, arroz, trigo y papa, dónde se detectaron disminuciones de entre 10 y 15% (SEMARNAT, 2009a).

En base a la Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, algunos de los efectos directos del cambio climático en la agricultura de México que podrían presentarse de manera diferenciada en algunas regiones, y de acuerdo a sus condiciones particulares son los siguientes (SEMARNAT 2009b):

- Cambios en el desarrollo y productividad de los cultivos, por afectaciones en los ciclos fenológicos.
- Incremento en el periodo libre de heladas de las zonas agrícolas, que se traduciría en un mayor periodo útil para el desarrollo de algunos cultivos y aumento en el número de ciclos agrícolas por año.

- Reducción en la superficie cultivable y en los rendimientos generados en zonas de temporal, debido al aumento en la duración e intensidad de la sequía.
- Afectaciones en los distritos de riego del noroeste del país, en cuanto a disponibilidad de agua.
- Reducción en la precipitación y aumento en la temperatura que limitará la producción, en el ciclo primavera- verano en los distritos de riego localizados en las zonas áridas y semiáridas de México.

2.6 Modelación y simulación de procesos

Simular significa imitar, reproducir, o aparentar. El arte de la simulación es tan antiguo como el hombre (Swain *et al.*, 2006). La simulación es una analogía con la realidad, que es común en muchas áreas; la cual se refiere a la actividad con la cual el usuario puede obtener conclusiones relativas sobre comportamiento de un sistema dado por medio del estudio de un modelo cuya relación causa-efecto es la misma (o similar) a la del sistema original. Así entonces, la simulación se circunscribe al desarrollo y uso de modelos que describen realísticamente el comportamiento de un sistema (Swain *et al.*, 2006; Sánchez, 2005).

Con base en la definición anterior, los modelos pueden ser un prototipo, una representación simplificada, así como una abstracción de la realidad (sistema). Los

modelos pueden ser clasificados en diferentes tipos: conceptuales, físicos o matemáticos. Cada hipótesis, que es evaluada, tiene un modelo conceptual que lo soporta. Las representaciones físicas a baja escala (modelos físicos) de un sistema se han utilizado por los ingenieros durante mucho tiempo. Pero, estos son raramente utilizados para representar sistemas biológicos. Cuando el comportamiento de un sistema se describe matemáticamente, a través de ecuaciones, entonces la representación del sistema es un modelo matemático (Krishnan *et al.*, 2009; Aggarwal *et al.*, 2006a).

El modelo matemático representa cuantitativamente asumiendo hipótesis sobre el sistema real, lo que permite deducir sus consecuencias. Gradualmente estos han llegado a ser más populares, y aún más sofisticados, debido al avanzado nivel computacional y las operaciones lógicas que se han vuelto más accesible con los ordenadores (Krishnan *et al.*, 2009).

Los modelos matemáticos pueden ser clasificados dentro de una serie de clases, pero las dos más importantes son: (i) empírica, a veces llamados modelos correlativos o estadísticos que describen las relaciones entre las variables sin hacer referencia a los procesos correlacionados y (ii) los modelos mecanicistas, a nivel de procesos o simuladores, que también se llaman modelos explicativos, tratando de representar las relaciones de causa-efecto entre las variables. El principal objetivo de la modelación matemática es, evidentemente producir una herramienta que puede utilizarse para probar hipótesis, para generar hipótesis alternativas, para sugerir experimentos, para defenderlas, y además, para predecir el comportamiento del sistema en situaciones desconocidas (Krishnan *et al.*, 2009)

Finalmente, las razones del porque utilizar la simulación de procesos para la solución de problemas se pudieran agrupar en dos grandes categorías: 1) como herramienta de investigación y 2) como herramienta para el soporte de decisiones. En el primer caso, la simulación de procesos asiste en el entendimiento y (quizás cuantificación) ex-ante de las relaciones funcionales entre variables de interés, con la finalidad de dirigir el esfuerzo y los recursos de investigación de manera certera. En el segundo caso, la simulación de procesos pretende auxiliar al tomador de decisiones en cuanto a la evaluación del efecto de una determinada acción sobre el sistema en estudio (Sánchez, 2005).

2.7 Modelos climáticos

Se tiene un nivel de confianza considerable en cuanto al hecho de que los modelos climáticos proporcionan estimaciones cuantitativas creíbles sobre los cambios climáticos futuros, en particular, a escala continental y más allá de ésta (IPCC, 2007a). En la actualidad, los resultados de los modelos climáticos constituyen la base para las proyecciones futuras de cambio climático (IPCC, 2010; Lobell y Burke, 2010; Ziervogel *et al.*, 2008).

Estos modelos son representaciones matemáticas del sistema climático, expresados como códigos computacionales y son ejecutados en poderosos ordenadores, los cuales se basan sobre la termodinámica, movimiento de los fluidos, reacciones químicas, y transferencia de radiación del clima de la Tierra, lo más completo según lo permita la viabilidad de cómputo y la comprensión científica de su formulación (IPCC, 2010; 2007a; The National Academies, 2008b; 2006). Su

objetivo es calcular el estado de evolución de la atmósfera global, del océano, la superficie de la tierra, y el hielo marino en respuesta a forzamientos externos tanto de causas naturales (como la actividad solar y volcánica) como de causas humanas (como las emisiones de gases de invernadero y cambios de uso de suelo) (The National Academies, 2008b; 2001).

Tales modelos han sido usados durante varios decenios. Se están continuamente mejorando para aumentar su amplitud con respecto a la resolución espacial, duración temporal, la complejidad biogeoquímica, y la representación de importantes efectos de los procesos que no pueden prácticamente ser calculados sobre la escala global (Li y Qi, 2010, Chen *et al.*, 2010; Hashmi *et al.*, 2010; NSF, 2009; The National Academies, 2001).

El rápido aumento en los últimos decenios en la disponibilidad, potencia y velocidad computacional ofrece oportunidades para obtener más detalles, modelos más realistas, pero que requieren actualización periódica de los equipos básicos para evitar la obsolescencia. Los modelos climáticos calculan los resultados después de tomar en cuenta el gran número de variables climáticas y las complejas interacciones inherentes en el sistema climático (IPCC, 2010; The National Academies, 2008b; 2006). Su propósito es la creación de una realidad simulada que pueda ser comparado con la realidad observada, sujetos a correspondientes mediciones promedio. Así, tales modelos pueden ser evaluados a través de comparación con las observaciones, siempre que las observaciones convenientes existan (NSF, 2009; The National Academies, 2001).

Además, las soluciones del modelo se pueden diagnosticar para evaluar las causas que contribuyen a un fenómeno en particular. Debido a que el clima es incontrolable (aunque influenciable por los seres humanos), los modelos son el único laboratorio experimental disponible para el clima. También son la herramienta adecuada para el pronóstico hipotético del clima en los años y siglos venideros. Sin embargo, los modelos climáticos son imperfectos. Su capacidad de simulación es limitada por las incertidumbres en su formulación, el tamaño limitado de sus cálculos, y la dificultad de la interpretación de sus respuestas que presentan complejidad tanto como en la naturaleza (The National Academies, 2001; Lobell y Burke, 2010; Ziervogel *et al.*, 2008).

Los modelos climáticos son instrumentos científicos, y no bolas de cristal. Los importantes instrumentos de modelación del clima consumen enormes recursos informáticos y resultan tan caros que sólo pueden llevarse a cabo unos pocos experimentos de este tipo por año en todo el mundo. Y prosigue, la labor que lleva interpretar los resultados de la simulación informática que con frecuencia es mayor que la necesaria para llevar a cabo el experimento. Todo este trabajo y gastos pueden dar modelos que se aproximen a la verdad (UNFCCC, 2003).

Pero aun los modelos más perfeccionados son representaciones aproximadas de un sistema sumamente complejo, por lo que nunca serán una guía infalible para el futuro. Por consiguiente, es preciso pensar que los modelos climáticos son instrumentos perfeccionados para extender nuestro conocimiento del clima actual y pasado en un futuro no explorado. Como el cambio climático ha de suceder sólo una

vez, son el mejor instrumento del que disponemos (UNFCC, 2003; Chue *et al.*, 2010; Tebaldi y Knutti, 2010; Lobell, 2010; Staines, 2008).

2.8 Modelos de cultivo

La ciencia de la agricultura depende de las actividades de investigación para: (i) la adquisición de conocimientos, (ii) el orden y desarrollo del conocimiento para la comprensión de ese conocimiento, y (iii) la aplicación y/o entendimiento de los conocimientos para la solución de problemas prácticos. Los modelos matemáticos pueden ser utilizados de diferentes maneras dentro de cada una de estas tres actividades. Básicamente, una descripción simplificada de un sistema, un modelo matemático nos puede ayudar a comprender mejor el funcionamiento de un sistema real y las interacciones de sus componentes principales (Krishnan *et al.*, 2009; Schlenker, 2010; Tebaldi y Knutti, 2010).

El uso importante de modelos en las ciencias agrícolas puede ser útil para diferentes propósitos (i) análisis de las respuestas observadas en el crecimiento de las plantas en función de ciertos factores, para incrementar nuestra comprensión sobre el crecimiento de los cultivos y proporcionar la dirección a una determinada investigación; (ii) la simulación del crecimiento de las plantas por modelos consistentes de muchos niveles y componentes de interacción, como una ayuda para la enseñanza y el aprendizaje; y (iii) los pronósticos de la respuesta de las plantas a determinadas condiciones climáticas y de manejo, como herramienta para la gestión y toma de decisiones (Krishnan *et al.*, 2009; Aggarwal *et al.*, 2006a; Aggarwal *et al.*, 2006b).

Los modelos ecofisiológicos fueron las herramientas más utilizadas para estimar el impacto potencial del cambio climático en los agroecosistemas en la Tercera y Cuarta Evaluación de los informes del IPCC (Gitay *et al.*, 2007; Easterling *et al.*, 2007) y son ampliamente utilizados en otras partes de la investigación sobre el cambio climático.

Estos modelos, también conocido como "modelos de cultivo" o "modelos de simulación", intentan encapsular los mejores conocimientos disponibles sobre la fisiología de plantas, agronomía, ciencias del suelo y la agrometeorología a fin de predecir cómo una planta crecerá en condiciones ambientales específicas. Los modelos son "ecofisiológicos" debido a que utilizan descripciones matemáticas de la fisiología, procesos físicos y químicos para simular el crecimiento de los cultivos y el desarrollo a través del tiempo.

Los procesos fisiológicos considerados pueden incluir la fotosíntesis, la respiración, el crecimiento y partición, el desarrollo de estructuras reproductivas, la transpiración y la absorción de agua y nutrientes. Procesos químicos y físicos pueden implicar transformaciones químicas del suelo, los flujos de energía, y la difusión de los gases de entrada y salida de las hojas, entre otros.

Para predecir el crecimiento del cultivo, el modelo requiere que las condiciones iniciales sean especificadas, como el estado de los nutrientes del suelo y el estatus hídrico, la fecha de siembra y densidad de plantación. Los datos sobre la temperatura, radiación solar, precipitación, o de otros parámetros meteorológicos son entonces utilizados para determinar el desarrollo y el crecimiento del cultivo y su

progreso a través de las estaciones de crecimiento (White y Hoogenboom, 2010; Lobell, 2010; Tebaldi y Knutti, 2010).

La mayoría de los modelos funcionan a intervalos de tiempo de todos los días, a partir de la fecha de plantación y finaliza con la predicción de la cosecha o la madurez fisiológica, dependiendo del cultivo. La información sobre riego, aplicación de fertilizantes, los eventos de labranza, las plagas, enfermedades u otros factores también pueden ser considerados (White y Hoogenboom, 2010; Schlenker, 2010).

En el sector agrícola a nivel mundial diversos modelos han sido desarrollados de acuerdo a su necesidad y otros de forma más integral para cultivos específicos, por mencionar algunos modelos se encuentran: Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM), Model of Agricultural Adaptation to Climatic Variation (MAACV), General-Purpose Atmospheric Plant Soil Simulator (GAPS 3.1), Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC), Alfalfa 1.4, AFRC-Wheat, RICEMOD, GOSSYM/COMAX y GLYCIM, entre otros.

2.9 Métodos y Herramientas de Reducción de escala (Downscaling)

Los Modelos de Circulación General (GCMs) son utilizados para simular el clima presente y proyectar el clima futuro incluyendo los forzamientos debido a los gases de efecto invernadero y los aerosoles, entre otros factores. Por lo general los GCMs dividen la atmósfera y el océano en una malla horizontal con una resolución de 2 a 4 ° de latitud y longitud, con 10 a 20 capas en la vertical, típicamente del orden

de 150 a 300 km por 150 a 300 km de resolución (Shaka, 2008; Wilby y Dawson, 2007; UNFCCC, 2005; Chu *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2010).

La mayoría de los modelos de circulación general simulan los procesos a escala global y continental, y en detalle ofrecen una representación promedio bastante precisa del clima planetario (Shaka, 2008; Timbal *et al.*, 2009; Hessami *et al.*, 2008; Fowler *et al.*, 2007).

Durante el último decenio, la sofisticación de estos modelos se ha incrementado y su capacidad para simular el clima presente y el pasado, a escala mundial y continental ha mejorado sustancialmente. Sin embargo, mientras que los GCMs han demostrado gran habilidad en la escala hemisférica y continental e incorporan una gran parte de la complejidad del sistema global, estos son inherentemente incapaces de representar las características locales y dinámicas a una escala inferior a la malla de gran resolución, por ejemplo, características como la topografía y los procesos convectivos de las nubes (Dibike y Coulibaly, 2005; Shaka, 2008; Chen *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2010; Kannan y Ghosh, 2010; Li y Qi, 2010; Wilby y Dawson, 2007).

Los métodos utilizados para convertir las salidas de los modelos de circulación general dentro de variables meteorológicas locales se definen generalmente como técnicas de "reducción de escala" (Shaka, 2008). Hay dos categorías de regionalización climática, nombradas reducción de escala dinámica y reducción de escala estadística (The National Academies, 2010a; Chen *et al.*, 2010;

Chu *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2010; Tryhorna y DeGaetano, 2010; Shaka, 2008; Fowler *et al.*, 2007).

2.9.1 Reducción de escala dinámica

La reducción de escala dinámica es un método de extracción de información a escala local mediante el desarrollo y el uso de modelos de área limitada (LAMs) o modelos climáticos regionales (RCMs), con información de modelos de circulación general de gruesa resolución utilizados como condición de frontera. Los pasos básicos son entonces utilizar el modelo de circulación general para simular la respuesta de la circulación global a forzamientos a gran escala, y los modelos climáticos regionales para explicar los forzamientos a una sub-escala del modelo de circulación general; tales como las complejas características topográficas y la heterogeneidad de cobertura del suelo basados en una forma física, y entonces incrementar la simulación de la circulación atmosférica y las variables climáticas a escalas espaciales más finas (Shaka, 2008; Chen *et al.*, 2010; Chu *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2010).

Los modelos climáticos regionales se han desarrollado recientemente y pueden alcanzar la resolución horizontal del orden de decenas de kilómetros o menos, en determinadas zonas de interés. A pesar del hecho, de que la resolución de los modelos climáticos regionales es más fina que los modelos de circulación general, hay varias limitaciones reconocidas. Los modelos climáticos regionales aún requieren considerables recursos computacionales y son demasiado caros para ejecutarse, casi igual que un modelo de circulación general global. Por lo tanto, sigue

existiendo la necesidad de re-escalar los resultados de estos modelos a los sitios o localidades individuales para los estudios de impacto (Xu, 1999; Chu *et al.*, 2010; Tryhorna y DeGaetano, 2010; Huang *et al.*, 2010; Ziervogel *et al.*, 2008; Wilby y Dawson, 2007; Fowler *et al.*, 2007; UNFCC, 2005).

2.9.2 Reducción de escala Empírica (estadística)

El método de reducción de escala empírica (estadística) implica el desarrollo de una relación cuantitativa entre las variables atmosféricas a gran escala (predictores) y las variables superficiales locales (predictandos). Desde esta perspectiva, la información sobre el clima regional o local se deriva, en primer lugar de la determinación de un modelo estadístico que relaciona las variables climáticas a gran escala (o "predictor") a las variables regionales y locales (o "predictandos") (Shaka, 2008; Hessami *et al.*, 2008; Ziervogel *et al.*, 2008; UNFCC, 2005).

Entonces, la salida a gran escala de la simulación del modelo de circulación general es alimentado dentro del modelo estadístico para estimar las características de clima locales y regionales correspondientes. La forma más común es que el predictando(s) está en función del (los) predictor(s). El concepto de clima regional está condicionado por el estado a gran escala, descrito como sigue:

$$R = F(L)$$

Donde, **R** representa el predictando (variables del clima regional o local), **L** es el predictor (un conjunto de variables climáticas a gran escala), y **F** es una función

determinista/estocástica condicionada por L y que tiene que ser encontrada empíricamente a partir de conjuntos de datos observados o modelados. Los conjuntos de predictores son generalmente derivados de la presión del nivel del mar, altura geopotencial, viento, la humedad absoluta o relativa y las variables de temperatura (Shaka, 2008; Chen *et al.*, 2010; Hessami *et al.*, 2008; Fowler *et al.*, 2007; Wilby *et al.*, 2004).

Una de las principales ventajas del método de reducción de escala estadístico es que es computacionalmente de bajo costo, y por lo tanto, se puede aplicar fácilmente en la salida de distintos experimentos con modelos de circulación general. Otra ventaja es que puede utilizarse para proporcionar información específica del sitio, lo cual puede ser fundamental para muchos estudios sobre cambio climático (Wilby *et al.*, 2004).

A pesar de esta limitación, el método de reducción de escala estadístico se aplicó en este estudio porque este método requiere menos recursos computacionales y menos conocimiento de la química atmosférica en comparación con el método de reducción de escala dinámico. Una amplia gama de técnicas de reducción de escala empírica/estadística se han desarrollado durante los últimos años y cada método se encuentra en una de las tres principales categorías, denominadas: métodos de regresión (funciones de transferencia), los generadores de tiempo estocásticos y generadores de tiempo sinópticos (Shaka, 2008; Chu *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2010; Kannan y Ghosh, 2010).

I. modelo de regresión

Los métodos de reducción de escala basados en la regresión confían en la relación cuantitativa directa entre las variables climáticas a escala local (predictando) y las variables que contiene la información del clima a gran escala (predictores) a través de algún tipo de función de regresión. Los diseños individuales de reducción de escala difieren de acuerdo a la elección de la función de transferencia matemática, las variables predictoras o el procedimiento de ajuste estadístico (Shaka, 2008; Li y Qi, 2010; Chen *et al.*, 2010).

Una de las herramientas de reducción de escala estadístico reconocidas que implementa un método basado en la regresión es el Modelo Estadístico de Reducción de Escala (SDSM). SDSM 4.2 facilita el rápido desarrollo de múltiples a bajo costo escenarios para un solo sitio de las variables climatológicas superficiales con forzamientos de clima presente y futuro. Adicionalmente, el software realiza tareas auxiliares de control de calidad de datos y transformación, pre-selección de variables predictoras, la calibración automática del modelo, pruebas de diagnóstico base, análisis estadísticos y graficación de los datos climáticos (Wilby y Dawson, 2007; Li y Qi, 2010; Chu *et al.*, 2010; Kannan y Ghosh, 2010; Ziervogel *et al.*, 2008; Fowler *et al.*, 2007).

II. Generadores de tiempo estocástico

Los generadores de tiempo (WGs) son modelos que replican el atributo estadístico de las variables climáticas locales (como la media y la varianza), pero no

la secuencia de eventos observados. Estos modelos son basados en representaciones de la ocurrencia de precipitación a través de los procesos de Markov para las transiciones o probabilidades lluvia/no lluvia o húmedo/seco. Las variables secundarias, tales como cantidades de precipitación diaria, temperaturas y radiación solar son a menudo modeladas condicionalmente con base en la ocurrencia de precipitación. Los generadores de clima están adaptados para la reducción de escala estadística por el condicionamiento de sus parámetros de predicción atmosférica a gran escala, el estado del tiempo o las propiedades de precipitación (Wilby *et al.*, 2004; Wilby y Dawson, 2007; Chen *et al.*, 2010; Kannan y Ghosh, 2010; Fowler *et al.*, 2007).

Una herramienta conocida de reducción de escala estocástica para su uso en estudios de impacto climático es el Long Ashton Research Station Weather Generator (LARS-WG). LARS-WG es un generador de tiempo estocástico que puede ser utilizado para la simulación de los datos del tiempo para un solo sitio en dos condiciones de clima; actuales y futuras. Estos datos están en forma de series de tiempo diarias para un conjunto de variables climáticas, como son: precipitación (mm), temperatura máxima, temperatura mínima (°C) y la radiación solar ($\text{MJm}^{-2} \text{ día}^{-1}$) (Semenov, 2002).

III. Generadores de clima sinópticos

Estos generadores de clima implican la agrupación local de datos meteorológicos con relación a la prevalencia de los patrones de circulación atmosférica. Estos métodos clasifican el estado del tiempo agrupando los días dentro

de un número finito de tipos o estados del tiempo discretos de acuerdo a su similitud sinóptica. Por lo general, los estados del tiempo son definidos mediante la aplicación de análisis de grupos de campos atmosféricos o el uso de sistemas de clasificación de circulación subjetiva (Wilby *et al.*, 2004; Kannan y Ghosh, 2010; Wilby y Dawson, 2007; Fowler *et al.*, 2007).

2.10 Statistical Downscaling Model (SDSM)

El modelo estadístico de reducción de escala (SDSM) es un método de regresión lineal multivariado para la generación de escenarios climáticos futuros para evaluar el impacto del cambio climático global. Este modelo es una combinación de modelos de función de transferencia y de un generador de clima estocástico, utilizando dos tipos de datos diarios. El primer tipo corresponde a los predictandos locales de interés (por ejemplo, temperatura, precipitación) y el segundo tipo corresponde a los datos de los predictores a gran escala (NCEP y GCM) de una celda de la malla más cercana al área de estudio (Wilby *et al.*, 2002; Hashmi *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2010).

Durante la reducción de escala con SDSM, un modelo de regresión lineal múltiple es derivado de unas pocas variables predictoras seleccionadas a gran escala y los predictandos a escala local; tales como la temperatura y la precipitación. Los predictores relevantes a gran escala son seleccionados por los resultados de los análisis de correlación, análisis de correlación parcial, gráficos de dispersión, y la sensibilidad física entre los predictores seleccionados y el predictando también debe ser considerado en el estudio. SDSM ofrece dos formas de optimizar el modelo:

doble unidireccional y mínimos cuadrados ordinario, y ambos enfoques dan resultados comparables. El método de mínimos cuadrados ordinario es mucho más rápido (Wilby *et al.*, 2002; Hashmi *et al.*, 2010; UNFCCC, 2005).

El modelo está estructurado como un modelo mensual, tanto para la precipitación diaria como para la temperatura re-escalada, en cuyo caso, 12 ecuaciones de regresión son derivadas para 12 meses con diferentes parámetros de regresión para cada ecuación mensual. SDSM ha sido codificado con el software de la versión actual 4.2 (Figura 8) lo que puede hacer el trabajo de los usuarios con más facilidad y rapidez (Huang *et al.*, 2010; Tryhorna y DeGaetano, 2010).

Todos los detalles técnicos de SDSM (y prototipos de reducción de escala) se proporcionan en el manual de usuario de SDSM (Wilby y Dawson, 2007). Dentro de la taxonomía de las técnicas de reducción de escala, SDSM es el mejor descrito como un híbrido de los generadores de tiempo estocástico y métodos de función de transferencia. Esto se debe a los patrones de circulación a gran escala y las variables de humedad atmosféricas que son utilizados como condición en los parámetros de los generadores de tiempo a escala local (por ejemplo, ocurrencia de precipitación e intensidad) (Tryhorna y DeGaetano, 2010).

