

01060  
6



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

Facultad de Filosofía y Letras  
Departamento de Geografía  
División de Estudios de Posgrado

CAMBIO CLIMATICO REGIONAL EN  
TLAXCALA

T E S I S

Que para Obtener el Grado de:  
Maestro en Geografía  
Presenta:

BIOL. SATURNINO OROZCO FLORES

149377

Director:  
Dr. Tomás Morales Acoltzi  
Codirector:  
Dr. Víctor O. Magaña Rueda

FAC. DE FLOTT

México, D. F. Abril del 2000

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# *Dedicatorias*

---

Dedico esta tesis con todo cariño, amor y respeto a mi esposa: *Mony's* y, a mis hijos *Lupita* y *Alvarito* quienes son, toda mi fuerza y razón de ser:

A mis padres Agus y Nachito quienes me brindaron la vida y todo su cariño.

A mi hermano Luis y su esposa Doris, quienes en los momentos más difíciles de mi estancia en la ciudad de México me apoyaron incondicionalmente.

Al tío Cheto y la tía Jovita, quienes me han guiado y siguen creyendo en mí y, nunca han dejado de brindarme su apoyo y cariño.

A mis hermanos y esposas: Javier y Viky, Salvador y Reyna, Julio y Paty, Chavita, Juanita, Ade y Marthita, quienes siempre me han alentado y apoyado en la continuación de mis estudios.

A Emy y Emmanuel, por su invaluable apoyo y cariño, que nos han brindado en el ámbito familiar.

A mis sobrinos quienes ven en mí un ejemplo a seguir.

A mis grandes amigas: Cecy y Rosita, quienes han compartido conmigo alegrías y detalles familiares.

A mis compañeros de trabajo con quienes comparto la mayor parte de mi tiempo

*A Dios por permitirme llegar a  
estos momentos*

# *Agradecimientos*

---

Agradezco al Dr. Tomás Morales Acoltzi por su asesoría y dirección de tesis, por su continua motivación, en mi superación personal.

Al Dr. Víctor O. Magaña Rueda codirector del trabajo de investigación, por su marco de rigor, crítica, tesón e interés para realizar bien las cosas y, por las ideas aportadas que sirvieron de base para el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Carlos Gay García, por su minuciosa revisión y atinadas sugerencias en relación al cambio climático.

Al Físico José Luis Pérez López, por su apoyo en la iniciación de mi preparación en el área de computación especializada.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera por permitirme el uso de su equipo de cómputo e instalaciones.

## AL JURADO REVISOR:

Dr. Mauricio R. Aceves García

Dra. Martha Cervantes Ramírez

Dr. Juan Carlos Gómez Rojas

Dr. Víctor O. Magaña Rueda

Dr. Tomás Morales Acoltzi

Por sus atinados comentarios, observaciones y sugerencias para enriquecer este trabajo.

A todos mis maestros por los conocimientos adquiridos en la trayectoria académica y preparación profesional dentro de la maestría.

A la Universidad Autónoma de Tlaxcala por su apoyo y motivación en los programas de superación académica, y por brindarme la oportunidad de formar parte de su personal, así mismo, al Centro de Investigaciones en Ciencias Biológicas (CICB), por su apoyo en mi formación profesional.

A todos mis compañeros de trabajo, quienes han influido en mi preparación profesional.

Un agradecimiento especial a mi amigo El M.V.Z. Rolando Romero López por su apoyo incondicional dentro de mi formación.

Al Dr. Luis A. Angulo Montejo exdirector del Centro de Investigaciones en Ciencias Biológicas (CICB) de la Universidad Autónoma de Tlaxcala por su motivación y apoyo en el inicio de mis estudios de maestría.

Al Dr. Baruch Nolasco y Saldaña director del Centro de Investigaciones en Ciencias Biológicas (CICB) de la Universidad Autónoma de Tlaxcala por su apoyo en la continuación de mis estudios profesionales.

A la Comisión Nacional del Agua del Estado de Tlaxcala (CNA), por brindarnos el acceso al banco de datos climatológicos del Estado, y muy en especial, al Sr. Jesús Coyotzi por su amistad y confianza en la proporción de los datos climatológicos.

A la Fundación PRODUCE de Tlaxcala por apoyar el proyecto del cual se fundamentó este trabajo de investigación.

A SIZA CONACyT, Inter-American Institute for Global Change Research (IAI), por su apoyo logístico para la realización de este trabajo.

# Contenido

---

<i>Dedicatorias</i>	<i>i</i>
<i>Agradecimientos</i>	<i>ii</i>
<i>Contenido</i>	<i>iii</i>
<i>Lista de figuras y tablas</i>	<i>iv</i>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
Simulación del cambio climático regional	4
Simulaciones climáticas con modelos de circulación general (GCM's)	4
Resumen	9
<b>Marco teórico conceptual</b>	<b>11</b>
Sobre los cambios del clima	11
<i>a) Variabilidad Interanual</i>	14
<i>b) Teleconexiones</i>	15
<i>c) Variabilidad Interdecadal</i>	15
Conceptualización	18
<b>Objetivos e hipótesis</b>	<b>21</b>
Objetivo general	21
Objetivos particulares	21
Hipótesis de trabajo	21
<b>Capítulo 1 Modelos climáticos</b>	<b>23</b>
1.1 Modelos de Circulación General (GCM's)	23
1) <i>Recursos de cómputo</i>	23
2) <i>Procesos físicos de escala sub-malla</i>	23
1.2 Técnicas de escalamiento de las salidas de los GCM's	24
1.3 Técnicas empíricas	24
1) <i>El uso de datos instrumentales recientes</i>	24

2) <i>El uso de análogos paleoclimáticos</i>	25
1.2.2 Técnicas semi-empíricas	25
1) <i>Uso de anomalías climáticas de un GCM</i>	25
2) <i>Perfect-Prog (Pronóstico-Perfecto)</i>	26
3) <i>Model Output Statistics (MOS)</i>	26
1.2.3 Técnicas de modelación dinámica del clima regional	27
Capítulo 2 Datos	28
2.2 Datos y métodos de análisis	28
2.2.1 Datos	28
2.2.2 Sobre los datos	28
<i>Observaciones</i>	28
2.2.3 Prueba de homogeneidad de datos	30
<i>Salidas de experimentos 2xCO<sub>2</sub> -1xCO<sub>2</sub> en GCM</i>	32
<i>Modelo NCAR</i>	32
2.2.4. Metodología	33
i) <i>Patrones de correlación</i>	34
ii) <i>Modelo de regresión lineal multivariado</i>	35
2.2.5 Escenarios de cambio climático en Tlaxcala	38
<i>Los campos de precipitación y temperatura</i>	38
2.2.6 Los experimentos 2xCO <sub>2</sub> -1xCO <sub>2</sub>	44
<i>Los Cambios en la temperatura superficial</i>	44
Capítulo 3	52
3.1 Modelo estadístico regional de precipitación	52
1) <i>Correlaciones de precipitación con variables de gran escala</i>	52
2) <i>Ecuaciones de regresión multilineal por región</i>	58
<i>Ecuaciones de precipitación de invierno</i>	59
<i>Ecuaciones de precipitación de verano</i>	59
<i>Ecuaciones de temperatura de invierno</i>	60
<i>Ecuaciones de temperatura de verano</i>	60
3) <i>Validación del modelo estadístico regional</i>	63
Capítulo 4	64
4.1 Medidas ante la variabilidad y el cambio climático en el Estado de Tlaxcala	64
4.2 Variabilidad Climática	64

4.3 Sobre los pronósticos	65
4.4 Realización del pronóstico	66
4.5 Entrevista a productores	71
<i>Sucesos de 1998</i>	73
<i>Sucesos de 1999</i>	76
4.6 Fechas de eventos especiales	78
<i>Reporte de Agroasemex para 1999</i>	80
<i>Conclusión del reporte de Agroasemex Tlaxcala para 1999</i>	81
4.7 Medidas de adaptación conociendo el pronóstico	82
4.8 Indicativos físicos y biológicos para la presencia de eventos climáticos	85
4.9 Factores que pueden contribuir a un incremento de temperatura en el Estado	87
4.10 Señales de anomalías climáticas: ¿cambio climático?	89
4.11 Alternativas de nuevos cultivos introducidos al Estado	90
4.12 Señales de cambio climático en el Estado	92
Resultados y conclusiones	95
Escenarios de cambio climático regional	95
Escenarios de anomalías de precipitación	95
Discusión	108
Sugerencias	110
Referencias	111