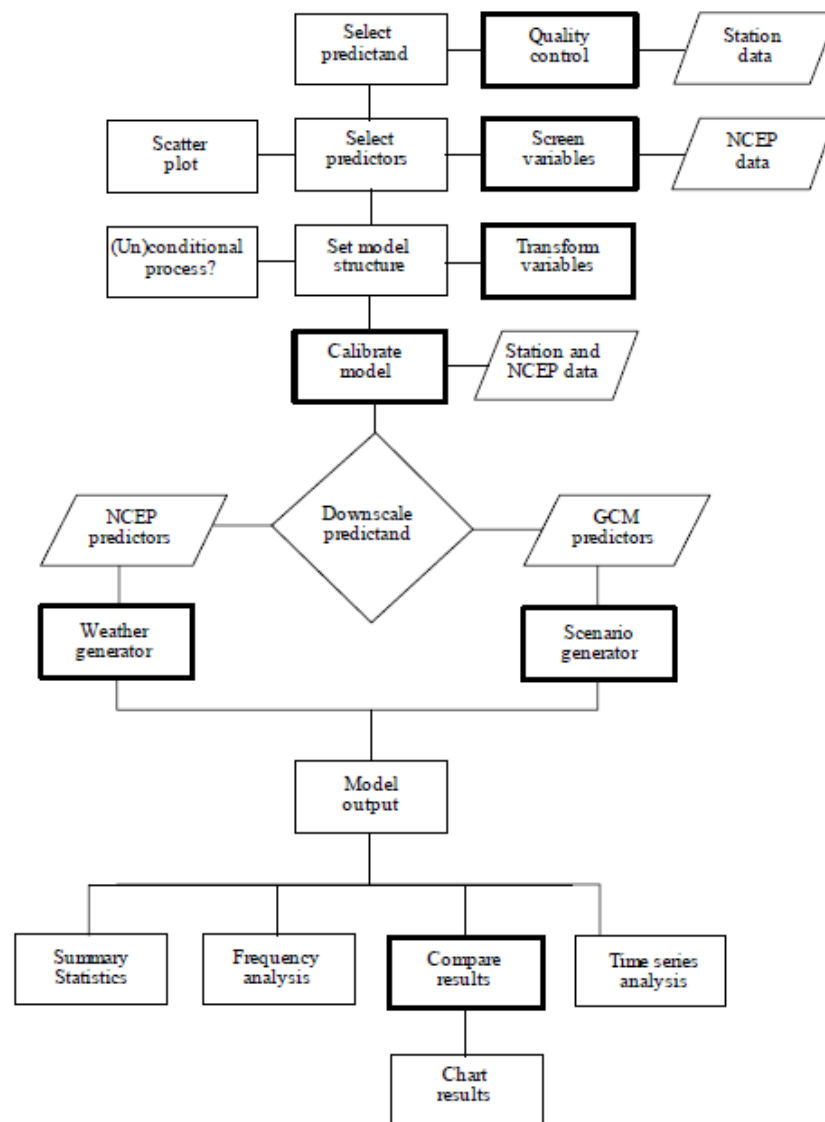


Figura 8. SDSM versión 4.2. Generación de escenarios climáticos.

Además, las técnicas estocásticas se utilizan para incrementar artificialmente la varianza de la series de tiempo diarias re-escaladas para un mejor acuerdo con las observaciones. Hasta la fecha, el algoritmo de reducción de escala de SDSM se ha aplicado en una serie de evaluaciones meteorológicas, hidrológicas y ambientales, así como en una gama de contextos geográficos, incluyendo África, Europa, Norteamérica y Asia (Tryhorna y DeGaetano, 2010).

2.11 ClimGen

Series de largo plazo de datos meteorológicos diarios son a menudo necesarias para los análisis probabilísticos de sistemas que sean impactados por el clima (por ejemplo; estudios hidrológicos, estudios ambientales, de manejo de cultivos, entre otros). Los generadores climáticos son programas informáticos que utilizan datos meteorológicos existentes para determinar la generación de parámetros, que a su vez sean utilizados para generar largas series de datos climáticos diarios. Las propiedades estadísticas de los datos generados se espera que sean similares a los de los datos reales (Stöckle *et al.*, 2003; *et al.*, 2001; Abraha y Savage, 2006).

Uno de los primeros generadores climáticos que se desarrollaron fue para propósitos de modelación de la calidad de agua, el cual fue denominado WGEN (Richardson y Wright, 1984). Otros numerosos generadores de tiempo se han desarrollado desde entonces. CLIGEN, es un generador de tiempo el cual incorporó dentro del modelo la WEPP (Water Erosion Prediction Project), que es basado en los métodos utilizados en el generador climático WGEN (Nicks *et al.*, 1990).

CLIGEN, sin embargo adiciona la capacidad para generar la intensidad de las precipitaciones y la duración o "punto de ruptura" para los datos de lluvia, que fueron necesarios para el modelo de infiltración de Green & Ampt utilizado en muchas de las actuales predicciones hidrológicas y de pérdida del suelo. Otros generadores de tiempo disponibles son USCLIMATE (Johnson *et al.*, 1996), CLIMAK (Danuso, 1997) y ClimGen (Stöckle *et al.*, 1999).

ClimGen, el cual incluye algunos conceptos adoptados de WGEN, es un programa para la generación climática con características novedosas y una interfaz para el usuario que es fácil y eficaz. ClimGen ha sido evaluado y se encontró que se ha desempeñado razonablemente en varios lugares del mundo (Castellvi y Stockle, 2001; Stockle y Nelson, 2003, Stöckle *et al.*, 2001).

ClimGen genera precipitación, temperatura máxima (Tx) y temperatura mínima (Tn), radiación solar (Rs), humedad del aire y velocidad del viento. El programa requiere como entrada una serie diaria de estas variables para el cálculo de los parámetros utilizados en el proceso de generación. ClimGen conserva la interdependencia entre las variables meteorológicas generadas, así como las características estacionales de cada variable (Stöckle *et al.*, 2003; Stöckle *et al.*, 2001).

Generando Tx, Tn y Rs los valores resultan de un proceso continuo estocástico multivariado de los promedios diarios y desviaciones estándar condicionadas por el estado seco o húmedo del día. Una cadena de Markov de primer orden es usado para generar los días húmedos y secos. Las cantidades de precipitación son generadas a partir de una distribución Weibull, la cual puede simplificarse para aplicaciones o condiciones con datos mínimos (Stöckle *et al.*, 2001).

En adición, aproximaciones alternativas permiten a los usuarios estimar la Rs de la temperatura en lugares con una longitud de registros inadecuados. La velocidad del viento es también generada a partir de la distribución de Weibull, pero esta

variable se genera de forma independiente de otras variables. Debido a que toda la generación de los parámetros se calcula para cada sitio de interés, ClimGen se puede aplicar a cualquier lugar del mundo con información suficiente para parametrizar el programa (Stöckle *et al.*, 2001). Los análisis estadísticos para derivar los parámetros incluyen:

- Las estadísticas mensuales de los datos de clima disponibles en forma diaria
- Estimación de la evapotranspiración
- Ajuste de punto de rocío
- Ajuste del factor de aridez
- Coeficiente de transmisión de cielo despejado
- Parámetro B de la radiación solar
- Matrices de correlación

La generación de los datos climáticos en ClimGen consta de los siguientes pasos: 1) Descripción de la geo-localización del sitio climático, 2) Preparación de los parámetros de localización, ya sea con el análisis estadístico de los datos reales de clima o proveyendo estadísticas mensuales conocidas, 3) La generación de los datos y 4) Exportación de los datos a formatos de archivo disponibles para ser usados en otras aplicaciones (Stöckle *et al.*, 2001). Más información sobre ClimGen está bien documentada en Moradi *et al.*, 2007; McKague *et al.*, 2003; Castellvi y Stockle, 2001; Stockle y Nelson, 2003; y Stöckle *et al.*, 2001.

2.12 EPIC

Los modelos de simulación son cada vez más de gran interés, como una herramienta para el soporte y toma de decisiones en la evaluación del uso del agua y producción de los cultivos (Ko *et al.*, 2009; Niu *et al.*, 2009). En los últimos dos decenios, el modelo EPIC (Erosión Productivity Impact Calculator o recientemente denominado Environmental Policy Integrated Climate) ha jugado un papel importante en los estudios agrícolas y ambientales en los EE.UU. y en otras regiones del mundo. Fue desarrollado para evaluar el impacto de la erosión del suelo en la productividad del mismo suelo por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-ARS) en 1984 (Ren *et al.*, 2010; Gaiser *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2009).

Este modelo es adecuado para la mayoría de todas las simulaciones de cultivos y las necesidades diarias de datos climáticos como la radiación solar, temperatura máxima, la temperatura mínima y precipitación así como los parámetros de manejo del cultivo. El modelo EPIC utiliza el concepto de eficiencia en el uso de la radiación por el cual una fracción de la radiación fotosintéticamente activa diaria es interceptada por el dosel de las plantas y convertida en biomasa. Las ganancias diarias de biomasa por las plantas se ven afectadas por déficit de presión de vapor y la concentración atmosférica de CO₂ (Ren *et al.*, 2010; Ko *et al.*, 2009; Niu *et al.*, 2009; McGill *et al.*, 2006). Hasta ahora, el modelo EPIC ha sido ampliamente utilizado para simular el rendimiento de más de 10 diferentes cultivos en muchos países del mundo (Gaiser *et al.*, 2010; Tan y Shibasaki, 2003).

Desde su creación, continuamente se ha estado actualizando para la integración y mejora de funciones adicionales incluyendo la calidad del agua, el cambio de CO₂ atmosférico, y las rutinas del ciclo del carbono. Este modelo ha sido aplicado en un amplio rango de estudios en agricultura, meteorología, y medio ambiente, por ejemplo el crecimiento y rendimiento de cultivos, impactos del cambio climático, erosión eólica e hídrica, pérdidas por pesticidas, impactos del riego en los rendimientos de los cultivos, temperatura de suelo, análisis económico-ambientales, entre otros (Liu *et al.*, 2009).

Los datos climáticos de entrada incluyen la radiación solar diaria, la temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria, la precipitación diaria, humedad relativa y velocidad del viento diaria. Los parámetros del suelo incluyen la profundidad, textura, densidad aparente, pH del suelo, la concentración de carbono orgánico y el contenido de carbonato de calcio del suelo, entre otros. Los parámetros de manejo en campo para el modelo EPIC incluyen principalmente la fecha de siembra, cosecha, tasa de aplicación de fertilizantes, el volumen de riego, densidad de plantas, entre otros (Ren *et al.*, 2010).

El modelo EPIC está compuesto por ocho submodelos (Williams, 1995): 1) generador de clima, 2) dinámica del agua en el suelo e hidrología, 3) erosión hídrica y eólica, 4) nutrientes (N, P, K) y el ciclo del carbono, 5) temperatura del suelo, 6) Cosecha, 7) crecimiento del cultivo y 8) manejo del suelo y del cultivo (Gaiser *et al.*, 2010; Ko *et al.*, 2009).

El modelo de simulación de cultivos EPIC puede ser utilizado para evaluar el impacto del clima y las estrategias de manejo en la producción agrícola, así como en los recursos suelo y agua. El modelo ha sido utilizado ampliamente en los EE.UU. y otros países. Los estudios informan que EPIC puede ser uno de los modelos más recomendables para simular los cultivos de mediano a largo plazo (Ko *et al.*, 2009).

Más información sobre el modelo EPIC está bien documentada en (Williams, 1995; Ren *et al.*, 2010; Gaiser *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2009; Ko *et al.*, 2009; Niu *et al.*, 2009).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización geográfica

El estado de Durango se encuentra en el Noroeste de la República Mexicana, en las coordenadas geográficas extremas al Norte $26^{\circ} 53'$, al Sur $22^{\circ} 16'$ de Latitud Norte; al este $102^{\circ} 29'$ y al Oeste $107^{\circ} 16'$ de Longitud Oeste (Figura 9). Respecto al porcentaje territorial en el país representa el 6.3 % de la superficie con una extensión de 123 181 Km², lo cual lo sitúa en el cuarto sitio de la clasificación estatal por extensión territorial, la altitud promedio es de 1775 msnm. Colinda al norte con el estado de Chihuahua y Coahuila de Zaragoza; al este con Coahuila de Zaragoza y Zacatecas; al sur con el estado de Zacatecas, Nayarit y Sinaloa; y al oeste con Sinaloa y Chihuahua (INEGI, 2008).

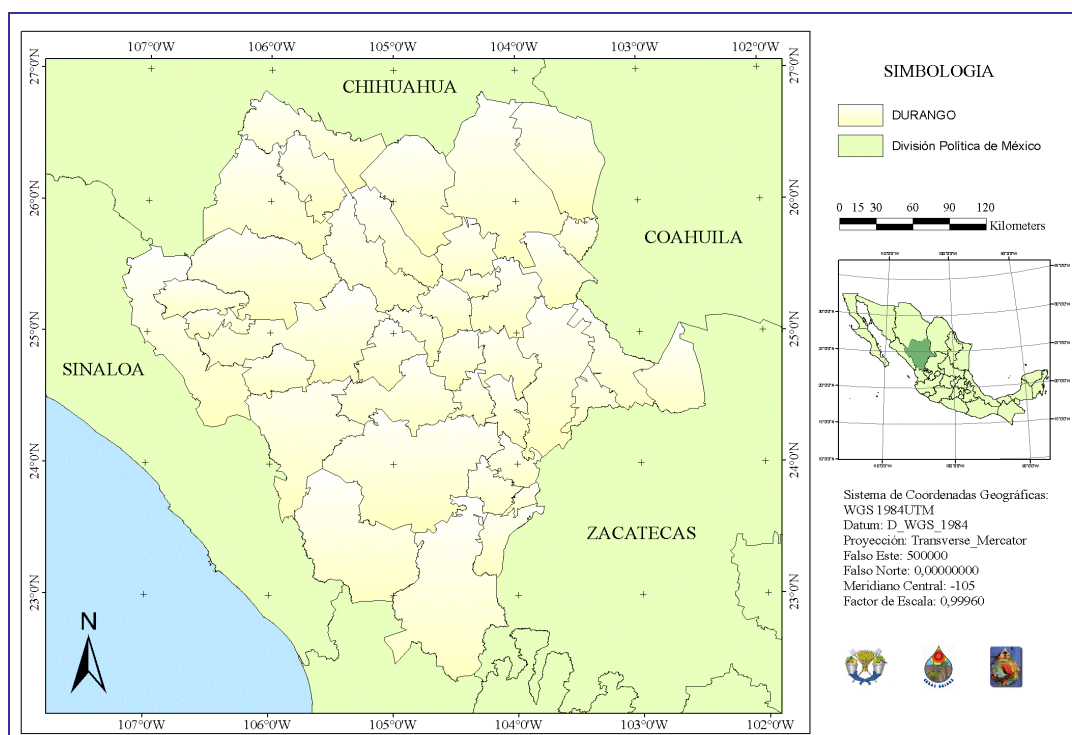


Figura 9. Localización geográfica del estado de Durango.

3.1.1. Orografía y Geología

En el estado de Durango se localizan cuatro provincias fisiográficas: La Sierra Madre Occidental que se extiende en dirección noroeste-sureste, y ocupa el 71.3 % de la superficie estatal y está constituida principalmente por rocas ígneas y sedimentarias del periodo Terciario correspondientes a la era Cenozoica. Las Sierras y Llanuras del Norte que involucra la subprovincia del Bolsón de Mapimí, lo que la define como una provincia árida y semiárida, con sierras bajas y abruptas, se compone principalmente por rocas sedimentarias, ígneas y suelos originados en el periodo Cuaternario y Terciario de la era Cenozoica. La Sierra Madre Oriental se extiende en la parte Noreste del estado, constituida fundamentalmente por rocas sedimentarias de la era mesozoica. Por último, la Mesa del Centro situada entre las sierras Madre Oriental y Occidental en la parte oriental del estado, caracterizada por la presencia de llanuras y lomeríos aluviales, y geológicamente el tipo de roca dominante es de tipo sedimentaria (INEGI, 2008).

3.1.2 Características climatológicas

Los climas del grupo B o secos cubren la mayoría de la superficie del estado sobre todo en la parte oriental y en la parte correspondiente a la región de los valles, el clima semiseco templado (BS1k) ocupa el 27.34 % de la superficie estatal, con una precipitación de 200 a 500 mm. Los climas del grupo C (templados húmedos) dominan ampliamente en la Sierra Madre, siendo el C (w) templado subhúmedo con lluvias en verano, con una extensión del 22.55 % del territorio estatal (Figura 10). En esta parte del estado se presenta inviernos con heladas y nevadas debido a las bajas

temperaturas y los vientos húmedos procedentes del pacífico. La precipitación media es de 800 mm y la temperatura promedio es de 16 °C (INEGI, 2008).

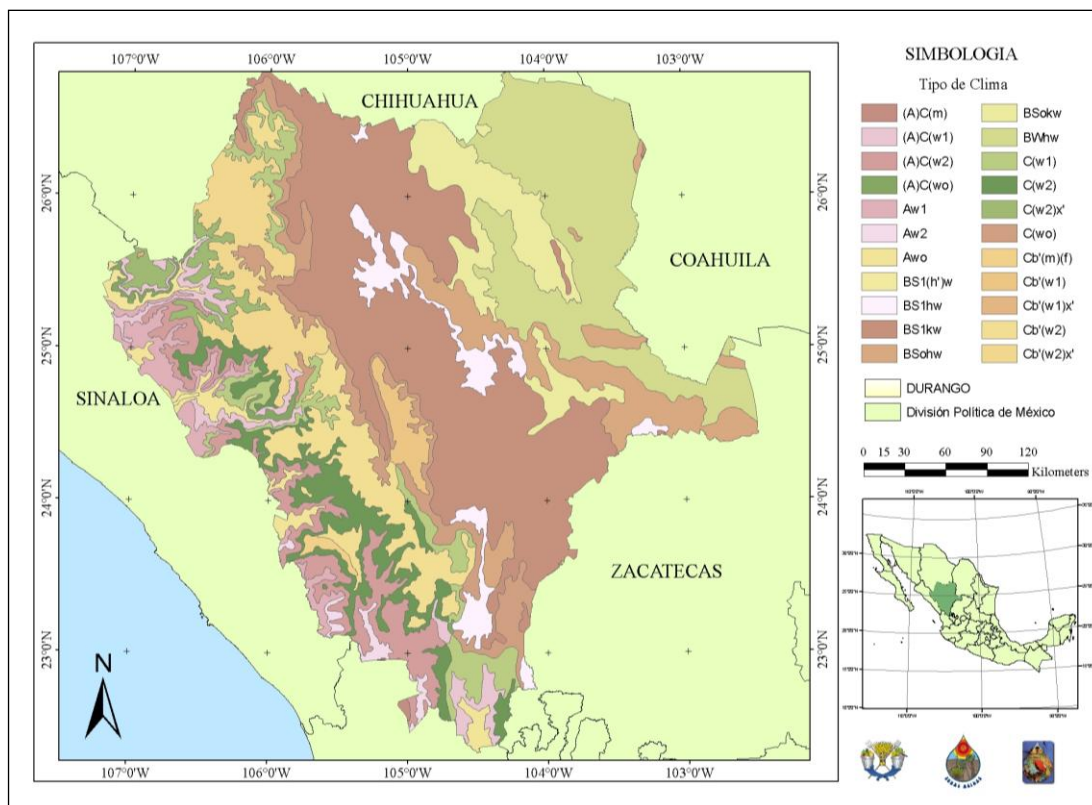


Figura 10. Climas del estado de Durango.

3.1.3 Características Hidrográficas

Dentro del estado existen siete regiones hidrológicas; la RH 10 de nombre Sinaloa, RH11 Presidio-San Pedro, RH12 Lerma-Santiago, RH24 Bravo-Conchos, RH35 Mapimí, RH36 Nazas-Aguanaval, y la RH37 correspondiente al salado (Figura 11). Respecto a las aguas superficiales, la hidrografía esta representada por las corrientes principales de los ríos: Sextin-Nazas, la Saucedo-Mezquital, Santiago-Ramos, Tepehuanes, Aguanaval, Los Remedios, Colorado-Humaya, Galindo-San

Diego, San Lorenzo-San Gregorio, Piaxtla y el Tunal. Sobre las corrientes principales se ubican los siguientes aprovechamientos: Presas: Lázaro Cárdenas (El Palmito), Francisco Zarco; estas dos cuerpos de almacenamiento son lo que sostienen en gran parte la actividad agrícola de riego en la Región Lagunera, presa Guadalupe Victoria, San Bartola, Canoas, Francisco Villa, Santiago Bayacora y Federalismo Mexicano (INEGI, 2008).

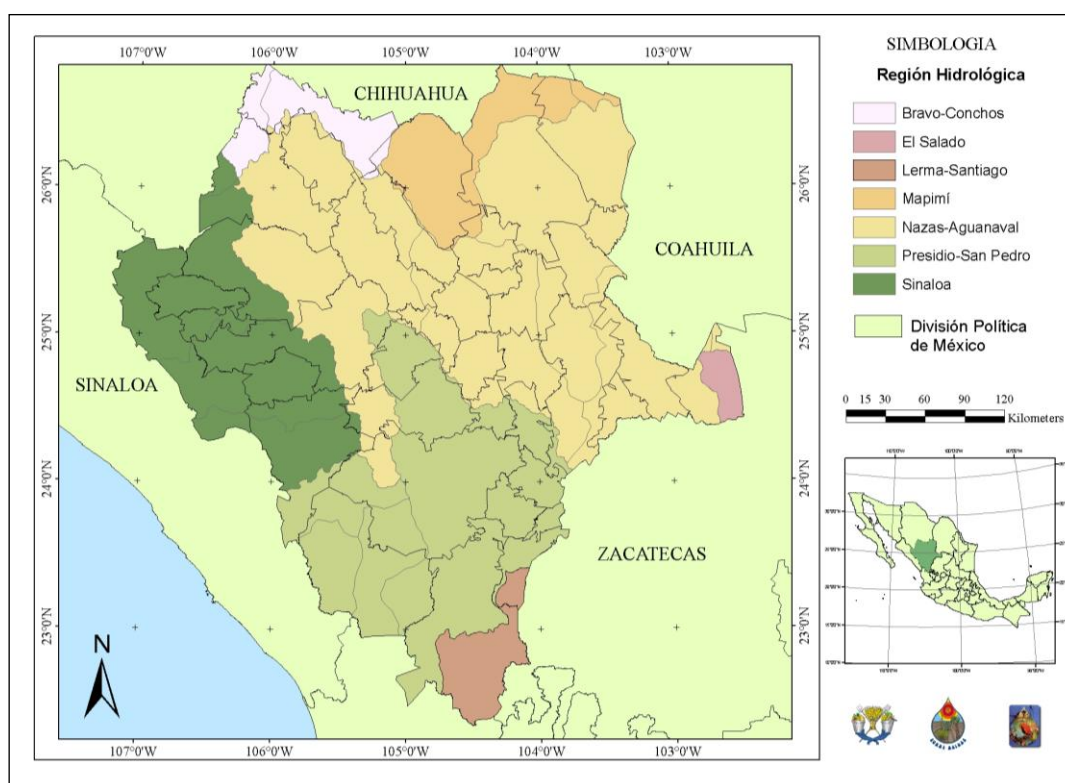


Figura 11. Regiones hidrológicas del estado de Durango.

3.1.4 Suelos dominantes, Agricultura y Vegetación

Existen cuatro principales tipos de suelo que predominan en el estado, siendo el de mayor relevancia el de tipo Litosol con 29.54 % de la superficie estatal,

Regosol con 20.07 %, Xerosol con 13.05 %, Feozem con 12.64 % y otros tipos de suelo con un 24.7 % del territorio del estado. Respecto a la distribución de la vegetación se encuentra la presencia de pastizal; bosque de pino y encino, y de matorral. El uso potencial de la tierra en el aspecto agrícola es cercano al 44.77 %, y presenta características de tipo mecanizado y de tracción animal continua y estacional; a su vez, 55.23 % de la superficie estatal no es apto para la agricultura; en el aspecto pecuario se tiene un 80.42 % destinado a las praderas cultivadas, aprovechamiento de la vegetación de pastizal y de la vegetación natural diferente al pastizal, entre otros; y solo el 19.58 % de la superficie estatal no es apta para el uso pecuario.

3.2 Descripción del enfoque metodológico

El presente trabajo fue realizado en diversas fases (Figura 12): 1) La selección de las estaciones climatológicas consideradas en el estudio, 2) Proceso de reescalado mediante el Modelo Estadístico de Reducción de Escala (SDSM) basado en el modelo de circulación canadiense CGCM1 del Centro Canadiense de Análisis y Modelación Climática (CCmaC), 3) Generación de 30 años de simulación de clima mediante el generador climático ClimGen en base a los resultados obtenidos del proceso de reducción de escala, 4) Obtención de los rendimientos actuales de maíz de temporal para el Estado de Durango, 5) estimación de los rendimientos de maíz en los próximos 30 años afectados por los efectos del cambio climático mediante el modelo de cultivo EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator por sus siglas en inglés), y finalmente; 6) Elaboración de mapas con la distribución de la temperatura y precipitación en condiciones actuales y bajo un escenario de cambio climático; y la

distribución de rendimientos actuales de maíz grano en condiciones de secano y al considerar los posibles efectos del cambio en los patrones del clima sobre la producción de maíz en los próximos 30 años.

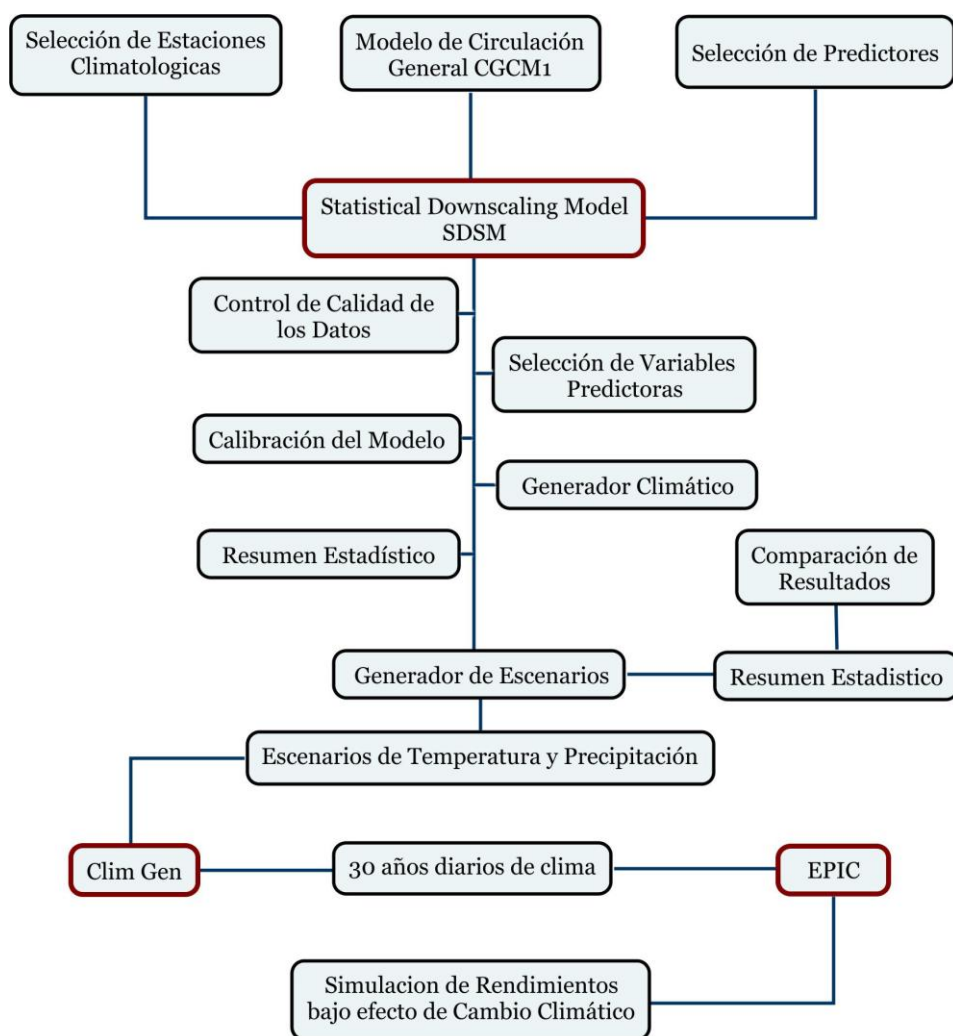


Figura 12. Enfoque metodológico considerado en el estudio.

3.2.1.- Selección de estaciones meteorológicas

A nivel nacional la antigüedad, consistencia y homogeneidad de la información respecto a las estaciones meteorológicas es relativamente deficiente; ya que muchas estaciones presentan una gran carencia de datos los cuales son

originados por razones técnicas y/o humanas; lo que da como resultado que pocas estaciones tengan el 100 % de la información climatológica.

Con base en información del Servicio Meteorológico Nacional y del Extractor Rápido de Información Climatológica V.1.0 (ERIC III) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2006) se identificaron para el estado de Durango 189 estaciones climatológicas. Para la selección de las estaciones se tomaron los siguientes dos criterios: 1).- que como mínimo tuvieran 30 años de antigüedad cuya información fuese lo más consistente y homogénea posible para el período de 1961 a 1990, y que comprendieran las variables de temperatura y precipitación. Este periodo de información es determinado para el proceso de reescalado con el modelo SDSM. 2).- la vecindad de estaciones; es decir, la localización de dos estaciones en un sitio no muy distante una de la otra, al presentarse esta situación se seleccionó la que presentó mejor calidad en la información.

Después de analizar la información contenida en las 189 estaciones climatológicas que se encuentran en el estado, se encontró que existen estaciones que están enlistadas en la base de datos del ERIC o del Servicio Meteorológico Nacional, pero que en su historial tienen periodos considerables sin datos, o en su caso más extremo no presentan información.

Por otro lado, existieron municipios en los cuales ninguna estación cumplió con los requisitos mencionados anteriormente, por lo que se procedió a identificar estaciones en los estados colindantes que reunieran los requisitos de información y poder tener una mejor distribución espacial de la información. Considerando lo

anterior, para el estado de Durango finalmente se seleccionaron 31 estaciones climatológicas, seis para el estado de Sinaloa, tres pertenecientes a Zacatecas, dos para Chihuahua y Nayarit, y una estación para el estado de Coahuila, siendo en total 45 estaciones consideradas en el estudio (Figura 13).

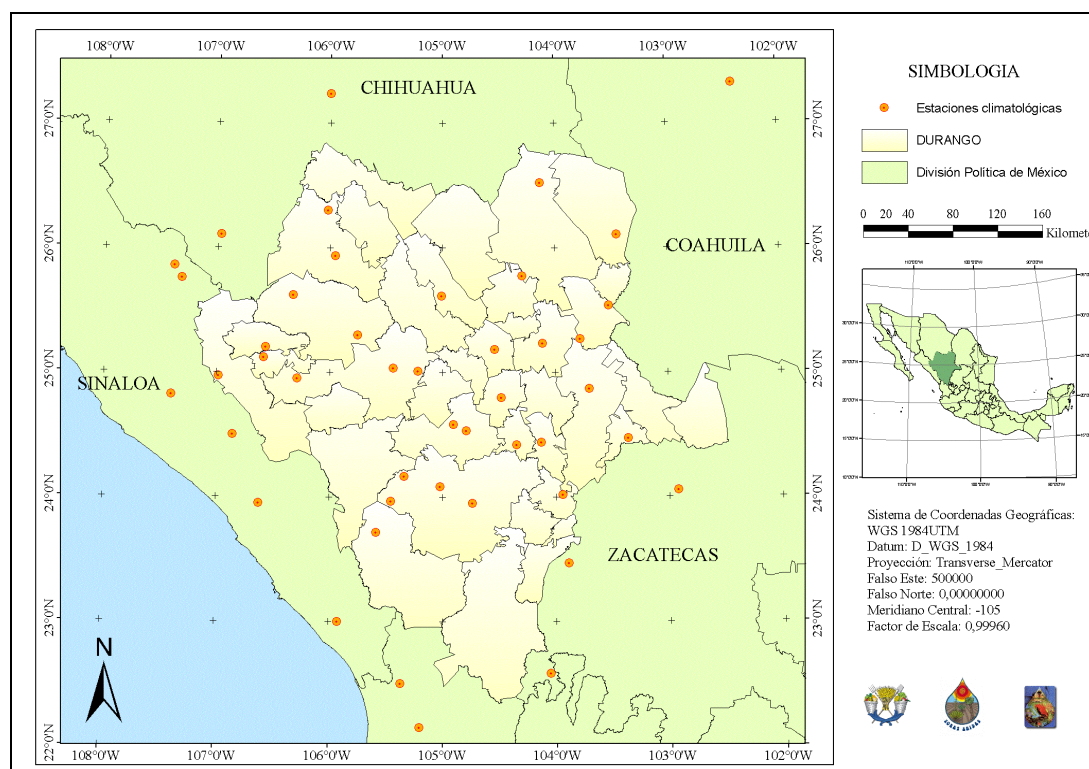


Figura 13. Estaciones climatológicas consideradas en les estudio.

Una vez que se seleccionaron las estaciones climatológicas, se procedió con la manipulación de la información para hacerla compatible con el Modelo Estadístico de Reducción de Escala para la siguiente etapa del estudio. Los archivos utilizados, que contienen la información climática de las estaciones, se manejaron en hojas de cálculo de Microsoft Office Excel; y si en su estructura se presentó algún período con ausencia de datos, estos se denotaron con el código -9999.

El procedimiento consistió en escoger el periodo de información de 1961-1990, posteriormente se eliminaron los títulos para cada columna de información (ya sea Temperatura máxima, temperatura mínima o precipitación), esto con la finalidad de dejar en el archivo solo los valores correspondientes a cada variable climática. Después se eligió una columna con la información correspondiente y fue copiada en el programa Bloc de Notas, el archivo se guardó con un nombre que identificó la variable y la estación climática, pero con la extensión *.DAT.

En dado caso que en el archivo de datos presentó un año o varios con ausencia de información, se sustituyó el valor de -9999 por el de -999, el cual es reconocido por SDSM. Cabe mencionar que SDSM en su estructura acepta hasta un máximo de 5 años de ausencia de información para poder hacer los análisis correspondientes. Estos pasos se realizaron para cada variable (Temperatura máxima, Temperatura mínima y Precipitación) y cada una de las estaciones que se consideraron en el estudio.

3.2.2 Proceso de Reducción de Escala

El Modelo Estadístico de Reducción de Escala (SDSM) constituye una de las herramientas que contribuye al proceso de evaluación de los impactos regionales del calentamiento climático facilitando el proceso de reducción de escala espacial de los datos climáticos que provienen de la malla de gran resolución de los Modelos de Circulación General (MCGs). SDSM (Wilby *et al.*, 2002) calcula relaciones estadísticas basadas en técnicas de regresión lineal múltiple entre el clima a gran escala (los predictores) y el clima local (el predictando). Estas relaciones se

desarrollan utilizando los datos climáticos observados y, asumiendo que estas relaciones permanecen validas en el futuro, estas pueden ser utilizadas para obtener información local reducida de escala para un período de tiempo futuro, por la derivación de las relaciones con el MCGs derivado de los predictores.

Para el presente estudio, los datos de los predictores fueron obtenidos del modelo de circulación canadiense CGCM1 del Centro Canadiense de Modelación y de Análisis Climático. La página de obtención de los datos es la siguiente: <http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi>. En este sitio Web, el procedimiento consistió en ingresar las coordenadas del área de estudio, y automáticamente los archivos son desplegados para su descarga.

El modelo CGCCM1 toma en cuenta los impactos combinados de los gases de efecto invernadero (GEI) y los aerosoles sulfatados sobre el clima, proporciona el escenario de emisión de CO₂ IS92a³. Es un modelo espectral con una componente atmosférica de 10 niveles verticales de resolución de 3.7 ° de latitud y 3.7 ° de longitud y una componente oceánica con una resolución de 1.8756 ° de latitud y 1.877 ° de longitud y 29 niveles verticales. El MCG representa de manera realista y adecuada el clima contemporáneo observado en términos de temperatura, de precipitación y de variabilidad estacional interanual (Flato *et al.*, 2000).

³ Escenario en el cual la población se eleva a 11,3 millones en 2100, los promedios de crecimiento económico son del 2.3 % por año⁻¹ entre 1990 y 2100; una mezcla de fuentes de energía convencionales y renovables se utilizan. Sólo los controles de emisiones acordados internacionalmente y las políticas nacionales en ley, por ejemplo, las enmiendas de Londres y el Protocolo de Montreal, están incluidos.

Una vez obtenidos los predictores para el estado de Durango, y los predictandos que representan el clima local (archivos generados en la primera etapa del estudio), se procedió a la utilización del Modelo Estadístico de Reducción de Escala versión 4.2 (Figura 14) para realizar los análisis correspondientes.

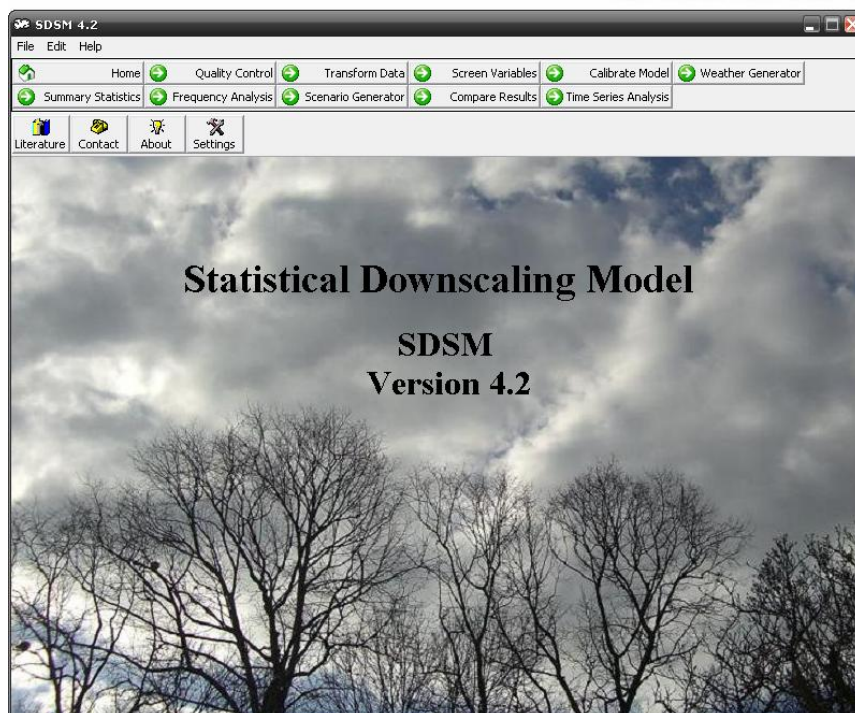


Figura 14. Pantalla de inicio de SDSM

El modelo presenta una serie de pasos para poder llevar a cabo el proceso de reducción de escala, los cuales son mencionados a continuación:

- 1) El primer paso en la aplicación del SDSM consistió en un proceso de control de calidad de los datos. Esta opción permitió identificar la cantidad de información contenida en el archivo, el cual fue generado en la primera etapa y que fue denotado por la extensión *.DAT. Aquí se visualizó el valor máximo, el valor

mínimo, la media, la cantidad de valores presentes en el archivo, así como los valores faltantes, en dado caso de que los presentara.

2) En este apartado del proceso, las variables predictoras fueron ingresados al modelo mediante la opción Screen variables. Esta sección permitió que de 26 variables de calibración (predictores) se buscó la mejor correlación (una a una o en conjunto) con la variable local (predictando) que corresponde a la variable meteorológica de la estación (temperatura máxima, mínima, y/o precipitación). Las variables de calibración están relacionadas con alturas geopotenciales, dirección o fuerza del viento, divergencia, humedad específica o relativa, presión, temperatura o vorticidad, ya sea a nivel medio del mar, en superficie o en altura a 850 ó 500 hectopascuales, según corresponda.

Se presentan dos opciones en esta fase, análisis y correlación. La opción de análisis se usó para investigar el porcentaje de varianza explicado por los pares específicos predictor-predictando. La fortaleza de los predictores individuales a menudo varía marcadamente de un mes a otro, por lo tanto se debe ser juicioso acerca de la combinación o combinaciones del predictor para un determinado predictando, y por consiguiente para cada estación. También se debe de especificar la estructura del modelo: si es mensual, estacional o anual y si el proceso es condicional o incondicional. En modelos incondicionales un link directo es asumido entre los predictores y el predictando (por ejemplo las velocidades locales del viento pueden ser función de índices de flujo de aire regionales). En modelos condicionales, hay un proceso intermedio entre el forzamiento regional y el clima local (por ejemplo las cantidades locales de precipitación dependen de la ocurrencia de días húmedos, los

cuales en turno dependen de los predictores a escala regional tales como la humedad y la presión atmosférica) (Wilby y Dawson, 2007).

Para este caso, la temperatura máxima y la temperatura mínima se consideraron como procesos incondicionales, y la precipitación como proceso condicional. Cuando se lleva a cabo el análisis, el resultado muestra la varianza explicada (Figura 15) donde la correlación más grande en cada mes se muestra en color rojo, indicando que las relaciones entre el predictor y el predictando son las más importantes.

RESULTS: EXPLAINED VARIANCE												
Analysis Period: 01/01/1961 - 31/12/1990												
Significance level: 0.05												
Total missing values: 0												
Predictand: Tmax_elcantil_stgopapasq.dat												
Predictors:	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
ncepp500na.dat	0.374	0.342	0.420	0.473	0.376	0.097	0.100	0.022	0.066	0.174	0.427	0.390
ncepp5zhna.dat	0.048	0.098	0.104	0.166	0.084		0.006	0.013	0.014	0.070	0.111	0.137
nceptempna.dat	0.200	0.248	0.350	0.408	0.322	0.155	0.111	0.150	0.111	0.220	0.267	0.173

Figura 15. Varianza explicada por los predictores

La segunda opción es la matriz de correlación, la cual se utilizó para investigar correlaciones entre variables para sup-periodos específicos (anual, estacional o mensual). SDSM también reporta correlaciones parciales entre los predictores seleccionados y el predictando. Estas estadísticas ayudan a identificar la cantidad de poder explicativo que es único para cada predictor. En la figura 16, se muestra un ejemplo que indica que p500 y p_una (predictores), presentaron la asociación más fuerte con la Temperatura Máxima para esta estación (predictando).

CORRELATION MATRIX				
Analysis Period: 01/01/1961 - 31/12/1990 (Annual)				
Missing values: 0				
Missing rows: 0				
	1	2	3	4
1 Tmax_elcantil_stgopapasq.dat	1	0.671	0.264	0.721
2 ncepp500na.dat	0.671	1	0.187	0.780
3 ncepp5zhna.dat	0.264	0.187	1	0.113
4 nceptempna.dat	0.721	0.780	0.113	1
PARTIAL CORRELATIONS WITH Tmax_elcantil_stgopapasq.dat				
	Partial r	P value		
ncepp500na.dat	0.218	0.0000		
ncepp5zhna.dat	0.236	0.0000		
nceptempna.dat	0.444	0.0000		

Figura 16. Matriz de correlación.

En esta fase del proceso, SDSM tiene como objetivo primordial el de asistir en la adecuada selección de las variables predictoras para poder llevar a cabo el proceso de reducción de escala. Se considera uno de los pasos más importantes en el desarrollo de cualquier modelo estadístico, esto debido a que la selección de los predictores determina el carácter del escenario de clima re-escalado y por lo tanto la calidad de la información. Anteriormente se mencionó que el modelo SDSM dentro de su funcionamiento aceptaba valores ausentes en la información del predictando, se encontró que el modelo acepta como máximo 5 años de información faltante, después de este valor los predictores no presentan una buena correlación en las combinaciones predictor-predictando, sobre todo en la variable meteorológica de Precipitación.

3) El siguiente paso fue la calibración del modelo. En esta parte del proceso se construye el modelo de reducción de escala basado en ecuaciones de regresión múltiple, considerando los datos meteorológicos diarios (predictando), la escala regional y las variables atmosféricas (predictores). Los parámetros del modelo de

regresión son transcritos a un archivo de formato estándar con la extensión *.PAR, junto con el registro de los meta-datos, los detalles del período de calibración, tipo modelo, predictores utilizados, etc.

SDSM optimiza el modelo usando tanto la optimización dual unidireccional como por mínimos cuadrados. Antes de realizar la operación se debe de especificar la estructura del modelo es decir, si el análisis será mensual, estacional o anual, y si el proceso para la variable a analizar es condicional o incondicional, anteriormente se explico cual es el tipo de proceso para la variable de temperatura como para la precipitación. Ya que se realizó la calibración, un resumen es desplegado con los resultados de la calibración para cada mes (Figura 17).

Predictand: Tmax_elcantil_stgopapasq.dat			
Predictors:			
ncepp500na.dat			
ncepp5zhna.dat			
nceptempna.dat			
Unconditional Statistics			
Month	RSquared	SE	Durbin-Watson
January	0.418	2.718	1.054
February	0.435	2.942	0.982
March	0.501	2.621	0.980
April	0.574	2.358	1.136
May	0.424	2.351	1.040
June	0.164	3.420	0.505
July	0.150	2.494	0.893
August	0.149	2.320	0.829
September	0.129	2.327	0.954
October	0.306	2.328	0.918
November	0.510	2.262	0.993
December	0.470	2.751	1.151
Mean	0.353	2.574	0.953

Figura 17. Resultados de la calibración del modelo

4) Una vez que el modelo fue calibrado con las variables predictoras seleccionadas, se procede con el generador climático. Este originó conjuntos modelados de series de tiempo diarios considerando las variables atmosféricas predictoras observadas y lo obtenido en los modelos de regresión producidos en la

fase de calibración del modelo. Las series de tiempo sintetizadas son transcritas a archivos de salida específicos (con extensión *.OUT) para los análisis posteriores (Figura 18). El generador de clima permite la calibración del modelo (asumiendo la disponibilidad de la independencia de los datos) así como la síntesis de series de tiempo artificial representativo para las condiciones de clima presente.

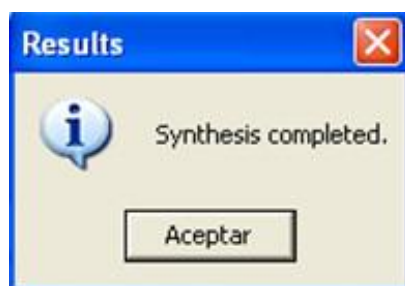


Figura 18. Cuadro de diálogo que indica que el generador climático ha finalizado.

- 4) Una vez que se generaron las series de tiempo, la siguiente etapa se refiere al resumen estadístico. En esta operación se realizó el análisis de los datos observados como de los re-escalados, estos se manejan de diferente forma por SDSM pero fueron realizados dentro del mismo menú. Para el caso de los datos observados se utilizó el archivo inicial en la primera fase de control de calidad de los datos con extensión *.DAT, para este caso solo se necesitó ingresar el archivo de entrada, seleccionar las variables estadísticas que se deseen evaluar, se proporcionó el nombre del archivo de salida y se ejecutó el análisis.

Para el caso de los datos re-escalados o modelados, se realizó la misma operación solo que como archivo de entrada se utilizó el archivo producido en el generador climático (fase anterior) con extensión *.OUT.