# *Lista de Figuras y Tablas*

---

1	Promedio global de radiación y balance de calor del sistema atmósfera-oceano-continente, relativo a 100 unidades de entrada de radiación solar	13
2	Patrón característico de Anomalías observadas de temperatura de superficie del océano Pacífico durante un año de El Niño	15
3	Histograma de anomalías de temperatura superficial del océano sobre el Pacífico ecuatorial del Este (Tomada de Kiladis & Diaz 1989)	17
2.1	Red de estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua	29
Tab. 1	Prueba de homogeneidad de datos	30-31
Tab. 2	Puntos de mayor correlación de precipitación de invierno con vorticidad	36-37
Tab. 3	Puntos de mayor correlación de temperatura media ambiente de verano con S.S.T.	37
Tab. 4	Puntos de mayor correlación de precipitación de verano con S.S.T.	37
Tab. 5	Puntos de mayor isocorrelación de temperatura media ambiente de invierno con S.S.T.	37-38
2.2	Patrones climatológicos de temperatura (°C) para México y el Estado de Tlaxcala, invierno (DEF)	40
2.3	Patrones climatológicos de temperatura (°C) para México y el Estado de Tlaxcala, verano (JJA)	41
2.4	Patrones climatológicos de precipitación acumulada (mm) para México y el Estado de Tlaxcala, invierno (DEF)	42
2.5	Patrones climatológicos de precipitación acumulada (mm) para México y el Estado de Tlaxcala, verano (JJA)	43
2.6	Escenarios de anomalías de temperatura de superficie (°C) obtenidos de los experimentos $2\times CO_2 - 1\times CO_2$ , para el invierno (DJF), dados por el GCM	

	NCAR	46
2.7	Escenarios de anomalías de temperatura de superficie (°C) obtenidos de los experimentos $2\times CO_2 - 1\times CO_2$ , para el verano (JJA), dados por el GCM NCAR	47
2.8	Escenarios de anomalías de precipitación (mm) obtenidos de los experimentos $2\times CO_2 - 1\times CO_2$ , para el invierno (DEF), dados por el GCM NCAR	48
2.9	Escenarios de anomalías de precipitación (mm) obtenidos de los experimentos $2\times CO_2 - 1\times CO_2$ , para el verano (JJA), dados por el GCM NCAR	49
3.1	Patrones de correlación ( $\times 10$ ) entre precipitación de invierno y las variables de gran escala. Estación 05 Tlaxco	54
3.2	Patrones de correlación ( $\times 10$ ) entre precipitación de verano y las variables de gran escala. Estación 04 Tlaxcala capital	55
3.3	Patrones de correlación ( $\times 10$ ) entre temperatura de invierno y las variables de gran escala. Estación 03 Huamantla	56
3.4	Patrones de correlación ( $\times 10$ ) entre temperatura de verano y las variables de gran escala. Estación 08 Ixtacuixtla	57
3.5	Ubicación de las variables de gran escala significativamente correlacionadas para las 12 estaciones climatológicas del Estado de Tlaxcala para precipitación de invierno y verano	61
3.6	Ubicación de las variables de gran escala significativamente correlacionadas para las 12 estaciones climatológicas del Estado de Tlaxcala para temperatura de invierno y verano	62
4.1	Impacto de EL NIÑO de 1982-1983 sobre las lluvias del Estado de Tlaxcala	64
4.2	Probabilidad de heladas para la estación de Apizaco en años de EL NIÑO y LA NIÑA	65
4.3	Pronóstico de anomalías de temperatura de la superficie del océano 1998/1999	69

4.4	Pronóstico de anomalías de temperatura de la superficie del océano período 1999	70
4.5	Pronóstico y evaluación del pronóstico de precipitación para 1998 (Apizaco)	70
4.6	Pronóstico y evaluación del pronóstico de precipitación para 1999 (Apizaco)	71
3	Climatología de precipitación de verano durante años de NIÑO-NIÑA	98
4	Climatología de precipitación de verano durante años de NIÑO (1) NIÑA (2)	98
5	Climatología de precipitación de invierno durante años de NIÑO y-NIÑA	99
6	Climatología de precipitación de inv. durante años de NIÑO (1) y NIÑA (2)	99
3.1.1	Patrones de precipitación acumulada de invierno (mm) observada y obtenida del modelo estadístico evaluado con observaciones de gran escala, del GCM NCAR	101
3.1.2	Patrones de precipitación acumulada de verano (mm) observada y obtenida del modelo estadístico evaluado con observaciones de gran escala, del GCM NCAR	102
3.1.3	Patrones de temperatura de invierno observada y obtenida del modelo estadístico evaluado con observaciones de gran escala, del GCM NCAR	103
3.1.4	Patrones de temperatura de verano observada y obtenida del modelo estadístico evaluado con observaciones de gran escala, del GCM NCAR	104
3.1.5	Anomalías de temperatura media anual	106