Esta operación produjo un archivo de salida para los datos observados (Figura 19) como para los modelados (Figura 20), los cuales incluyen las variables estadísticas que previamente fueron seleccionadas antes de realizar el análisis. Las variables estadísticas que se seleccionaron fueron la media, valor máximo, valor mínimo, varianza, y la suma de la varianza. Esta opción permite hasta un máximo de 16 variables estadísticas, las cuales se pueden seleccionar según los intereses, sin embargo, en este caso solamente se seleccionaron las estadísticas mencionados anteriormente.

SUMMARY STATISTICS FOR: Tmax_elcantil_stgopapasq.dat					
Analysis Start Date: 01/01/1961					
Analysis End Date: 31/12/1990					
Ensemble Member(s):					
Month	Mean	Maximum	Minimum	Variance	Sum
January	15.272	24.000	5.000	12.598	473.433
February	16.031	30.000	4.000	15.278	448.867
March	18.585	29.000	3.000	13.744	576.133
April	21.080	31.000	5.000	13.027	632.400
May	23.242	32.000	11.000	9.592	720.500
June	24.023	38.000	13.000	13.974	720.700
July	21.034	37.000	14.000	7.304	652.067
August	20.928	29.000	12.000	6.318	648.767
September	21.061	29.000	11.000	6.168	631.833
October	20.887	30.000	12.000	7.797	647.500
November	19.060	29.000	8.000	10.419	571.800
December	16.047	24.000	2.000	14.122	497.467
Winter	15.775	30.000	2.000	14.090	1373.968
Spring	20.968	32.000	3.000	15.771	1929.033
Summer	21.973	38.000	12.000	11.183	2021.533
Autumn	20.342	30.000	8.000	8.938	1851.133
Annual	19.785	38.000	2.000	18.098	7221.467

Figura 19. Resumen estadístico para los datos observados.

SUMMARY STATISTICS FOR: El Cantil_Temp maxima.OUT					
Analysis Start Date: 01/01/1961					
Analysis End Date: 31/12/1990					
Ensemble Member(s): Ensemble Member(s): ALL					
Month	Mean	Maximum	Minimum	Variance	Sum
January	15.239	26.478	2.268	13.844	472.398
February	16.054	27.889	2.792	15.882	449.521
March	18.539	30.057	5.576	13.827	574.713
April	21.089	31.328	7.103	12.723	632.665
May	23.224	32.748	11.912	9.590	719.932
June	24.026	35.622	12.617	14.106	720.779
July	21.038	29.788	12.830	7.312	652.173
August	20.949	30.038	13.094	6.453	649.427
September	21.053	29.353	12.890	6.589	631.576
October	20.854	29.743	11.965	7.779	646.463
November	19.056	28.374	5.954	10.136	571.687
December	16.062	27.314	-0.229	15.846	497.916
Winter	15.776	28.323	-0.524	15.327	1374.034
Spring	20.949	32.814	5.337	15.750	1927.311
Summer	21.982	35.622	12.186	11.265	2022.378
Autumn	20.327	30.158	5.954	8.967	1849.725
Annual	19.779	35.622	-0.524	18.421	7219.250
Standard Deviations of Results					
January	0.116	1.406	1.426	0.630	3.594
February	0.106	1.289	1.448	0.882	2.974
March	0.084	1.180	1.309	0.461	2.609
April	0.082	1.152	1.446	0.507	2.445
May	0.087	0.885	1.014	0.417	2.691
June	0.084	1.232	0.968	0.582	2.506
July	0.089	0.719	0.931	0.303	2.745
August	0.059	1.112	0.629	0.365	1.826
September	0.052	0.684	1.036	0.292	1.571
October	0.081	0.885	0.885	0.249	2.503
November	0.070	1.308	0.981	0.444	2.104
December	0.083	0.749	2.048	0.685	2.561
Winter	0.049	1.110	1.729	0.462	4.233
Spring	0.057	0.865	1.211	0.346	5.222
Summer	0.037	1.232	0.814	0.383	3.418
Autumn	0.048	0.626	0.981	0.232	4.369
Annual	0.022	1.232	1.729	0.211	8.176

Figura 20. Resumen estadístico para los datos modelados.

Los resultados que arroja el análisis permiten hacer la comparación de los valores de clima mensuales tanto para las condiciones actuales como para los que fueron producidos con el generador climático, permitiendo evaluar la calidad de los predictores seccionados, lo que permitió poder realizar escenarios de cambio climático para cada variable climática.

6) Posterior al análisis estadístico, se realizó una comparación de resultados, esta opción permitió realizar los cotejos de los datos observados con los modelados

de manera gráfica, y por lo tanto apreciar si el modelo fue o no calibrado correctamente. Existen dos opciones para graficar, mediante barras y líneas de tendencia (Figura 21), este apartado permitió hacer la comparación usando las variables estadísticas seleccionadas; en este caso solo se utilizó el valor promedio para cada variable climatológica.

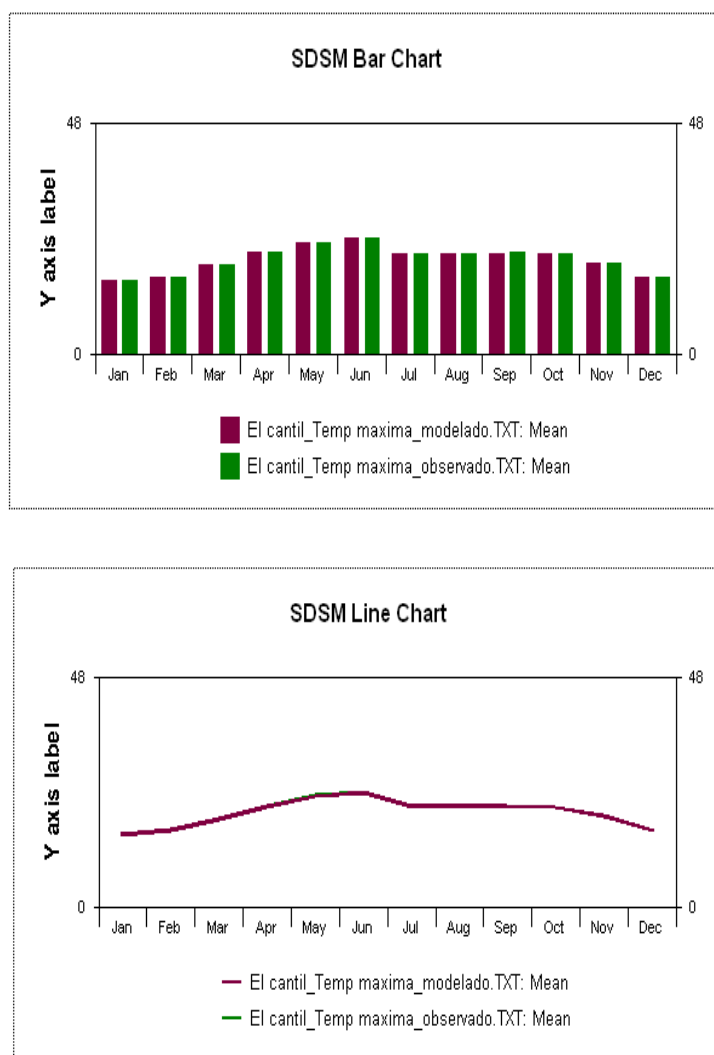


Figura 21. Comparación de resultados observados y modelados.

7) Finalmente, la generación de los escenarios es el último paso del proceso. Siguiendo el procedimiento antes mencionado y si las tendencias entre lo modelado y

lo observando siguen casi el mismo patrón, se puede afirmar que el modelo fue calibrado correctamente. Por ende, los escenarios pueden ser generados; en SDSM existen tres opciones para la generación de los escenarios, los que comprenden los años 20s, 50s y 80s, ya que cada opción comprende un periodo de 30 años. En este caso solo se realizó el escenario de los años 20s, que comprende a partir del año 2010 al año 2039.

Se utilizó como archivo de entrada el que se creó en la calibración de modelo (*.PAR), después se seleccionó el escenario a modelar y se proporcionó el nombre del archivo de salida, el cual va a ser con la misma extensión que en el generador de clima (*.OUT) (Figura 22). Ejecutado el procedimiento el archivo generado es compuesto de una serie de conjuntos de datos que representan al escenario seleccionado, más sin embargo como tal no se puede visualizar o interpretar.

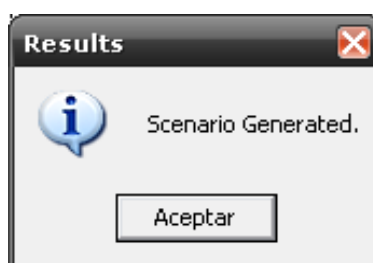


Figura 22. Imagen que indica que el escenario fue realizado.

Para poder visualizar los resultados del escenario generado, se realizó el mismo procedimiento que en el análisis estadístico para los datos modelados. Es decir, en este paso de nuevo se volvió a hacer un análisis estadístico que arrojó los datos sintetizados de forma mensual y así pudimos hacer las comparaciones correspondientes para el clima actual. Los resultados producidos son los valores de temperatura y precipitación promedio por mes, para los próximos 30 años afectados

por el cambio climático mediante una reducción de escala. Este procedimiento se realizó para cada una de las variables climatológicas de cada una de las estaciones consideradas en el estudio.

Hasta esta etapa se obtuvieron los datos de precipitación y temperatura máxima y mínima para las estaciones consideradas en el estudio al considerar el modelo estadístico de reducción de escala (SDSM). Para la obtención de los rendimientos para el cultivo del maíz en condiciones de temporal utilizando el software EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) se necesitan una serie de parámetros de entrada para poder hacer las ejecuciones correspondientes. Dentro de estos parámetros se encuentran los referentes al clima; sin embargo, los generados por el SDSM no son suficientes para ser ingresados al modelo EPIC, debido a que los valores son obtenidos de forma mensual y no de manera diaria; por ello se hizo referencia al generador de clima ClimGen para poder obtener la información que será ingresada para la obtención de los rendimientos.

3.2.3 Generador climático ClimGen

Los generadores climáticos son programas computacionales que utilizan datos meteorológicos existentes para determinar la generación de dichos parámetros, los cuales a su vez serán utilizados para generar conjuntos de datos diarios del clima. Se espera que las propiedades estadísticas de los datos generados sean similares a los datos reales (Stockle *et al.*, 2003). ClimGen (Figura 23) es un generador climático que utiliza principios similares a los de WGEN (Richardson y Wright, 1984), pero con modificaciones y adiciones importantes. ClimGen genera precipitación,

temperatura máxima y temperatura mínima diaria, radiación solar, humedad del aire y velocidad del viento. Toda la generación de los parámetros son calculados para cada sitio de interés, permitiendo que el programa sea aplicado en cualquier lugar del mundo.



Figura 23. Pantalla inicial de CLIMGEN

El procedimiento que se realizó con ClimGen consistió en la generación de 30 años iniciando a partir del año 2010 al 2039, el cual fue el escenario que se utilizó con el modelo SDSM. La generación de datos climáticos en ClimGen consistió de dos pasos: 1) la preparación de los datos de ubicación de la estación y 2) la generación de la información climática. ClimGen ofrece un asistente para realizar el procedimiento paso a paso en el cual el programa presenta “cuadros de diálogo de entrada” para que la información sea ingresada y se pueda realizar la generación de datos.

En la primera opción de “describir el sitio” inicialmente se especificó un directorio para almacenar la información que será generada y se determina un nombre al archivo de localización. Lo anterior fue con la finalidad de ingresar los parámetros de ubicación; que correspondieron a latitud, longitud y elevación sobre el nivel del mar de la estación climatológica.

En el segundo paso se procede a la generación de la información; ClimGen tiene las opciones de que si se tiene información diaria le permite ingresarla y así generar los datos faltantes, en el caso contrario de que no posea dicha información, presenta la opción de ingresar datos promedio mensuales. En este caso, los escenarios generados con SDSM produjeron solo valores mensuales, por lo que esta opción fue la que se utilizó. Antes de ingresar la información se debe especificar una zona climática para el sitio donde se generará la información; dentro de la metodología de ClimGen se trabajaron con dos opciones: dry inland y dry costal; inland significa que se encuentra a más de 100 millas del mar y coastal significa que se encuentra a menos de 100 millas del mar.

En este caso para poder saber si la estación climatológica se encontraba a más o menos de 100 millas del mar, se utilizó el software Google Earth ver. 2010. Para ello se ingresaron marcas de posición para cada estación mediante sus coordenadas en el Google Earth y mediante la herramienta de medición (regla) permitió calcular la distancia de cada estación con respecto al mar. Resuelto este parámetro los valores de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación fueron ingresados.

En ausencia de datos meteorológicos diarios no es posible generar o estimar la radiación solar de forma fiable, por lo que en este caso no se produjeron datos de radiación solar. En ClimGen existen cuatro formatos para los archivos de salida dependiendo de los datos de entrada; en este caso como solo fueron ingresados datos de temperatura y precipitación, estos son los mismos parámetros que contendrán los archivos de salida, los cuales resultaron en el siguiente orden: precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. Una vez seleccionado el formato de archivo de salida se elige el año de inicio de la modelación y la cantidad de años que serán generados; en este estudio el año de inicio fue el 2010 y el periodo a generar fue de 30 años, mismos que en el escenario utilizado en SDSM.

Finalmente el periodo seleccionado es generado en el directorio que se proporcionó al inicio, cada año producido presentará una extensión *.GEN. Un archivo con extensión *.LOC es producido, en este archivo se encuentra un resumen de los valores correspondientes a temperatura máxima y mínima, y de la precipitación, su desviación estándar (en el caso de la precipitación no se generó), y las probabilidades de ocurrencia de lluvia. Una vez que se finalizó con la generación de los datos, se procedió con el siguiente paso en la metodología que fue la obtención de los rendimientos de maíz en condiciones de temporal para el estado de Durango.

3.2.4 Obtención de Rendimientos actuales de maíz

Con base en los objetivos del estudio, una de las fases fue obtener los rendimientos actuales de maíz de grano en condiciones de secano; para poder obtener la información más reciente para el estado de Durango se utilizó la base de datos

proporcionada por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) el cual concentra la base de datos de producción de diversos cultivos de todo el país, y ofrece información a nivel Estado, municipio y DDR, la cual puede ser consultada en la siguiente dirección:

http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=351

Con base en lo anterior, se obtuvieron los rendimientos para el ciclo primavera-verano de los últimos 7 años que comprende el periodo del año 2003 al 2009, esto debido a que son los años en los cuales se tiene información, finalmente se obtuvo un promedio de rendimiento por municipio para el estado de Durango, y para los estados colindantes en donde se utilizaron estaciones climatológicas.

3.2.5 Obtención de rendimientos con el modelo EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator)

El Modelo EPIC fue desarrollado con la finalidad de contar con una herramienta para la determinación de la influencia de las pérdidas de suelo en los procesos productivos. El modelo ha sufrido muchas transformaciones desde su versión inicial y en la actualidad el mismo incluye componentes físicos que incluyen hidrología, simulación de clima, erosión, sedimentación, flujo de nutrientes, crecimiento del cultivo, control ambiental de las plantas y cosecha, entre otros (Bernardos *et al.*, 2001) en este estudio se utilizó la versión 4060 de EPIC (Figura 24).

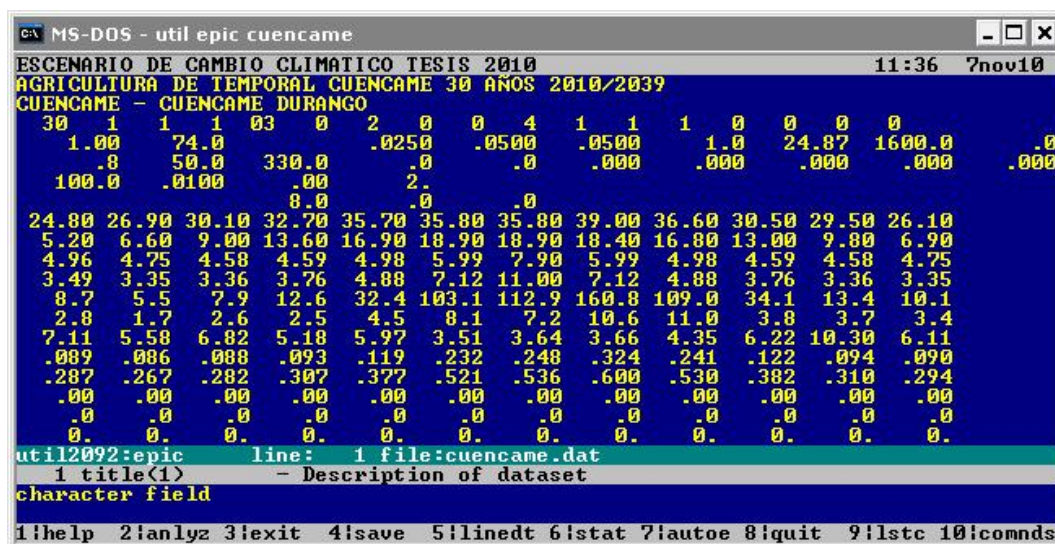


Figura 24. Pantalla de trabajo de EPIC

EPIC es un modelo sofisticado. El cual requiere una gran cantidad de datos de entrada. Solo los datos de entrada más importantes tales como el clima, suelo y el manejo del cultivo, fueron introducidos para este estudio, como se puede ver en la imagen anterior los datos se ingresan en un programa en versión MS-DOS, donde los valores son ingresados en una línea y columna específicos. En seguida se describen cuales fueron los datos que fueron introducidos en el modelo para la obtención de los rendimientos.

En primer lugar se especificó un periodo de 30 años de simulación, se definió el año, el mes y el día de inicio de la simulación, además de la latitud y de la altura sobre el nivel del mar para cada sitio. En cuestiones de clima, el conjunto de datos básicos que son necesarios para cada sitio es un registro de la temperatura máxima y mínima mensual, la desviación estándar de la temperatura máxima y mínima, precipitación mensual, la desviación estándar de la precipitación, el coeficiente de sesgo de la precipitación, la probabilidad de un día húmedo después de un día seco y la probabilidad de un día húmedo después de un día húmedo.

La mayoría de todos estos parámetros fueron obtenidos del archivo de salida que se generó en los 30 años de simulación con el ClimGen. Con estos resultados se produjo un archivo de información con la extensión *.LOC. A excepción de los parámetros correspondientes a la desviación estándar de la precipitación y el coeficiente de sesgo no se generaron en el archivo mencionado anteriormente, por lo que estos fueron obtenidos mediante otro procedimiento que se describe enseguida.

Este procedimiento consistió en ordenar los 30 años de información en una hoja de cálculo de Excel por mes, es decir, se ordenaron todos los valores para enero a partir del año 2010 al 2039, todos los febreros, todos los marzos y así sucesivamente hasta obtener las columnas de información correspondientes, y se utilizó la función de fórmulas para obtener los resultados, este procedimiento fue realizado para cada una de las estaciones consideradas en el estudio.

EPIC puede aceptar hasta 20 parámetros para 10 capas de suelo que presenta el modelo, en este caso, para la condición de seco solo se consideraron las primeras 2 capas de suelo, y a su vez un mínimo de siete parámetros son requeridos: profundidad, porcentaje de arena, porcentaje de limo, densidad aparente, pH, porcentaje de carbono orgánico y porcentaje de carbonato de calcio. Otros parámetros del suelo son estimados por sí mismo en EPIC.

EPIC requiere una descripción detallada del manejo de prácticas de manejo del cultivo. Estas descripciones deben especificar el calendario de las operaciones individuales, ya sea por fecha o por fracción del periodo de crecimiento (es decir, por

unidades de calor). En este caso solo se establecieron las prácticas de manejo en base a por fecha iniciando de la siguiente manera:

<i>OPERACIÓN</i>	<i>DIA</i>	<i>MES</i>
Barbecho	1	Mayo
Rastra	15	Mayo
Siembra en hileras	15	Mayo
Cultivada	15	Junio
Cosecha	30	Septiembre
Desvare	1	Octubre
Incorporación al suelo	15	Octubre

Tabla 2. Prácticas de manejo utilizadas en el modelo EPIC

Una vez que se introdujeron los datos mencionados anteriormente, se realizaron las ejecuciones correspondientes en el modelo y se obtuvieron los rendimientos de maíz afectados por el efecto del cambio climático esto derivado del modelo de circulación canadiense CGCM1 del Centro Canadiense de Modelación y de Análisis Climático (CCCma).

3.2.6 Mapas de temperatura, precipitación y producción de maíz

Para realizar los mapas se utilizó el sistema de Información Geográfica ArcGis ver. 9 ArcMap 9.2 y basado en información vectorial del INEGI y de la Comisión Nacional de Biodiversidad (CONABIO) para el estado de Durango se

realizaron los mapas de localización en el país y se ingresaron las estaciones climatológicas seleccionadas en la primera etapa.

Se añadieron los valores de temperatura máxima y mínima, precipitación y los rendimientos de maíz en condiciones actuales y se realizaron procesos de interpolación por el método de “spline”, para poder obtener un mapa con la distribución de dichos parámetros.

Posteriormente se realizó la interpolación para los valores obtenidos para la temperatura y precipitación afectados por el cambio climático, así como para los rendimientos obtenidos en el modelo EPIC. Finalmente se realizó la resta de los mapas resultantes en condiciones actuales de los mapas con escenarios de cambio climático, lo que generó un tercer mapa con los incrementos o decrementos tanto para temperatura y precipitación, como para los rendimientos de maíz.

IV. RESULTADOS Y/O DISCUSION

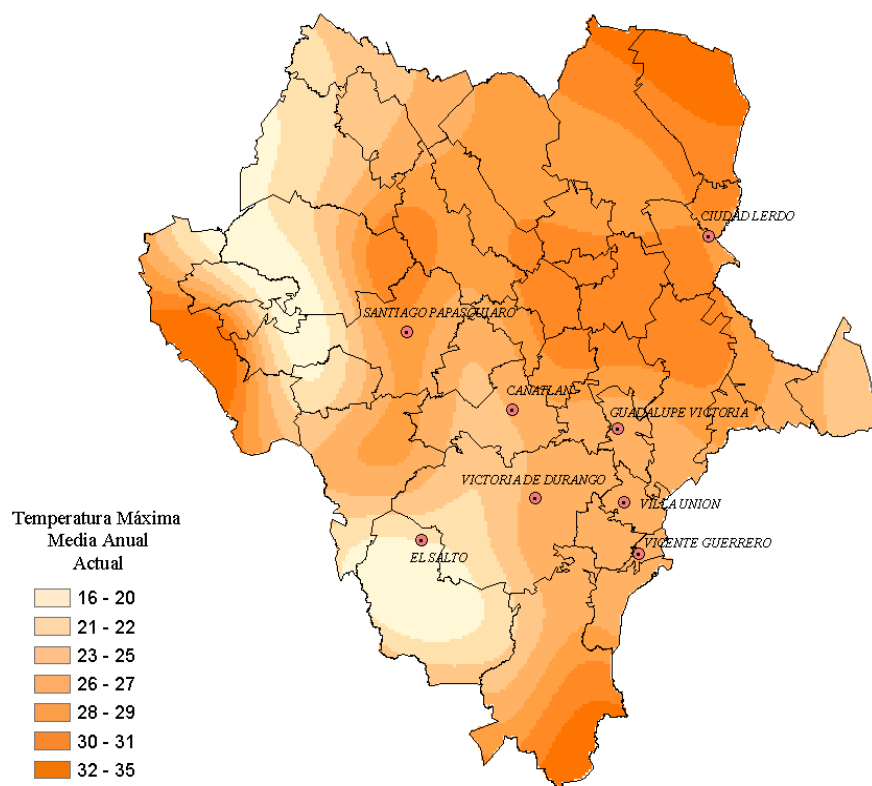
4.1 Temperatura Máxima

En el estado de Durango la temperatura máxima media anual en la actualidad oscila alrededor de los 26.3 °C, el escenario producido arrojó una temperatura de 27.4 °C para los próximos 30 años, por lo cual dicha temperatura se elevó 1.1 °C respecto a las condiciones actuales. Para las estaciones que se consideraron en los estados colindantes, en el estado de Chihuahua se obtuvo un incremento de 0.75 °C, para el estado de Coahuila de 1.2 °C, Nayarit de 0.85 °C, Sinaloa 0.75 °C y Zacatecas de 1.4°C.

A lo largo del estado de Durango se identifican dos regiones principales, la que corresponde a la parte de la Sierra y la que se conoce como la parte de los valles que se extiende hacia el Bolsón. En las siguientes imágenes se presenta la distribución espacial de la temperatura máxima en condiciones actuales y el escenario producido (Figura 25).

De manera general, se pueden apreciar las similitudes entre los dos mapas, aunque el segundo mapa muestra una serie de incrementos de temperatura los cuales se pueden denotar por los rangos que se presentan, sin embargo la apreciación visual es imprecisa por lo que para identificar cuales son las regiones o zonas donde existen incrementos o decrementos se realizó una resta del mapa actual versus mapa escenario, para tener una mejor apreciación.

Distribución espacial de la temperatura máxima media anual actual



Escenario de la distribución espacial de la temperatura máxima media anual

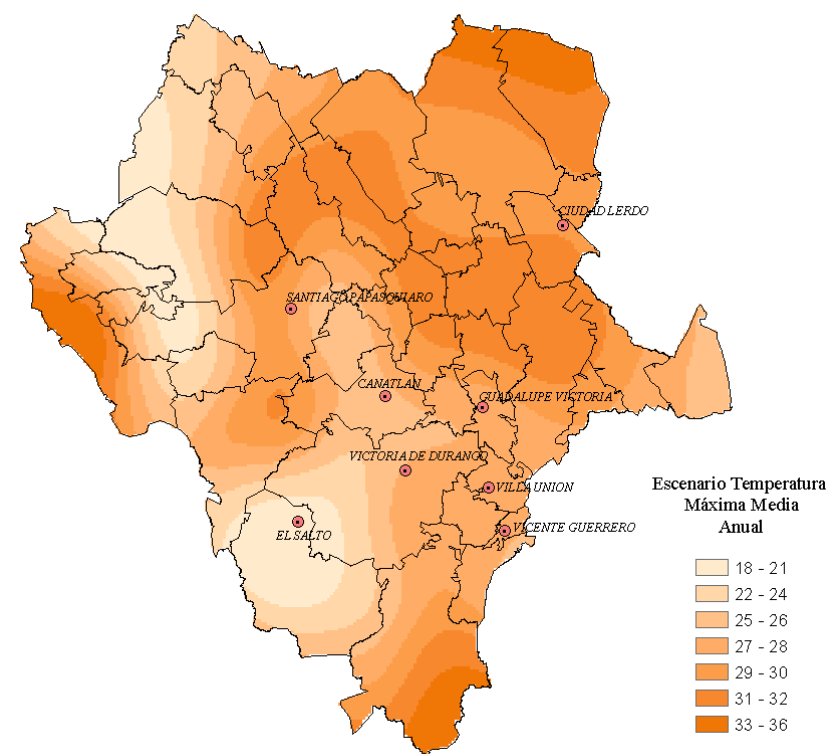


Figura 25. Mapas de distribución de temperatura máxima media anual en condiciones actuales y bajo escenario de cambio climático en los próximos 30 años.

En la región norte y noreste del estado se presentan los incrementos mas considerables respecto a la temperatura máxima, en las estaciones climatológicas que comprenden los municipios de Cuencamé, Indé y Mapimí que resultaron con un aumento de 2.1 °C, 2 °C y 1.7 °C, junto con Tamazula que incrementó su temperatura promedio anual en 1.9 °C este localizado en la parte Oeste del Estado. En la parte Sur, correspondiente a los municipios del Mezquital, Pueblo Nuevo y Súchil, las temperaturas se mantienen casi homogéneas respecto a las condiciones actuales. (Figura 26).

El IPCC sugiere una tendencia de aumento de temperatura, lo que coincide con los resultados anteriores; sin embargo, en el estado de Durango dos estaciones climatológicas no aumentaron su temperatura, sino que la disminuyeron, tal es el caso de la estación de Charco Verde en el municipio de Durango y Chinacates en el municipio de Santiago Papasquiaro, con 0.6 °C y 0.3 °C de disminución, respectivamente. Lo que demuestra la variabilidad de las proyecciones que se pueden presentar en una misma región, esto debido a que en el municipio de Durango resultaron otras tres estaciones, pero con un incremento de 1.2 °C, asimismo sucede con el municipio de Santiago Papasquiaro en donde se localizaron otras dos estaciones que mantuvieron un incremento de 0.9 °C (Anexo 1).

Como se puede apreciar en el mapa de la distribución actual versus escenario; los incrementos de temperatura se presentan en la parte baja del estado con marcadas variaciones, y algunos decrementos en la parte alta. En forma general en los demás municipios los incrementos varían de 0.5 a 1 °C, en promedio.

Representación espacial de la diferencia de Temperatura Máxima Anual Estimada Versus Actual en el Estado de Durango

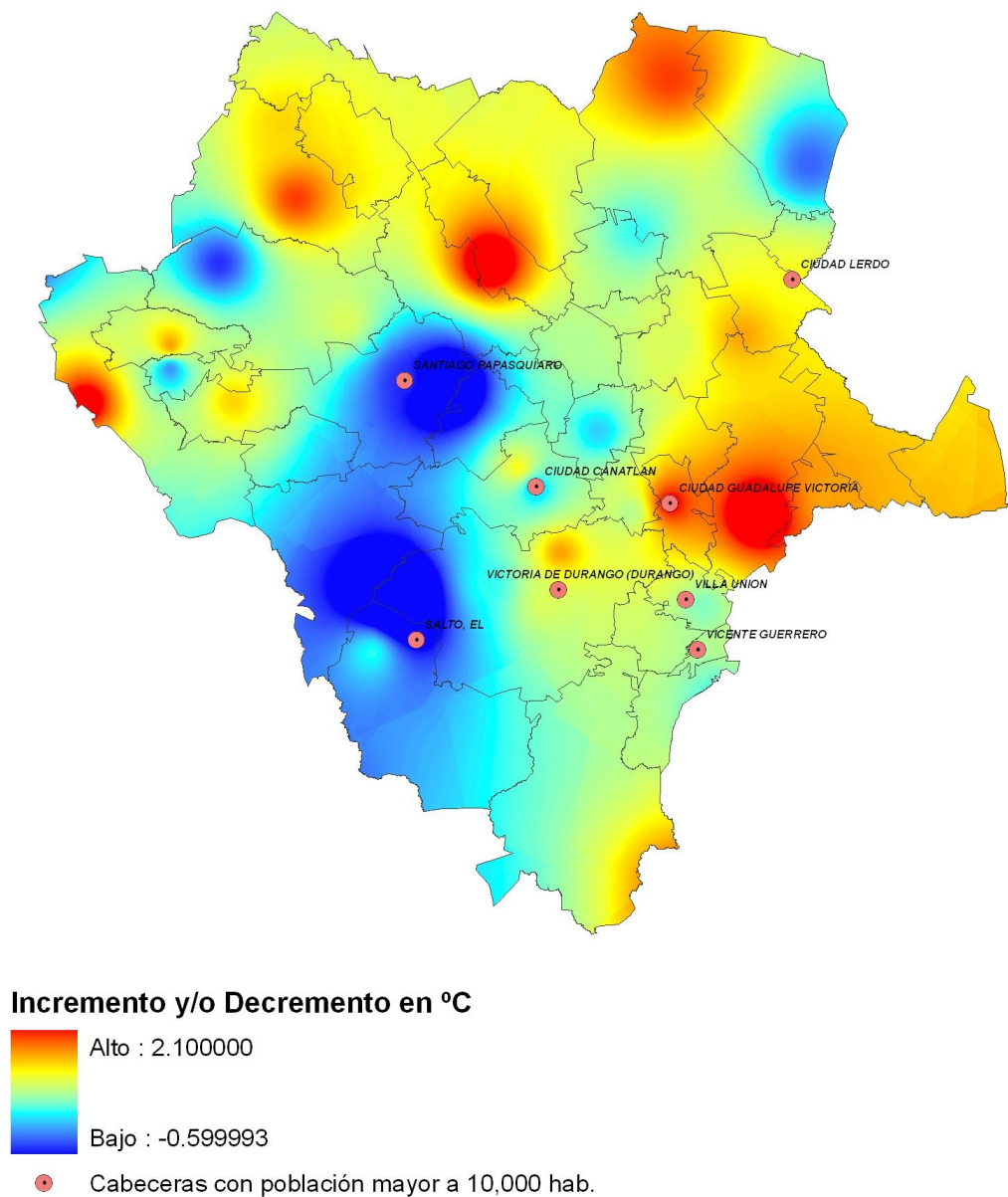


Figura 26. Incrementos y decrementos de la Temperatura Máxima Media Anual Actual versus escenario

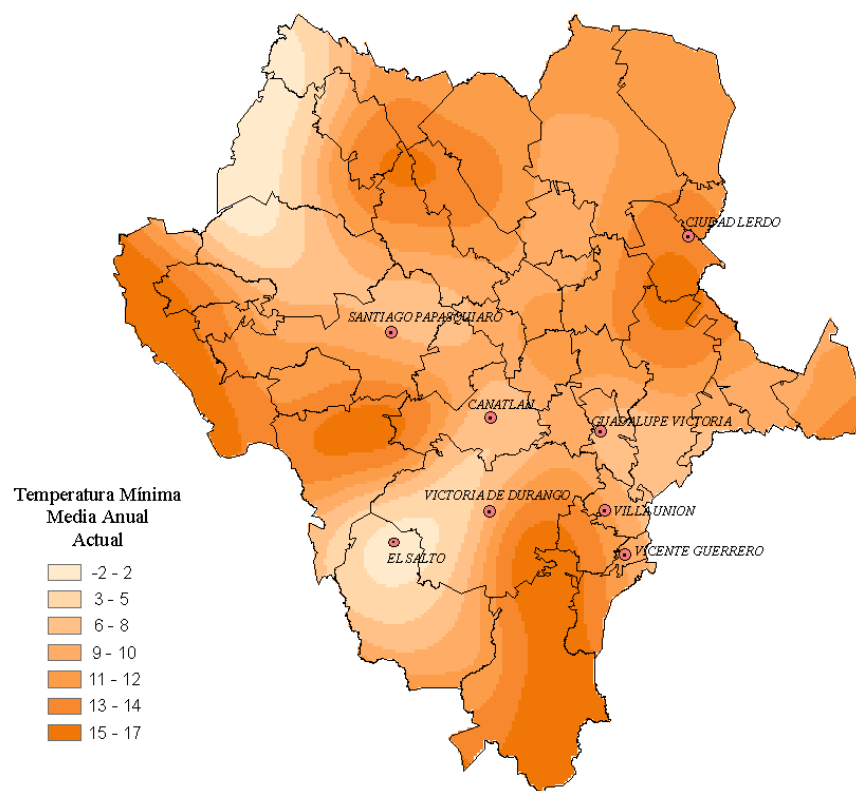
4.2 Temperatura Mínima

En lo que se refiere a la temperatura mínima promedio anual, el estado se mantiene cercano a los 8.9 °C; y el escenario producido arrojó una temperatura promedio de 9.2 °C, por cual a lo largo del estado la temperatura mínima incrementó en 0.3 °C. Las variaciones en las temperaturas por estado, son las siguientes: Chihuahua tuvo un incremento de 0.7 °C, para Coahuila de 0.5 °C, Nayarit 0.9 °C, Sinaloa 0.67 °C y para Zacatecas de 0.33 °C, respectivamente (Anexo 2).

Los siguientes mapas muestran la distribución espacial de la temperatura mínima media actual y el escenario producido. A simple vista los mapas no tienen diferencias notorias en cuanto a la distribución espacial de la temperatura mínima a lo largo del estado, esto debido a que las variaciones son en gran medida en valores que oscilan en los 0.4 grados centígrados en promedio, en el entendido de que en términos de cambio climático, este incremento es considerable por los impactos que pudiera tener en la región (Figura 27).

Como se mencionó anteriormente, para poder apreciar mejor los incrementos o decrementos respecto a la temperatura mínima, se obtuvo un tercer mapa en el cual se puede tener una mejor visualización sobre el comportamiento de esta variable.

Distribución espacial de la temperatura mínima media anual actual



Escenario de la distribución espacial de la temperatura mínima media anual

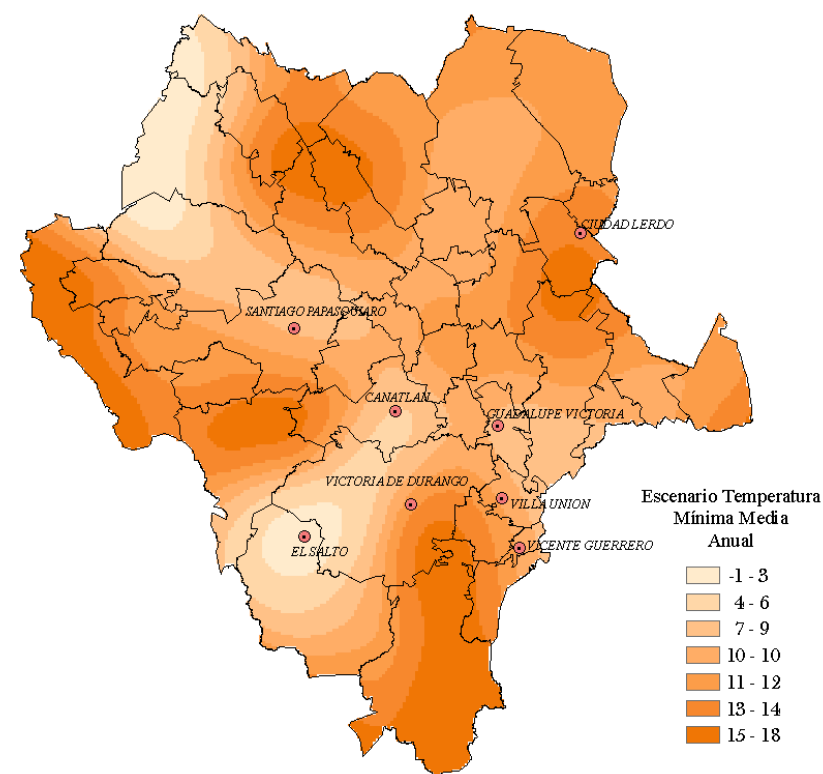


Figura 27. Mapas de distribución de temperatura mínima media anual en condiciones actuales y bajo escenario de cambio climático en los próximos 30 años.

El siguiente mapa muestra la diferencia espacial entre la temperatura mínima actual versus el escenario, donde la parte norte del estado es en donde se presentan aumentos de temperatura, en la cual la estación predominante y que presentó el valor más alto fue la estación de El Palmito en el municipio de Indé, la cual tuvo un aumento de 1 °C. A su vez, dos estaciones disminuyeron su promedio, tal es el caso de la estación Cinco de Mayo en San Pedro de Gallo la cual disminuyó 0.1 °C y la estación El Pueblito en Durango con una disminución de 0.2 °C en el centro del estado (Figura 28).

Por otro lado, hubo estaciones en las cuales la temperatura no tuvo incrementos o decrementos, ya que se mantuvieron con el mismo valor. Algo que se debe de mencionar, es que en la etapa de generación escenarios en las salidas con el modelo estadístico de reducción de escala, en los meses correspondientes al periodo invernal la temperatura presentó una disminución en el escenario respecto a las condiciones actuales, y los incrementos se comenzaban a destacar en el ciclo primavera-verano. Es decir, aunque en promedio anual la temperatura no refleja cambios a primera vista, se espera que el periodo invernal en la mayoría de los sitios de estudio, sea más frío que en las condiciones actuales.

En base a consensos científicos, a escala global observaciones instrumentales realizadas en los últimos 150 años muestran que las temperaturas de la superficie terrestre se han elevado en todo el orbe, con importantes variaciones regionales, y a un ritmo desigual. Respecto al promedio mundial, el calentamiento durante el siglo pasado se produjo del decenio de 1910 al de 1940 (0,35°C), luego se estabilizó e incluso disminuyó hasta mediados del decenio de 1970, a partir de ese tiempo el

promedio de temperaturas de la superficie ha aumentado de nuevo hasta el presente ($0,55^{\circ}\text{C}$), (IPCC, 2007a; Salinger, 2005; The National Academies, 2000). La tendencia lineal a cien años hasta el año 2005 fue de $0,74^{\circ}\text{C}$ de incremento (IPCC, 2007a).

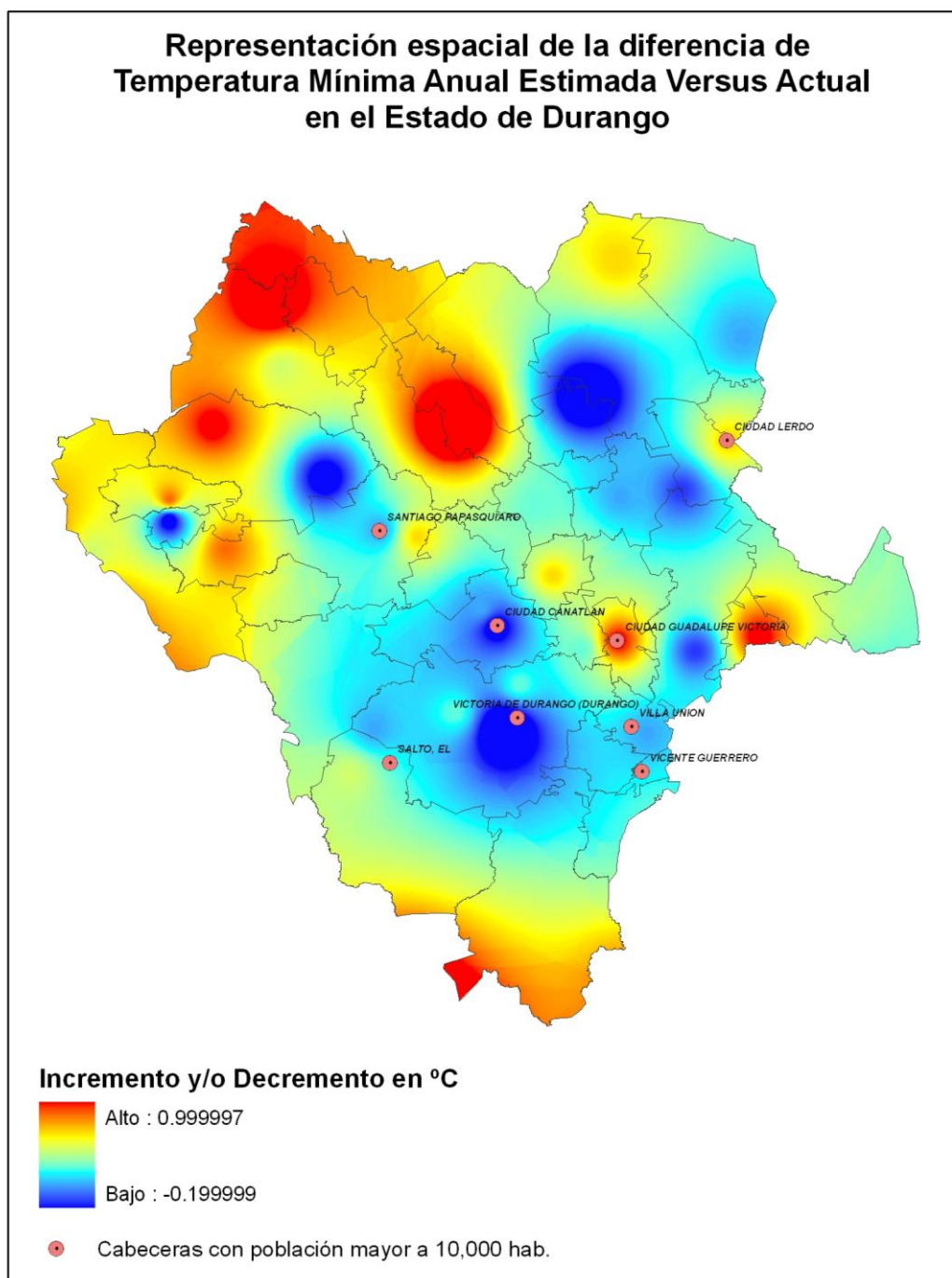


Figura 28. Incrementos y decrementos de la Temperatura Mínima Media Anual Actual versus escenario

Los experimentos con modelos muestran que, incluso si se mantienen constantes todos los agentes de forzamiento radiativo en los niveles del año 2000, se produciría otra tendencia al calentamiento en los próximos dos decenios a un ritmo de 0.1° C por decenio, debido principalmente a la lenta respuesta de los océanos. Podría esperarse casi el doble de calentamiento (0.2 °C por decenio) si las emisiones se encuentran dentro de la gama de variedad de los escenarios del Informe Especial sobre Emisión de Escenarios del IPCC (IPCC, 2007a; 2000).

4.3 Precipitación

A escala global, las observaciones realizadas muestran que en la actualidad ocurren cambios en la cantidad, intensidad, frecuencia, duración y tipo de precipitación (IPCC, 2007a).

En el estado de Durango, la región denominada de los valles hacia el bolsón la precipitación promedio anual oscila de 200 a 400 mm mientras que en la parte de sierra la precipitación es de 800 mm. Los escenarios producidos en forma general indican un incremento en la precipitación en la mayoría de las estaciones que en promedio oscila entre los 177 mm; sin embargo se presenta una variabilidad muy marcada entre las estaciones.

Para el estado de Chihuahua se consideraron 2 estaciones, El Maguey del municipio de Valle de Zaragoza que presentó un incremento de 219 mm, y Guadalupe y Calvo del municipio con el mismo nombre, tuvo una disminución de 343.5 mm; en Coahuila solo una estación fue seleccionada, la cual incrementó su

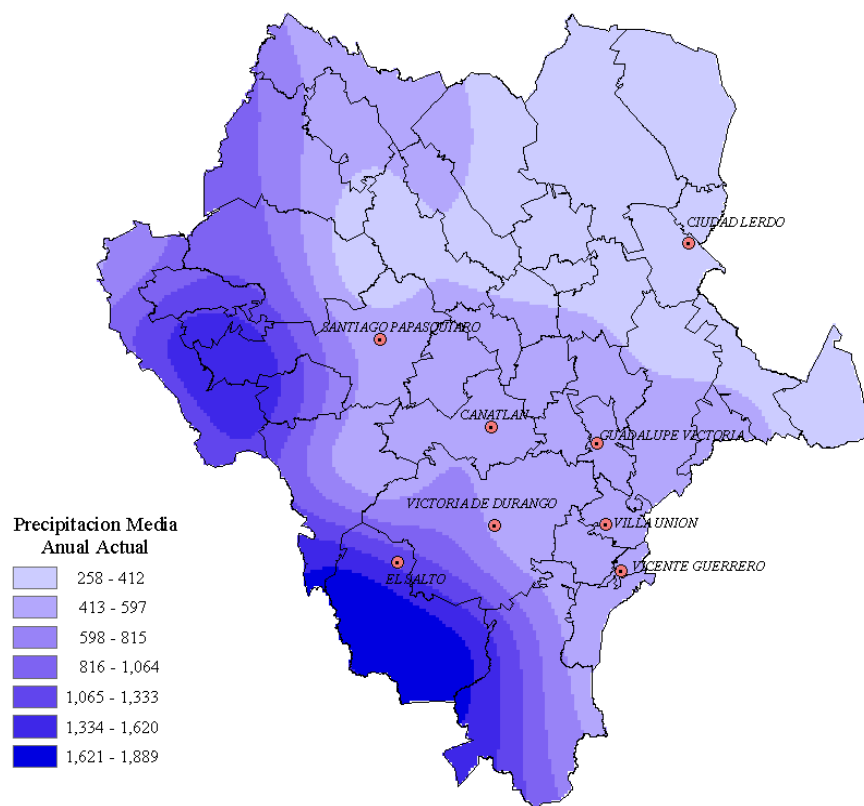
promedio en 150 mm. Para las 2 estaciones de Nayarit (Acaponeta y Rosa Morada) su promedio oscila entre los 1350 mm de lluvia, en base a los escenarios se presentó un incremento de 400 mm, lo que de ser una zona lluviosa, se espera que sea aún más.

En Sinaloa seis estaciones fueron consideradas, 4 de ellas presentan un incremento en su precipitación que oscila entre los 50 a los 400 mm, sin embargo, para las estaciones Soyatita y Tecusiapa, las dos ubicadas en el municipio de Badiraguato, se presentara una disminución con respecto a sus promedios actuales, de 200 y 500 mm, respectivamente. Finalmente para el estado de Zacatecas, 3 estaciones respecto a su promedio actual aumentaron en 200 mm, aproximadamente (Anexo 3).

Los siguientes mapas muestran la distribución de la precipitación media anual a lo largo del estado, la parte que corresponde a la sierra con base al escenario se incrementa significativamente con respecto a las condiciones actuales. La región que comprende a los valles también presenta incrementos considerables.

En términos generales, en las regiones con una precipitación baja se espera que mejore su condición de aridez, como lo es la parte noreste del estado; sin embargo, las zonas consideradas como lluviosas también incrementan su promedio anual, lo que nos sugiere que no porque se espera que haya más precipitación significa que la situación mejore, ya que se podrían presentar cuestiones negativas como inundaciones, encharcamientos, erosión hídrica, entre otros factores (Figura 29).

Distribución espacial de la precipitación media anual actual



Escenario de la distribución espacial de la precipitación media anual

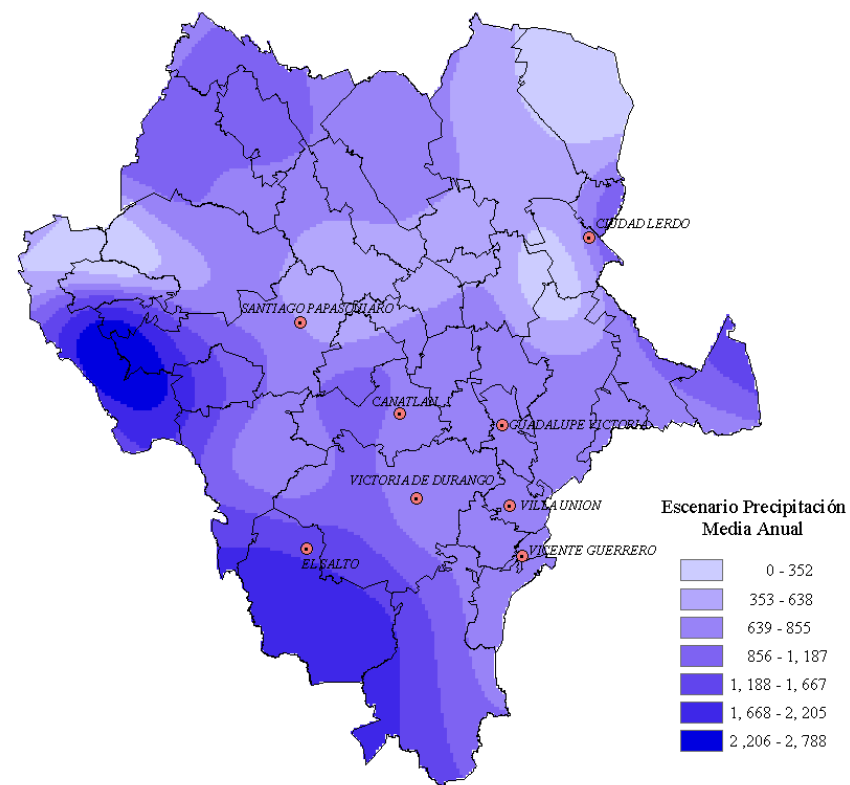


Figura 29. Mapas de distribución de la precipitación media anual en condiciones actuales y bajo escenario de cambio climático en los próximos 30 años.

El mismo procedimiento se realizó para obtener un tercer mapa con la distribución de los incrementos y decrementos, en este caso para la precipitación. En el estado de Durango estaciones climatológicas resultaron con disminución en su promedio anual, las cuales fueron en la parte noroeste del estado, en las que se encuentran El Tarahumar (Tepehuanes) y Topia (Topia) con una disminución promedio de 240 mm y en la parte noreste del estado solo la estación climatológica de Cañón de Fernández la cual registra una precipitación de 310 mm y presentó una disminución de 180 mm, lo cual se podría convertir en una situación crítica por la disminución en su promedio anual (Figura 30).

En la parte sur – suroeste del estado, se presentan los incrementos más significativos, se espera que las estaciones que comprenden los municipios de Santiago Papasquiaro, Tamazula, Canelas, Canatlán y Durango sean los lugares con mayor incremento en el promedio anual respecto a la precipitación.

Estos incrementos en la precipitación, coinciden con lo que se espera suceda en muchas partes del mundo. En algunos lugares se han observado tendencias pronunciadas a largo plazo desde 1900 a 2005 en cuanto a la precipitación: significativamente más húmedo en las zonas orientales de América del Norte y del Sur, Europa septentrional, Asia septentrional y central, pero más seco en el Sahel, África meridional, el Mediterráneo y Asia meridional. Hay más precipitación en forma de lluvia que como nieve en las regiones septentrionales. Se han observado amplios incrementos en precipitaciones intensas hasta en lugares donde las cantidades totales han disminuido. Estos cambios se asocian al incremento del vapor de agua en la atmósfera debido al calentamiento de los océanos mundiales, sobre

todo en las latitudes más bajas. También se han experimentado incrementos en algunas regiones respecto de la ocurrencia de sequías e inundaciones (IPCC, 2007a).

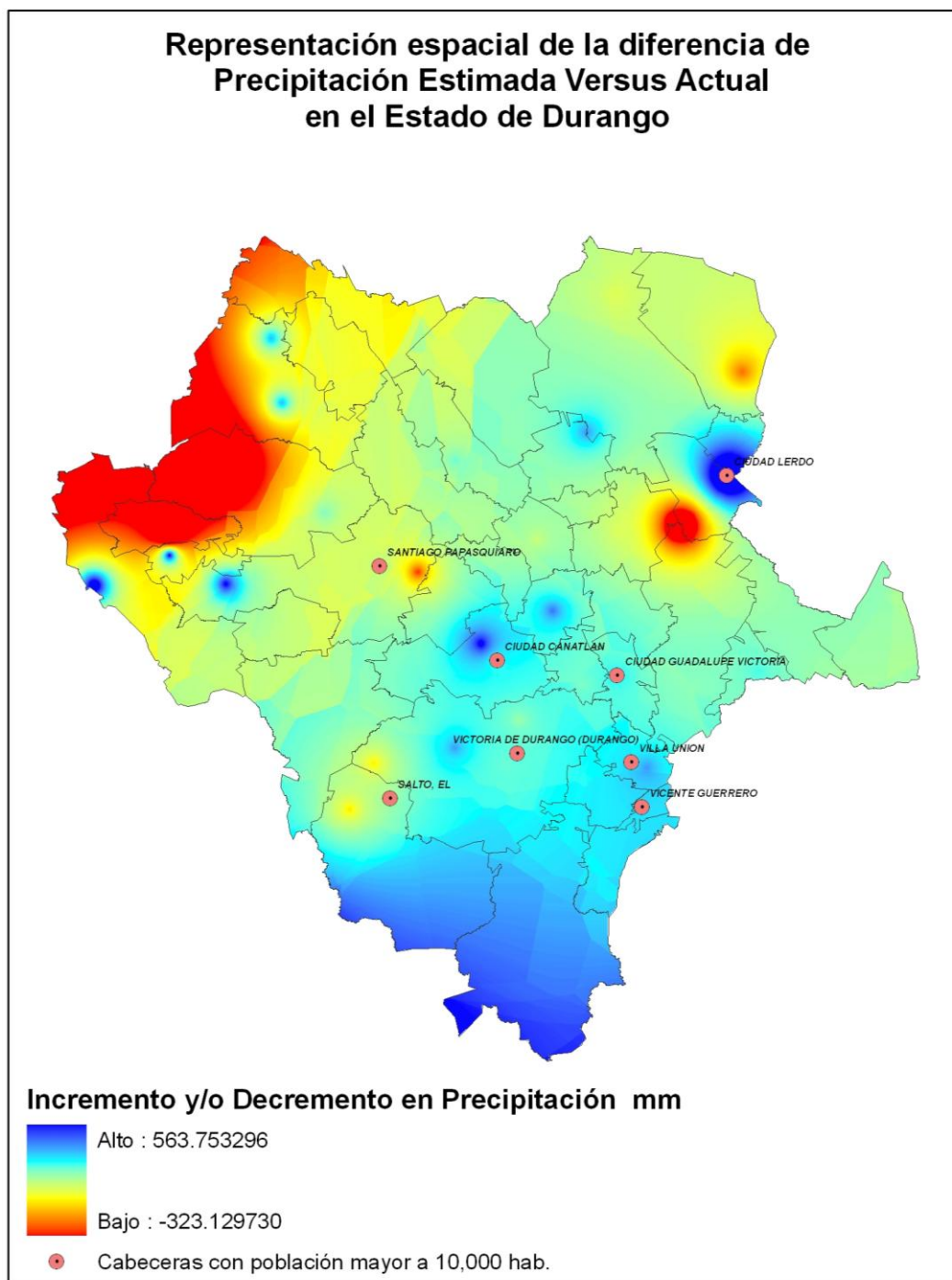


Figura 30. Incrementos y decrementos en la Precipitación Media Anual Actual versus escenario

Otros estudios, sugieren incrementos en la precipitación en latitudes altas y sequías en las regiones semi-áridas en latitudes más bajas, con cambios estacionales en varias regiones, y se espera que sean alrededor de 5 a 10 % por cada grado de calentamiento a nivel global. Sin embargo, los patrones de cambio de precipitación muestran una variabilidad mucho mayor a través de los modelos que los patrones de temperatura. El patrón básico a gran escala y la magnitud de las respuestas de la precipitación en los trópicos, subtrópicos, regiones de latitudes medias y de latitudes altas se puede entender en gran medida como resultado del aumento de vapor de agua en la atmósfera, que son ampliamente consistentes con las tendencias observadas a través de modelos (The National Academies, 2010b).

La precipitación asociada con tormentas en latitudes medias también se espera que incrementen. En algunas zonas, especialmente en las zonas de transición entre las zonas más húmedas y las más secas, el desacuerdo entre los modelos es más amplio (The National Academies, 2010b). En México estudios sobre cuencas hidrológicas en el centro de México sugieren incrementos en la temperatura y precipitación para los próximos 50 años (Maderey y Jiménez, 2000).

4.4 Rendimientos de Maíz grano en condición actual y escenario

El maíz se cultiva prácticamente en todas las condiciones ecológicas de las distintas regiones de México. Es por mucho el cultivo agrícola más importante de México, tanto desde el punto de vista alimentario, como del industrial, político y social. El consumo nacional de maíz en México se ha incrementado durante el periodo 2005-2008. En 2008 se llegó a un máximo histórico de consumo de 32.6

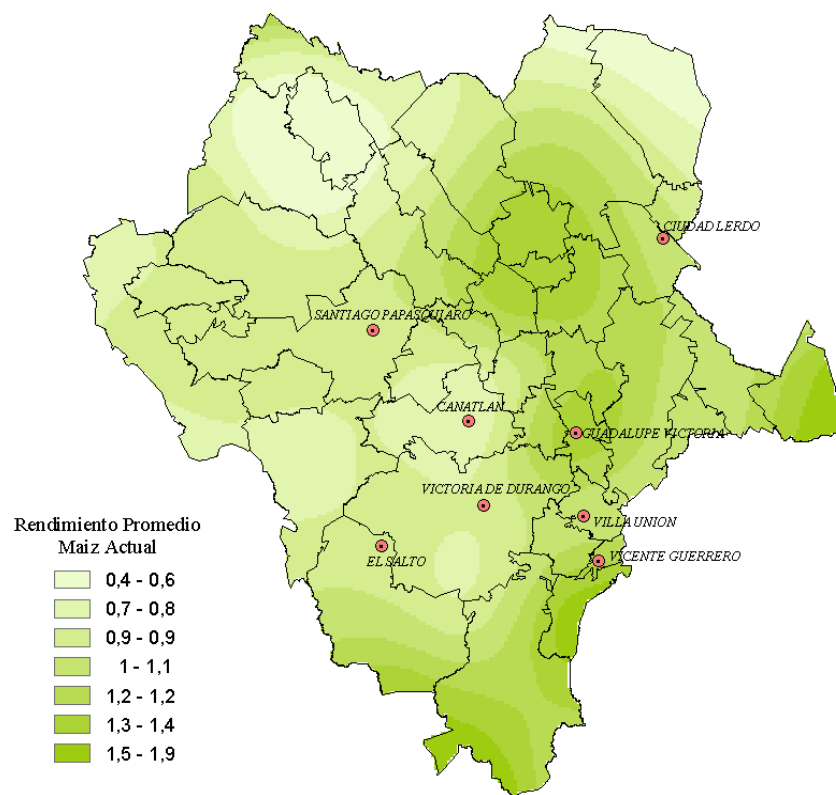
millones de toneladas, de las que México importó 7.4 millones provenientes de los Estados Unidos (Miramontes, 2007; CEVAG, 2005).

La producción generada en el ciclo Primavera Verano representa el 78.5% del total, en tanto que la obtenida en el ciclo Otoño Invierno se produce el 21.5% restante. Por lo que toca al rubro de modalidad hídrica, el 64% se produce en condiciones de secano y el 36% en superficie irrigada (Miramontes, 2007). En el estado de Durango, el maíz es una fuente de ingresos importante para el agricultor, en los últimos 10 años en promedio se sembraron 166,459 ha de secano, con rendimiento promedio de 866 kg/ha y una producción de 125,598 ton (CEVAG, 2005).

De los municipios que tienen el rendimiento mayor al promedio estatal se encuentra Guadalupe Victoria con 1.32 ton/ha y los municipios de San Pedro del Gallo, Rodeo y Nazas, con un promedio de 1.30 ton/ha (Anexo 4). Solo dos municipios presentan los rendimientos muy bajos, que corresponden a los municipios de Guanacevi y de Canatlán con 0.46 y 0.69 ton/ha, respectivamente.

Los siguientes mapas muestran la distribución espacial de los rendimientos de maíz en condiciones actuales en el estado y los que se esperan para los próximos 30 años en el contexto del cambio climático. Se puede identificar que las áreas con mayor producción son las partes bajas, pero en el escenario estimado se presenta un gradiente hacia las partes altas donde se espera mejore la producción (Figura 31). Sin embargo para apreciar mejor el comportamiento se realizó el mapa de comparación en base a la producción actual versus el escenario.

Distribución espacial de los rendimientos de maíz en condiciones actuales



Escenario a futuro de la distribución espacial de los rendimientos de maíz

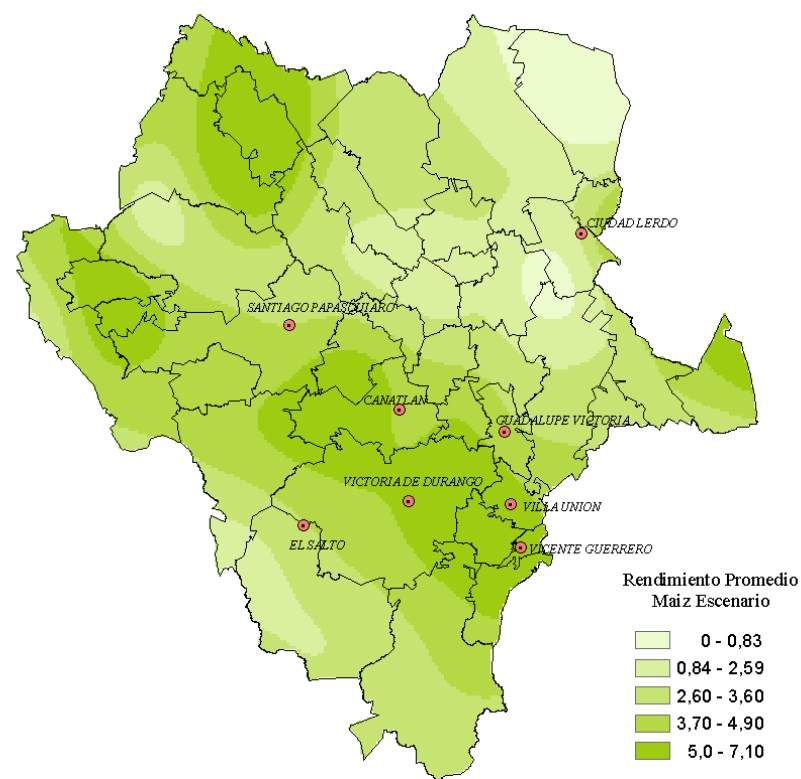


Figura 31. Mapas de distribución de rendimientos de maíz de temporal en condiciones actuales y bajo cambio climático en el estado de Durango

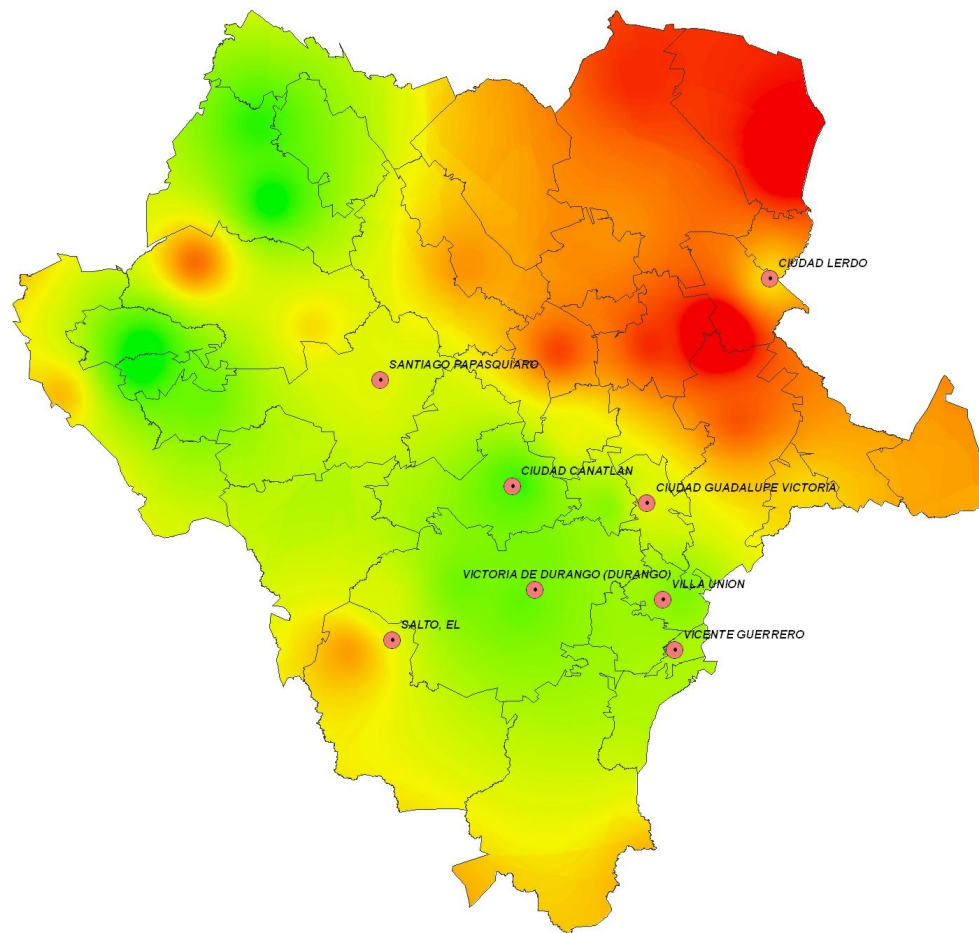
Los municipios de Guanaceví y Canatlán que eran los municipios que presentaban los rendimientos bajos, ahora se convierten en los sitios, junto con Durango y Canelas, como los lugares que se espera tengan un mejor rendimiento debido a que sus incrementos oscilan entre las tres a cuatro ton/ha. Solo Cuencamé y Tlahualilo son los lugares en los que se espera el rendimiento disminuya de 100 kg/ha hasta una ton/ha.

El siguiente mapa con la distribución espacial de los rendimientos muestra como se da una conversión de las áreas en las que se tenían los menores rendimientos y que se convierten ahora en las que potencialmente se esperarían los mejores rendimientos (Figura 32). Es decir, las partes altas o correspondientes a la sierra son las que se espera sean las mejores para producir maíz en condiciones de temporal.

Sin embargo, no quiere decir que en la actualidad, el hecho de que no existan rendimientos altos en las partes altas sea porque no son potencialmente aptas para el cultivo del maíz. Esto puede ser resultado de ciertos factores: 1) que la población siembre otros cultivos y no necesariamente maíz y 2) que se dediquen a otras actividades como la ganadería y/o la actividad forestal, y la cuestión agrícola este en términos secundarios.

Cabe mencionar que en este estudio las cuestiones sociales o económicas no están siendo consideradas, por lo que únicamente se hace referencia a que los resultados obtenidos están en el supuesto de que están afectados por el cambio climático.

Representación espacial de la diferencia de Rendimientos de Maíz Estimados Versus Actual en el Estado de Durango



Incremento y/o Decremento en Rendimiento Ton/ha



Alto : 5.099979

Bajo : -1.059983



Cabeceras con población mayor a 10,000 hab.

Figura 32. Incrementos y decrementos en los rendimientos de maíz en la actualidad versus escenario

V. CONCLUSIONES

Los Modelos de circulación general proveen simulaciones razonables del clima en variables a escala global; sin embargo, son menos precisos en predecir las variables a escala local. Por ello, el desarrollo de herramientas que ayuden a tener un mejor entendimiento del cambio climático nos permitirá tener una mejor perspectiva de estos cambios que están sucediendo a escala global, y que sin duda tendrán un impacto significativo a escala local y/o regional, y nos puedan permitir discernir dichas situaciones y en su caso, tomar las mejores decisiones respecto a un evento determinado.

Los modelos climáticos son una herramienta esencial para entender el clima actual y la posible variabilidad que nos depara en el futuro. Las técnicas de reducción de escala, son un instrumento que nos facilita el proceso de reducción de escala espacial de los datos climáticos que provienen de la malla de gran resolución de los modelos de circulación general que contribuye en la evaluación de los impactos regionales del calentamiento climático.

Los modelos de cultivo son otro instrumento que nos permite simular el crecimiento de las plantas en respuesta de ciertos factores y niveles de interacción, que nos permitan incrementar la comprensión sobre ese crecimiento y más aún, que ayude a enfocar recursos en una determinada investigación, y en general para la gestión y/o toma de decisiones.

Finalmente, se acepta que con todas las vicisitudes e incertidumbres de los modelos utilizados, estos siguen siendo la mejor herramienta para evaluar los posibles efectos de un fenómeno determinado.

Lo que es un hecho decisivo es que el planeta se esta calentando aun ritmo acelerado, producto de las diversas actividades humanas que liberan grandes cantidades de gases de efecto invernadero; el acelerado crecimiento poblacional que cada día demanda mas recursos para poder sobrevivir, y que sin duda alteran los ecosistemas para poder obtener los beneficios que se demandan y la falta de cultura y conciencia ambiental.

Todos estos factores sumados a la variabilidad natural, contribuyen a un deterioro de nuestro planeta tierra, que si no tomamos conciencia del daño que hacemos y que nos hacemos, traerá consecuencias fatales, mas graves de las que ya están sucediendo en la actualidad.

...

VI. LITERATURA CITADA

- Abraha M. G. & Savage M. J. 2006. Potential impacts of climate change on the grain yield of maize for the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. *Journal of Agriculture, Ecosystems and Environment* 115: 150–160
- Adhya T. K., Sharma P. D. and Gogoi K. A. 2009. Mitigating Greenhouse Gas Emission from Agriculture. En: S.N. Singh (ed.) *Climate Change and Crops, Environmental Science and Engineering*.
- Aggarwal P. K., Kalra N., Chander S. and Pathak H. 2006a. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yield, losses due to pest, and environmental impact of agro-ecosystem in tropical environments: I. Model Description. *Agricultural Systems* 89: 1–25
- Aggarwal P. K., Banerjee B., Daryaei M. G., Bhatia A., Bala A., Rani S., Chander S., Pathak H. and Kalra N. 2006b InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yield, losses due to pest, and environmental impact of agro-ecosystem in tropical environments: II. Performance of the Model. *Agricultural Systems* 89: 47–67
- Ainsworth E. A. and McGrath J. M. 2010. Direct Effects of Rising Atmospheric Carbon Dioxide and Ozone on Crop Yields. En: D. Lobell and M. Burke (eds.), *Climate Change and Food Security, Advances in Global Change Research* 37.
- Arkin P., Cullen H. and Xie P. 2007. Oceanic Precipitation Variability and the North Atlantic Oscillation. Book Chapter. *Advances in Global Change Research*, 1, Volume 28, *Measuring Precipitation From Space*, Section 1, Pages 37-47.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, Eds., 2008. *El Cambio Climático y el Agua*. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, 224 págs.
- Bernardos J. N., Viglizzo E. F., Jouvet V., Lértora F. A., Pordomingo A. J. and Cid F. D. 2001 The use of EPIC model to study the agroecological change during 93 years of farming transformation in the Argentine pampas. *Agricultural Systems* 69: 215-234
- Bertrand, C., Loutre M. F., Crucifix M. and Berger A. 2002. Climate of the last millennium: a sensitivity study. *Tellus A* 54: 221-244.
- Bojariu R. & Gimeno L. 2003. Predictability and numerical modelling of the North Atlantic Oscillation. *Earth-Science Reviews* 63: 145–168.
- Bruinsma J. 2003. *World agriculture: towards 2015/2030 An FAO Perspective*. Earthscan Publications Ltd London

- Buchdahal J. 2002. Climate Change. Fact Sheet Series for Key Stage 4 and A-Level. Atmosphere, Climate and Environment. Information Programme, aric. Manchester Metropolitan University. Manchester.
- Burton I. & Lim B. 2005. Achieving adequate adaptation in agriculture. En: Increasing climate variability and change. Reducing the Vulnerability of Agriculture and Forestry. Salinger, Sivakumar and Motha (ed.) Reprinted from Climatic Change Volume 70, Nos. 1–2, 2005
- Cane M. 2005. The evolution of El Nino, past and future. Earth and Planetary Science Letters 230: 227–240.
- Castellvi, F. & Stöckle, C. O. 2001. Comparing the performance of WGEN and ClimGen in the generation of temperature and solar radiation. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 44: 1683–1687.
- CEVAG. 2005. Guía para la asistencia técnica agrícola. Área de influencia del Campo Experimental Valle del Guadiana. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Durango, Durango.
- Chen S. T., Yu P. S. and Tang Y. H. 2010. Statistical downscaling of daily precipitation using support vector machines and multivariate analysis. Journal of Hidrology 385: 13-22.
- Chen D. & Cane M. A. 2008. El Niño prediction and predictability. Journal of Computational Physics 227: 3625–3640.
- Chu J. T., Xia J., Xu C. Y. and Singh V. P. 2010. Statistical downscaling of daily mean temperature, pan evaporation and precipitation for climate change scenarios in Haihe River, China. Theoretical and Applied Climatology. 99: 149–161.
- Conde, C. 2006. México y el Cambio Climático Global. Dirección General de Divulgación de la Ciencia Universidad Nacional Autónoma de México – Centro de Ciencias de la Atmósfera. Ciudad Universitaria, México, D.F.
- Conde C., Ferrer R. M., Araujo R., Gay C., Magaña V., Pérez J. L., Morales T. y Orozco S. 2004. El niño y la Agricultura. En: Magaña Rueda Víctor (Editor) (2004). Los impactos del niño en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Secretaría de Gobernación. México, 229 p
- Conde C., Ferrer R. M. y Liverman D. 2000. Estudio de la vulnerabilidad de la agricultura de maíz de temporal mediante el modelo CERES-MAIZE en Gay García Carlos (Compilador) (2000). México una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México, 220 p.

- Copa – Cogeca. 2008. La agricultura para combatir el cambio climático. Comité de las organizaciones profesionales agrícolas de la Unión Europea – Confederación general de cooperativas agrarias de la Unión Europea.
- Cowie J. 2007. *Climate Change. Biological and Human Aspects*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Crowley T. J. 2000. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science* 289: 270. Descargado de www.sciencemag.org on October 11, 2010.
- D'Aleo J. & Easterbrook D. 2010. Multidecadal tendencies in ENSO and global temperatures related to multidecadal oscillations. *Energy & Environment* 21 (5) 437-460.
- Danuso, F. 1997. CLIMAK reference manual. DPVTA, University of Udine, Italy.
- Dibike, Y. B. & Coulibaly, P. 2005. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 307 (1-4): 145-163.
- Easterling, W. E., Aggarwal P. K., Batima P., Brander K. M., Erda L., Howden S. M., Kirilenko A., Morton J., Soussana J-F., Schmidhuber J. and Tubiello F. N. 2007: Food, fibre and forest products. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 273-313.
- Elvingson P. & Ågren C. 2004. Air and the Environment. Online version. <http://www.airclim.org/airAndEnvironment/index.php>
- Falloon P., Smith P., Betts R., Jones C. D., Smith J., Hemming D. and Challinor A. 2009. Carbon Sequestration and Greenhouse Gas Fluxes from Cropland Soils – Climate Opportunities and Threats. En: S.N. Singh (ed.). *Climate Change and Crops*, Environmental Science and Engineering.
- FAO. 2002. Agricultura mundial, hacia los años: 2015-2030. Informe Resumido. Roma, Italia.
- Fernández I., Pacheco J. M. and Quintana M. P. 2010. Pinkness of the North Atlantic Oscillation signal revisited. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 389: 5801–5807
- Flato, G. M.; Boer, G. J.; Lee, W. G.; MacFarlane, N. A.; Rmasdem, D., Reader, M.C. and Weaver, A. J. 2000. The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis Global Coupled Model and its Climate. *Climatic Dynamics* 16: 451-467.

- Fowler H. J., Blenkinsop S. and Tebaldib C. 2007. Review. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological Modeling. *International Journal of Climatology* 27: 1547–1578.
- Gaiser T., Barros I., Sereke F. and Lange F-M. 2010. Validation and reliability of the EPIC model to simulate maize production in small-holder farming systems in tropical sub-humid West Africa and semi-arid Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 135: 318–327
- Ghosh S. & Mujumdar P. P. 2008. Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow using relevance vector machine. *Advances in Water Resources* 31: 132-146
- Gimeno L., Ribera P., Nieto R., Perez J. F., Vidal O., De la Torre L., Gallego D., Garcia R., and Hernandez E. 2002. Imprints of the North Atlantic Oscillation on four unusual atmospheric parameters. *Earth and Planetary Science Letters* 202: 677-692.
- Giridharan R. & Kolokotroni M. 2009. Urban heat island characteristics in London during winter. *Solar Energy* 83: 1668–1682
- Gitay H., Brown S., Easterling W. and Jallow B. 2007. Ecosystems and their goods and services. En: *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007* M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Glasow R. V., Bobrowski N. and Kern C. 2009. The effects of volcanic eruptions on atmospheric chemistry. *Chemical Geology* 263: 131–142.
- Greatbatch R. J. 2001. The North Atlantic Oscillation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment Entretiens Jacques-Cartier, Montreal* 2000 Version as of May 4, 2000.
- González E. M.; Jurado, E.; González E. S.; Aguirre C. O.; Jiménez P. J. y Navar J. 2003. Cambio Climático Mundial: Origen y Consecuencias. *Ciencia UANL*, Julio-Septiembre, año/vol. VI, numero 003. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México. pp 377-385.
- Hashmi M. Z., Shamsedin A. Y. and Melville B. W. 2010. Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling for extreme precipitation events in a watershed. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 25 (4): 475-484
- Hessami M., Gachon P., Ouarda T. B., and St-Hilaire A. 2008. Automated regression-based statistical downscaling tool. *Environmental Modelling & Software* 23: 813-834.

- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (Eds.), 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Huang J., Zhang J., Zhang Z., Xu C. Y., Wang B. and Yao J.. 2010. Estimation of future precipitation change in the Yangtze River basin by using statistical downscaling method. *Stochastic. Environmental Research and Risk Assessment* 99 (1-2): 149-161
- Huffman T. N. 2010. Intensive El Niño and the Iron Age of South-eastern Africa. *Journal of Archaeological Science* 37: 2572-2586.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2006 *Extractor Rápido de Información Climatológica III*, v. 1.0. Información climatológica disponible en formato electrónico. Jiutepec, Morelos, México
- INE (Instituto Nacional de Ecología) 2007. Determinación de períodos de sequía y lluvia intensa en diferentes regiones de México ante escenarios de cambio climático. Estudio desarrollado por: Prieto R., M. Montero, J. Sánchez y W. Ojeda, del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, para el Instituto Nacional de Ecología. 101 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2008. *Anuario Estadístico del Estado de Durango*. Aguascalientes, Aguascalientes. México.
- IPCC, 2010: Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, pp. 117.
- IPCC, 2007a. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis K. B., Averyt M. T. and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York. NY, USA.
- IPCC, 2007b. *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: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.
- IPCC, 2001. In: *Climate Change 2001: synthesis report. A contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Watson, R. T. and the Core Writing Team (Eds.). Cambridge University Press, New York, N.Y. USA.
- IPCC, 2000. *Special Report Emission Scenarios. Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III*.

- Johnson, G.L., C.L. Hanson, S.P. Hardegree, and E.B. Ballard. 1996. Stochastic weather simulation: overview and analysis of two commonly used models. *Journal of Applied Meteorology*. 35: 1878-1896
- Kannan S. & Ghosh S. 2010. Prediction of daily rainfall state in a river basin using statistical downscaling from GCM output. *Environmental Research and Risk Assessment* 25 (4): 457-474
- Keeling C. D. & Whorf T. P. 2005. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, TN. Available: <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/sio-keel-flask/sio-keel-flask.html>
- Kliejunas J. T., Geils B. W., Glaeser J. M., Goheen E. M., Hennon P., Mee-Sook K., Kope H., Stone J., Sturrock R. and Frankel J. S. 2009. Review of Literature on Climate Change and Forest Diseases of Western North America. Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 54 pp.
- Ko J., Piccinni G. and Steglich E. 2009. Using EPIC model to manage irrigated cotton and maize. *Agricultural Water Management* 96: 1323–1331
- Kolokotroni M. & Giridharan R. 2008. Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy* 82: 986–998
- Krishnan P., Ramakrishnan B., Rao K. S. and Dash R. N. 2009. Simulation Studies to Characterize the Impact of Climate Change on Crop Production and to Identify Strategies for Adaptation and Mitigation. En: *Climate Change and Crops*. S.N. Singh National Botanical Research Inst. (NBRI) Environmental Science Division. India.
- Kurukulasuriya P. & Rosenthal S. 2003. Climate Change and Agriculture A Review of Impacts and Adaptations. The World Bank Environment Department. Climate Change Series. Paper No 91.
- Liao S. Y., Chen C. C. and Hsu S. H. 2010. Estimating the value of El Niño Southern Oscillation. Information in a regional water market with implications for water management. *Journal of Hydrology* 394 (3-4): 347
- Lichtfouse E. 2009. Climate Change, Society Issues and Sustainable Agriculture. En: E. Lichtfouse (ed.). *Climate Change, Intercropping, Pest Control and Beneficial Microorganisms*, Sustainable Agriculture Reviews 2.
- Li K. & Qi J. 2010. Statistical Downscaling: a Powerful Tool for Estimating Global Change Impacts on Regional Scale. 2nd Conference on Environmental Science and Information Application Technology.

- Liu J., Williams J. R., Wang X. and Yang H. 2009. Using MODAWEC to generate daily weather data for the EPIC model. *Environmental Modelling & Software* 24: 655–664
- Liverman, D., M. Dilley, K. O'Brian and L. Menchaca. 1994, Possible Impacts of Climate Change on Maize Yields in Mexico. En: *Implications of Climate Change for International Agriculture: Crop Modeling Study*, Cynthia Rosenzweig and Ana Iglesias, (Eds), EPA.
- Liverman, D. 1990. Drought Impacts in Mexico: Climate, Agriculture, Technology, and Land Tenure in Sonora and Puebla. *Annals of the Association of American Geographers*. 80 (I): 49-72
- Li Z., Liu W., Zhang X. C. and Zheng F. L. 2009. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchments on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology* 377: 35–42.
- Lobell D. 2010. Crop Responses to Climate: Time-Series Models 97-98. En: D. Lobell and M. Burke (eds.), *Climate Change and Food Security, Advances in Global Change Research* 37.
- Lobell D. & Burke M. 2010. Global and Regional Assessments 177-192. En: D. Lobell and M. Burke (eds.), *Climate Change and Food Security, Advances in Global Change Research* 37
- López L., V. M. 2009. Cambio climático y calentamiento global: ciencia, evidencias, consecuencias y propuestas. Ed. Trillas. México, D. F. 227 p.
- López B., F. 2000. Impactos regionales del cambio climático. Valoración de la vulnerabilidad. *Papeles de Geografía*, Julio-Diciembre, número 032. Universidad de Murcia. Murcia España. p. 77-95.
- Maderey R. L. E. y Jiménez R. A. 2000. Los recursos hidrológicos del centro de México ante un cambio climático global. En: *México una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. Gay García Carlos (Compilador) (2000). Instituto Nacional de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México, 220 p.
- Magaña R., V. O. 2004. El Cambio climático global: comprender el problema. En: *Cambio Climático: una visión desde México*. Julia Martinez y Adrián Fernández Brematuz (compiladores) con la colaboración de Patricia Osnaya. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F.
- Magaña R. V. O. 2009. Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones. Centro de Ciencias de la Atmósfera de a UNAM-INE. 76p.

- Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace, and R. C. Francis. 1997. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with impacts on Salmon Production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78 (6): 1069-1079.
- Mantua N. J. & Hare S. R. 2001. The Pacific Decadal Oscillation. A review paper submitted to the *Journal of Oceanography* Revised August 8, 2001.
- Martínez B. M. C., Pérez L. L., Muries B., Azcarate M. O. and Carvajal M. 2009. Climate Change and Plant Water Balance: The Role of Aquaporins – A Review. En: E. Lichtfouse (ed.), *Climate Change, Intercropping, Pest Control and Beneficial Microorganisms, Sustainable Agriculture Reviews* 2,
- McGill W. B., Rosenberg N. J. and Jakas Q. 2006. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. *Ecological Modelling* 192: 362–384
- McKague K., Rudra R. and J. Ogilvie. 2003. ClimGen – A Convenient Weather Generation Tool for Canadian Climate Stations. Paper No. 03-118. CSAE/SCGR Meeting Montréal, Québec
- McLean J. 2007. Fallacies about GlobalWarming. Science & Public Policy Institute. Washington, D.C. 8 pp.
- Memon R. A., Leung D. Y-C. and Liu C. H. 2009. An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmospheric Research* 94: 491–500
- Memon R. A., Leung D. Y-C. and Liu C. H. 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences* 20: 120–128
- Miramontes P. C. U. 2007. Situación y Perspectivas del Maíz en México 1996-2012. Servicio de información agroalimentaria y pesquera (SIAP). México D.F. 208 p.
- Mirzaei P. A. & Haghighat F. 2010. Approaches to study Urban Heat Island - Abilities and limitations. *Building and Environment* 45: 2192-2201.
- Monckton B. F. 2007. Greenhouse warming? What greenhouse warming? Science & Public Policy Institute (SPPI). Washington DC. 16 pp.
- Moradi I., Nosrati K. and Eslamian S. 2007. Evaluation of the RadEst and ClimGen Stochastic Weather Generators for Low-Medium Rainfall Regions. *Journal of Applied Sciences* 7 (19): 2900-2903.
- Moussas X., Polygiannakis J. M., Preka-Papadema P. and Exarhos G. 2005. Solar cycles: A tutorial. *Advances in Space Research* 35: 725–738.
- Nicks, A.D., C.W. Richardson, and J.R. Williams. 1990. Evaluation of the EPIC model weather generator. In *EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator*,

1. Model Documentation, USDA Technical Bulletin No. 1768, Eds. A.N. Sharpley and J.R. Williams. 105-124. Washington, DC, U.S.A.
- Niu X., Easterling W., Hays C. J., Jacobs A. and Mearns L. 2009. Reliability and input-data induced uncertainty of the EPIC model to estimate climate change impact on sorghum yields in the U.S. Great Plains. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 129: 268–276
- NSF (National Science Foundation). 2009 Climate Literacy. The Essential Principles of Climate Sciences. Washington DC United States of America. 17 pp.
- Ojeda, B. W., P. Martínez y L. Hernández. 2006. Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego. En: Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Capítulo 9. IMTA, México.
- Peña, B. y J. Ramírez. 1993. La operación de maíz de alta producción bajo la estrategia del Plan Puebla. Colegio de Posgraduados. CEICADAR. Chapingo. 72 pp.
- Pimentel D. 2009. Agriculture and Food Problems. Chapter 27: 513-516. En: Jan J. Boersema and Lucas Reijnders (eds.), *Principles of Environmental Sciences*, Springer Science + Business Media B.V.
- Qaderi M. M. & Reid M. D. 2009. Crop Responses to Elevated Carbon Dioxide and Temperature. Chapter 1: 1-18 En: S.N. Singh (ed.). *Climate Change and Crops*, Environmental Science and Engineering.
- Ren J., Yu F., Chen Z. and Qin J. 2010. Regional Yield Estimation of Summer Maize Based on Assimilation of Remotely Sensed LAI into EPIC Model. En: 2010 Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing.
- Richardson, C.W. & Wright D. A. 1984. WGEN, A Model for Generating Daily Weather Variables, USDA ARS Bulletin No. ARS-8. Washington, DC, U.S.A.: Government Printing Office.
- Robock, A. 2000. Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics* 38: 191-219.
- Rosegrant M. W., Ewing M., Yohe G., Burton I, Huq S., and Valmonte S. R. 2008. *Climate Change and Agriculture. Threats and Opportunities*. Eschborn Germany. Climate Protection Programme for Developing Countries. 36 pp.
- Rosenzweig C. 2007. *Climate Change & Agriculture. Learning lessons & proposing solutions*. Iowa State University. U.S.A. 28 pp.
- Rosenzweig C., Solecki W. D., Parshall L., Choppingc M., Popec G. and Goldberg R. 2005. Characterizing the urban heat island in current and future climates in New Jersey. *Environmental Hazards* 6: 51–62

- Rosenzweig C., Tubiello F. N., Goldberg R., Mills E., and Bloomfield J. 2002. Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change. *Global Environmental Change* 12: 197–202
- Ruddiman, W.F. 2003. The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic Change*. 61: 261-293.
- Ruzmaikin A. 2007. Effect of solar variability on the Earth's climate patterns. *Advances in Space Research* 40: 1146–1151.
- Sanchez C. I. 2005. Fundamentos para el manejo integral del agua. Libro Científico No. 2. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmosfera. Gomez Palacio Durango Mex.
- Salinger M. J. 2005. Climate variability and change: past, present and future – An overview. Chapter 1: 9-29. En: *Increasing Climate Variability and Change - Reducing the vulnerability of agriculture and forestry*. Reprinted from *Climatic Change Volume 70*, Nos. 1–2, Ed. Springer. Netherlands.
- Scafetta N. 2010. Climate Change and its causes. A discussion about some key issues. Science & Public Policy Institute (SPPI). Haymaekr Va. 56 pp.
- Schneider N. & Cornuelle B. D. 2005. The Forcing of the Pacific Decadal Oscillation. *American Meteorological Society*. 18: 4355-4373
- Schlenker W. 2010. Crop Responses to Climate and Weather: Cross-Section and Panel Models. Chapter 6: 99-108. En: D. Lobell and M. Burke (eds.), *Climate Change and Food Security*, *Advances in Global Change Research* 37.
- SEMARNAT, 2009a. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Edición 2008. Compendio de Estadísticas Ambientales. México. 380 p.
- SEMARNAT, 2009b. México Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Comité Intersecretarial sobre Cambio Climático. México, D.F. 227 p.
- Semenov M. A. 2002. LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies: User Manual Version 3.0. Rothamsted Research, Harpenden, Hertfordshire, AL5 2JQ, UK.
- Shaka A. K. 2008. Assessment of Climate Change Impacts on the Hydrology of Gilgel Abay Catchment in Lake Tana Basin, Ethiopia. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Neschede, The Netherlands. Thesis. 86 pp.
- Shindell D. T., Schmidt G. A., Miller R. L. and Mann M. E. 2003. Volcanic and solar forcing of climate change during the preindustrial era. *Journal of Climate*. *American Meteorological Society*. 16: 4094-4107

- Sivakumar M. V. K., Das H. P. and Brunini O. 2005. Impacts of Present and Future Climate Variability and Change on Agriculture and Forestry in the Arid and Semi-Arid Tropics. Chapter 2: 31-72. En: Sivakumar and Motha (ed.) Increasing climate variability and change. Reducing the Vulnerability of Agriculture and Forestry. Salinger, Reprinted from Climatic Change Volume 70, Nos. 1–2, 2005
- Staines, U. F. 2008. Cambio Climático: Interpretando el pasado para entender el presente. Ciencia Ergo Sum Noviembre – Febrero, Año/Vol 14, numero 003 Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Mexico. pp 345-351.
- Stöckle C. O., Donatelli M. and Nelson R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. European Journal of Agronomy 18: 289-307
- Stöckle C. O., Nelson, R., Donatelli, M. and Castellvi, F. 2001. ClimGen: a flexible weather generation program. In: Proceedings of the Second International Symposium on Modelling Cropping Systems, July 16–18, 2001, Florence, Italy, pp. 229–230.
- Stöckle C.O., G.S. Campbell, and R. Nelson. 1999. ClimGen manual. Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA.
- Stöckle C. O. & Nelson R 2003. Cropping system simulation model user's manual. Washing State University, Pullman, Washington, USA. p. 235.
- Swain D., Chandrabaskar B., Krishnan P., Rao K. S., Nayak S. K. and Dash R. N. 2006. Variation in yield, N uptake and N use efficiency of medium and late duration rice varieties. Journal of Agricultural Science 144(1): 69–83
- Tan G. & Shibasaki R. 2003. Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. Ecological Modelling, 168 (3): 357-370.
- Tebaldi C. & Knutti R. 2010. Climate Models and Their Projections of Future Changes. Chapter 3:31-56 En: D. Lobell and M. Burke (eds.), Climate Change and Food Security, Advances in Global Change Research 37
- TERI (The Energy and Resources Institute). 2009. Resource Book on Climate Change. Darbari Seth Block IHC Complex, Lodhi Road New Delhi – 110 003, India . 132 pp.
- The National Academies. 2010a. Assessment of Intraseasonal to Interannual Climate Prediction and Predictability. Committee on Assessment of Intraseasonal to Interannual Climate Prediction and Predictability - National Research Council. Washington DC. 193 pp.
- The National Academies 2010b. Climate Stabilization Targets: Emissions, Concentrations, and Impacts over Decades to Millennia. Committee on Stabilization Targets for Atmospheric Greenhouse Gas Concentrations - National Research Council. Washington D.C. 243 pp.

- The National Academies. 2009. Restructuring Federal Climate Research to Meet the Challenges of Climate Change. Committee on Strategic Advice on the U.S. Climate - Change Science Program - National Research Council. Washington DC. 267 pp.
- The National Academies. 2008a. Ecological Impacts of Climate Change. National Academy of Sciences – National Academy of Engineering - Institute of Medicine - National Research Council. Washington DC. 32 pp.
- The National Academies. 2008b. Understanding and responding to climate change. National Academy of Sciences - National Academy of Engineering - Institute of Medicine - National Research Council. Washington DC. 28 pp.
- The National Academies. 2006. Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years. Committee on Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years - National Research Council. Washington DC. 161 pp.
- The National Academies. 2001. Climate Change Science: An Analysis of Some Key Questions. Committee on the Science of Climate Change – National Research Council. Washington DC. 42 pp.
- The National Academies. 2000. Reconciling Observations of Global Temperature Change. Panel on Reconciling Temperature Observations - National Research Council. Washington D.C. 102 pp.
- Timbal B., Fernandez E. and Li Z. 2009. Generalization of a statistical downscaling model to provide local climate change projections for Australia. *Environmental Modelling & Software* 24: 341–358
- Tomer M. D. & Schilling K. E. 2009. A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology. *Journal of Hydrology* 376: 24–33
- Tomozeiu R., Cacciamani C., Pavan V., Morgillo A. and Busuioc A. 2007 Climate change scenarios for surface temperature in Emilia Romagna (Italy) obtained using statistical downscaling models. *Theoretical and Applied Climatology* 90: 25-47
- Trethowan R. M., Turner M. A. and Chattha T. M. 2010. Breeding Strategies to Adapt Crops to a Changing Climate. Chapter 9: 155-174. En: D. Lobell and M. Burke (eds.), *Climate Change and Food Security, Advances in Global Change Research* 37
- Tryhorna L. & DeGaetano A. 2010. A comparison of techniques for downscaling extreme precipitation over the Northeastern United States. *International Journal of Climatology*, 31:n/a. DOI: 10.1002/joc.2208

- Tu J. 2009. Combined impact of climate and land use changes on streamflow and water quality in eastern Massachusetts, USA. *Journal of Hydrology* 379: 268–283.
- UNFCCC, 2005. Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change. Final draft report. with the service of: Stratus Consulting Inc. 155 pp.
- UNFCCC. 2003. (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Secretaría sobre el Cambio Climático) Carpeta de información sobre el cambio Climático. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUMA), el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, el Instituto de las Naciones Unidas para Formación Profesional e Investigaciones, la Organización Meteorológica Mundial y la Organización Mundial de la Salud. 65 p.
- Velazquez L. A., Gonzalez J. E. and Winter A. 2006. Urban heat island effect analysis for San Juan, Puerto Rico. *Atmospheric Environment* 40: 1731–1741
- Viles H. A. & Goudie A. S. 2003. Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology. *Earth-Science Reviews* 61: 105–131.
- Weng H. 2005. The influence of the 11 year solar cycle on the interannual – centennial climate variability. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67: 793–805.
- White W. J. & Hoogenboom G. 2010. Crop Response to Climate: Ecophysiological Models. Chapter 4: 59-83 En: D. Lobell and M. Burke (eds.), *Climate Change and Food Security, Advances in Global Change Research* 37.
- Wilby, R. 2007. Decadal Climate Forecasting Techniques for adaptation and development planning. A briefing document on Available Methods, Contraints, Risks and Opportunities. Report for the UK Government's Department for International Development. 54 pp.
- Wilby, R. L. & Dawson, C. W. 2007. SDSM Version 4.2 – A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. User Manual. 94 pp.
- Wilby, L. R., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., Mearns, L. O. and Charles, S. P. 2004. Guidelines for use of Climate Scenario Developed from Statistical Downscaling Methods. Environmental Agency of England and Wales, UK. 27 pp.
- Wilby R.L., Dawson C. W., and Barrow E. M. 2002. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software* 17:147–159
- Williams, J.R., 1995. The EPIC Model. In: Singh, V.P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, USA, pp. 909–1000.

- Wreford A., Moran D. and Adger N. 2010. Climate Change and Agriculture. Impacts, adaptation and mitigation. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). 139 pp.
- Xiong Z. & Khalil M. A. K. 2009. Greenhouse Gases from Crop Fields. Chapter 6:113-132. En: Singh (ed.). Climate Change and Crops, Environmental Science and Engineering. S.N.
- Xu, C. Y. 1999. From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. *Progress in Physical Geography* 23(2): 229-249.
- Ye Z. & Hsieh W. W. 2006. The influence of climate regime shift on ENSO. *Climate Dynamics* 26: 823–833.
- Zhao Y., Wang C., Wang S., and Tibig L. V. 2005. Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the humid and sub-humid tropics. Chapter 3: 73-116. En: Increasing climate variability and change. Reducing the Vulnerability of Agriculture and Forestry. Salinger, Sivakumar and Motha (ed.) Reprinted from *Climatic Change* Volume 70, Nos. 1–2, 2005
- Ziervogel G., Cartwright A., Tas A., Adejuwon J., Zermoglio F., Shale M. and Smith B. 2008. Climate change and adaptation in African agriculture. Prepared for Rockefeller Foundation By Stockholm Environment Institute. 54 pp.
- Zwiers, F. W. & X. Zhang. 2003. Toward Regional –scale Climate Change Detection. *Journal of Climate* 16 (5): 793-797.

VII. ANEXOS

Anexo 1. Temperatura Máxima Actual y bajo escenario de Cambio Climático

Clave	Estacion Meteorológica	Municipio	Temperatura Máxima		Diferencia
			Actual	20's	
Durango					
10003	Canelas	Canelas	26,7	27,4	0,7
10004	Cañon de Fernandez	Cuencame	29,9	31,4	1,5
10005	Ceballos	Mapimí	30,6	32,3	1,7
10006	Cendradillas	Guanaceví	21,9	23,3	1,4
10008	Cinco de Mayo	Sn Pedro dl Gallo	27,9	28,8	0,9
10009	Ciudad Lerdo (smn)	Lerdo	28,8	30,1	1,3
10012	Cuencame	Cuencame	29,9	32	2,1
10014	Charco Verde	Durango	23,3	22,7	-0,6
10016	Chinacates	Stgo Papasquiario	26,1	25,8	-0,3
10018	El Cantil	Stgo Papasquiario	19,8	21,2	1,4
10021	El Palmito	Inde	28,4	30,4	2
10022	El Pino	Canatlan	24,5	25,8	1,3
10023	El Pueblito	Durango	25,1	26,3	1,2
10026	El Tarahumar	Tepehuanes	19,7	20,2	0,5
10027	Francisco I Madero smn	Panuco d Coronado	25,6	26,7	1,1
10029	Guanacevi smn	Guanaceví	22,8	24,5	1,7
10030	Guadalupe Victoria DGE	Guadalupe Victoria	25,4	27,2	1,8
10036	La Ciudad	Pueblo Nuevo	18,1	19	0,9
10047	Narciso Mendoza	Poanas	26,2	27,2	1
10049	Nazas	Nazas	30,4	31,6	1,2
10051	Otinapa	Durango	22,5	23,4	0,9
10054	Peña del aguila	Durango	25,2	26,7	1,5
10068	Sn Juan del Rio smn	Sn Juan del Rio	29	29,8	0,8
10074	Santa Clara	Santa Clara	27,4	28,9	1,5
10082	Tamazula	Tamazula	33,3	35,2	1,9
10084	Tepehuanes	Tepehuanes	28	29,2	1,2
10085	Tlahualilo	Tlahualilo	30,6	31,2	0,6
10086	Topia	Topia	23,2	24,7	1,5
10090	Canatlan	Canatlan	25,2	26	0,8
10098	Rodeo DGE	Rodeo	30,2	31,3	1,1
10100	Santiago Papasquiario	Stgo Papasquiario	28,2	28,7	0,5
			26,3	27,4	1,1
Sinaloa					
25015	Culiacan	Culiacan	31,9	33	1,1
25045	Ixpalino	San Ignacio, Sin	33,4	34,3	0,9
25078	Rosario	Rosario	32,9	33,4	0,5
25087	Sta Cruz de Ayala	Cosala, Sin	33,3	34,1	0,8
25092	Soyatita	Badiraguato	30,4	30,4	0
25097	Tecusiapa	Badiraguato	32,7	33,9	1,2
Zacatecas					
32012	Chalchihuites	Chalchihuites	24,9	25,8	0,9
32016	El Platanito	Valparaiso	33,2	34,9	1,7
32038	Nieves, Gral Fco Munguia	Fco Munguia Zac	24,6	26,1	1,5
Chihuahua					
8050	El Maguey	Valle de Zaragoza	24,2	24,8	0,6
8172	Guadalupe y Calvo	Guadalupe y Calvo	22,3	23,2	0,9
Nayarit					
18001	Acaponeta	Acaponeta	32,9	33,7	0,8
18028	Rosa Morada	Rosa Morada, Nay	33,2	34,1	0,9
Coahuila					
5022	Ocampo	Ocampo, Coahuila	27,4	28,6	1,2

Anexo 2. Temperatura Mínima Actual y bajo escenario de Cambio Climático

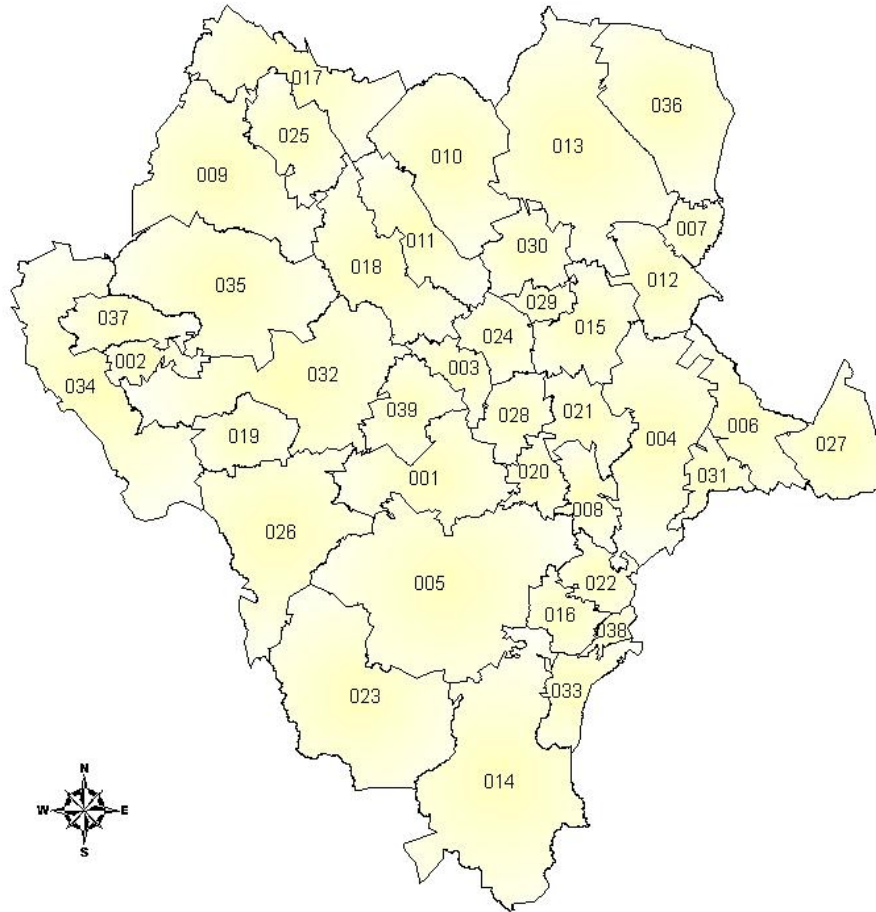
CLAVE	Estacion Meteorológica	Municipio	Temperatura Mínima		
			Actual	20's	
Durango					
10003	Canelas	Canelas	12,8	12,8	0
10004	Cañon de Fernandez	Cuencame	14,5	14,6	0,1
10005	Ceballos	Mapimí	10,6	11,1	0,5
10006	Cendradillas	Guanaceví	2,6	3,4	0,8
10008	Cinco de Mayo	Sn Pedro dl Gallo	9,1	9	-0,1
10009	Ciudad Lerdo (smn)	Lerdo	13,2	13,7	0,5
10012	Cuencame	Cuencame	12,7	12,8	0,1
10014	Charco Verde	Durango	3,7	3,9	0,2
10016	Chinacates	Stgo Papasquiario	7,3	7,8	0,5
10018	El Cantil	Stgo Papasquiario	10,7	11,3	0,6
10021	El Palmito	Inde	11,9	12,9	1
10022	El Pino	Canatlan	7,8	8	0,2
10023	El Pueblito	Durango	10,4	10,2	-0,2
10026	El Tarahumar	Tepehuanes	1,1	1,8	0,7
10027	Francisco I Madero smn	Panuco d Coronado	8,6	8,9	0,3
10029	Guanaceví smn	Guanaceví	7,1	7,5	0,4
10030	Guadalupe Victoria DGE	Guadalupe Victoria	7,6	8,3	0,7
10036	La Ciudad	Pueblo Nuevo	1,9	2,3	0,4
10047	Narciso Mendoza	Poanas	8	8,2	0,2
10049	Nazas	Nazas	11,1	11,3	0,2
10051	Otinapa	Durango	4,1	4,4	0,3
10054	Peña del aguila	Durango	8,6	8,9	0,3
10068	Sn Juan del Rio smn	Sn Juan del Rio	10,2	10,7	0,5
10074	Santa Clara	Santa Clara	8,1	8,8	0,7
10082	Tamazula	Tamazula	16,6	17	0,4
10084	Tepehuanes	Tepehuanes	7,5	7,5	0
10085	Tlahualilo	Tlahualilo	11,1	11,3	0,2
10086	Topia	Topia	12,1	12,7	0,6
10090	Canatlan	Canatlan	6,3	6,3	0
10098	Rodeo DGE	Rodeo	10	10,3	0,3
10100	Santiago Papasquiario	Stgo Papasquiario	7,7	7,9	0,2
			8,9	9,2	0,3
Sinaloa					
25015	Culiacan	Culiacan	17	18,2	1,2
25045	Ixpalino	San Ignacio, Sin	17,6	18,3	0,7
25078	Rosario	Rosario	18,7	19,1	0,4
25087	Sta Cruz de Ayala	Cosala, Sin	18,5	19,2	0,7
25092	Soyatita	Badiraguato	14,2	14,4	0,2
25097	Tecusiapa	Badiraguato	14,5	15,3	0,8
Zacatecas					
32012	Chalchihuites	Chalchihuites	8,9	9,2	0,3
32016	El Platanito	Valparaiso	15,1	15,7	0,6
32038	Nieves, Gral Fco Munguia	Fco Munguia Zac	12	12,1	0,1
Chihuahua					
8050	El Maguey	Valle de Zaragoza	9,7	10,6	0,9
8172	Guadalupe y Calvo	Guadalupe y Calvo	3,9	4,4	0,5
Nayarit					
18001	Acaponeta	Acaponeta	17,8	18,9	1,1
18028	Rosa Morada	Rosa Morada, Nay	18,2	18,9	0,7
Coahuila					
5022	Ocampo	Ocampo, Coahuila	11,1	11,6	0,5

Anexo 3. Precipitación Actual y bajo escenario de Cambio Climático

Clave	Estacion Meteorológica	Municipio	Precipitación		Diferencia
			Actual	20's	
Durango					
10003	Canelas	Canelas	1344	1692,8	348,8
10004	Cañon de Fernandez	Cuencame	310,3	129,9	-180,4
10005	Ceballos	Mapimí	293,4	466,3	172,9
10006	Cendradillas	Guanaceví	649	917,5	268,5
10008	Cinco de Mayo	Sn Pedro dl Gallo	325,2	604,7	279,5
10009	Ciudad Lerdo (smn)	Lerdo	264,4	828,2	563,8
10012	Cuencame	Cuencame	396,9	610,6	213,7
10014	Charco Verde	Durango	821,4	964,1	142,7
10016	Chinacates	Stgo Papasquiario	473,3	534,6	61,3
10018	El Cantil	Stgo Papasquiario	1487,9	1836,5	348,6
10021	El Palmito	Inde	402,8	627,4	224,6
10022	El Pino	Canatlan	576,4	939,7	363,3
10023	El Pueblito	Durango	551,4	776,8	225,4
10026	El Tarahumar	Tepehuanes	914,7	591,2	-323,5
10027	Francisco I Madero smn	Panuco d Coronado	564,5	783	218,5
10029	Guanacevi smn	Guanaceví	598,7	868,7	270
10030	Guadalupe Victoria DGE	Guadalupe Victoria	498	745,6	247,6
10036	La Ciudad	Pueblo Nuevo	1536,9	1677	140,1
10047	Narciso Mendoza	Poanas	503	784,4	281,4
10049	Nazas	Nazas	374	548,3	174,3
10051	Otinapa	Durango	671,5	950,4	278,9
10054	Peña del aguila	Durango	530,2	737,1	206,9
10068	Sn Juan del Rio smn	Sn Juan del Rio	529,2	825,8	296,6
10074	Santa Clara	Santa Clara	449,1	684,2	235,1
10082	Tamazula	Tamazula	1048	1454,6	406,6
10084	Tepehuanes	Tepehuanes	479,7	697,5	217,8
10085	Tlahualilo	Tlahualilo	265,8	354	88,2
10086	Topia	Topia	1227,6	1005	-222,6
10090	Canatlan	Canatlan	550,1	778,5	228,4
10098	Rodeo DGE	Rodeo	417,3	603,7	186,4
10100	Santiago Papasquiario	Stgo Papasquiario	473,2	667,6	194,4
Sinaloa					
25015	Culiacan	Culiacan	631,8	684,2	52,4
25045	Ixpalino	San Ignacio, Sin	789,9	994,8	204,9
25078	Rosario	Rosario	883,8	1335,7	451,9
25087	Sta Cruz de Ayala	Cosala, Sin	765,1	1023,7	258,6
25092	Soyatita	Badiraguato	831,7	620,4	-211,3
25097	Tecusiapa	Badiraguato	1041,8	490,7	-551,1
Zacatecas					
32012	Chalchihuites	Chalchihuites	513	774,3	261,3
32016	El Platanito	Valparaiso	601,3	929,1	327,8
32038	Nieves, Gral Fco Munguia	Fco Munguia Zac	369,3	509,7	140,4
Chihuahua					
8050	El Maguey	Valle de Zaragoza	414,7	634,4	219,7
8172	Guadalupe y Calvo	Guadalupe y Calvo	1203,9	860,4	-343,5
Nayarit					
18001	Acaponeta	Acaponeta	1350	1753,2	403,2
18028	Rosa Morada	Rosa Morada, Nay	1358,3	1808,9	450,6
Coahuila					
5022	Ocampo	Ocampo, Coahuila	296,5	446,9	150,4

Anexo 4. Rendimientos de Maiz de Temporal en condiciones actuales y bajo escenario de Cambio Climático

CLAVE	Estacion Meteorológica	Municipio	Rendimiento de Maiz		Diferencia
			Actual	30 años	
Durango					
10003	Canelas	Canelas	0,9	6	5,10
10004	Cañon de Fernandez	Cuencame	1,16	0,1	-1,06
10005	Ceballos	Mapimí	0,7	1,2	0,50
10006	Cendradillas	Guanaceví	0,46	5,1	4,64
10008	Cinco de Mayo	Sn Pedro dl Gallo	1,3	2,8	1,50
10009	Ciudad Lerdo (smn)	Lerdo	1	3,3	2,30
10012	Cuencame	Cuencame	1,16	2	0,84
10014	Charco Verde	Durango	0,81	3,7	2,89
10016	Chinacates	Stgo Papasquiario	0,88	3,9	3,02
10018	El Cantil	Stgo Papasquiario	0,88	5	4,12
10021	El Palmito	Inde	1	2,5	1,50
10022	El Pino	Canatlan	0,69	5,5	4,81
10023	El Pueblito	Durango	0,81	5	4,19
10026	El Tarahumar	Tepehuanes	0,89	2	1,11
10027	Francisco I Madero smn	Panuco d Coronado	1,18	5	3,82
10029	Guanacevi smn	Guanaceví	0,46	5,4	4,94
10030	Guadalupe Victoria DGE	Guadalupe Victoria	1,32	4,1	2,78
10036	La Ciudad	Pueblo Nuevo	0,87	2,5	1,63
10047	Narciso Mendoza	Poanas	1,01	4,9	3,89
10049	Nazas	Nazas	1,3	1,8	0,50
10051	Otinapa	Durango	0,81	4,9	4,09
10054	Peña del aguila	Durango	0,81	4,8	3,99
10068	Sn Juan del Rio smn	Sn Juan del Rio	0,94	3,6	2,66
10074	Santa Clara	Santa Clara	0,96	3,2	2,24
10082	Tamazula	Tamazula	0,84	2,8	1,96
10084	Tepehuanes	Tepehuanes	0,89	3,2	2,31
10085	Tlahualilo	Tlahualilo	0,7	0,6	-0,10
10086	Topia	Topia	0,87	5,9	5,03
10090	Canatlan	Canatlan	0,69	4,8	4,11
10098	Rodeo DGE	Rodeo	1,3	2	0,70
10100	Santiago Papasquiario	Stgo Papasquiario	0,88	3,6	2,72
Sinaloa					
25015	Culiacan	Culiacan	0,71	2,2	1,49
25045	Ixpalino	San Ignacio, Sin	0,69	3,2	2,51
25078	Rosario	Rosario	1,19	3,6	2,41
25087	Sta Cruz de Ayala	Cosala, Sin	0,7	3,2	2,50
25092	Soyatita	Badiraguato	0,56	1,9	1,34
25097	Tecusiapa	Badiraguato	0,56	0,6	0,04
Zacatecas					
32012	Chalchihuites	Chalchihuites	1,62	5	3,38
32016	El Platanito	Valparaiso	1,05	2,7	1,65
32038	Nieves, Gral Fco Munguia	Fco Munguia Zac	1,51	2,6	1,09
Chihuahua					
8050	El Maguey	Valle de Zaragoza	2,17	4,2	2,03
8172	Guadalupe y Calvo	Guadalupe y Calvo	0,84	4,5	3,66
Nayarit					
18001	Acaponeta	Acaponeta	1,97	3,3	1,33
18028	Rosa Morada	Rosa Morada, Nay	2,5	3,2	0,70
Coahuila					
5022	Ocampo	Ocampo, Coahuila	0,75	0,9	0,15



001	Canatlán	021	Peñón Blanco
002	Canelas	022	Poanas
003	Coneto de Comonfort	023	Pueblo Nuevo
004	Cuencame	024	Rodeo
005	Durango	025	San Bernardo
006	General Simón Bolívar	026	San Dimas
007	Gómez Palacio	027	San Juan de Guadalupe
008	Guadalupe Victoria	028	San Juan del Río
009	Guanaceví	029	San Luis del Cordero
010	Hidalgo	030	San Pedro del Gallo
011	Inde	031	Santa Clara
012	Lerdo	032	Santiago Papasquiaro
013	Mapimí	033	Súchil
014	Mezquital	034	Tamazula
015	Nazas	035	Teprehuanes
016	Nombre de Dios	036	Tlahualilo
017	Ocampo	037	Topia
018	El Oro	038	Vicente Guerrero
019	Otáez	039	Nuevo Ideal
020	Pánuco de Coronado		

Figura 33. Municipios del estado de Durango