# *Introducción*

---

Uno de los grandes problemas que está enfrentando la humanidad es sin duda alguna el cambio climático que se ha estado presentando en las tres últimas décadas, sin embargo, el tratamiento de este gran problema, ha pasado de una forma estrictamente científica a otra con gran contenido político.

Desde 1988 la temática del cambio climático a entrado en un claro auge en los diferentes foros y reuniones internacionales que se han llevado a cabo, tanto en Europa, como en América.

La Organización de las Naciones Unidas designó desde 1988 un grupo de trabajo conocido como: "Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático", cuyos objetivos básicos son realizar un balance crítico sobre el estado actual del clima, así como los daños ambientales y económicos asociados a eventos extremos en el sistema climático y sus posibles medidas de acción.

El cambio climático global es un estado del sistema climático que el hombre ha provocado desde principios de la era industrial, a partir de la Revolución Industrial, en la atmósfera se ha incrementado la emisión de gases que producen el efecto de invernadero, principalmente a consecuencia del uso y transformación de la energía por combustibles fósiles. Se estima que esto ha originado un incremento en la temperatura media global de la tierra, de acuerdo a la correlación entre una mayor presencia de gases de invernadero y el incremento de la temperatura media global, que obedece a una ley física: a mayor cantidad de gases de invernadero, mayor atrapamiento de energía, lo que a su vez origina mayor calentamiento.

A partir de esta época en la que el hombre empezó a influir en el medio ambiente, por el uso de combustibles fósiles, la deforestación, ciertas técnicas agrícolas, el incremento en la producción industrial, el uso ineficiente de diversas fuentes de energía, el uso de transportes consumidores de combustibles (terrestres y aéreos), la industria termoeléctrica, las actividades agrícolas, la extensión de zonas ganaderas, la continua extinción de bosques y selvas, la explosión demográfica etc., podrían ser la causa del incremento de gases de invernadero, como el bióxido de carbono, metano, óxido nitroso y los clorofluorocarbonos (CFC), con sus diferentes períodos de renovación, estos gases han aumentado su proporción en la atmósfera en los últimos 50 años.

Actualmente los países industrializados son responsables de más del 50% de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, Estados Unidos de Norteamérica y la Comunidad Económica Europea producen el 49% de bióxido de carbono mundial, y los países del tercer mundo son responsables de la deforestación (por quema de bosques), ya que se liberan 1398 millones de toneladas anuales de bióxido de carbono a la atmósfera (Macera, 1991).

En lo que respecta a México, aunque su contribución no es grande, está clasificado entre los 20 países que emiten más gases de invernadero en el mundo (Macera, 1991).

En los últimos 100 años se han despejado más terrenos para cultivos agrícolas que en toda la historia de la humanidad (Bruce, 1990). Cada año se destruyen en todo el mundo de 11 mil a 13,860 millones de hectáreas de bosques tropicales para dedicarlas a la agricultura (FAO, 1991), tal deforestación causa efectos nocivos en la atmósfera, reduciendo la cantidad de oxígeno y contribuyendo a la emisión de CO<sub>2</sub> al ambiente; también aumenta la generación de metano CH<sub>4</sub>, procedente del suelo y de las actividades agrícolas.

De los 6,000 millones de hectáreas de bosques que originalmente existían en la tierra, solo quedan aproximadamente 4,000 millones (Bruce, 1990). Según expertos entre el 10 y el 20% del problema del calentamiento global proviene de la destrucción de estas zonas.

*“LA EVIDENCIA APUNTA HACIA UNA INFLUENCIA HUMANA  
DETECTABLE EN EL CLIMA”*

(Conclusión del Grupo I de Trabajo del PICC en la Reunión celebrada en Madrid, España del 27 al 29 de noviembre de 1995, [Climate Change 1995]).

Con estas evidencias, y por el aumento de la emisión de los gases de invernadero a niveles sin precedentes, parece muy probable un cierto calentamiento en el planeta, y tales cambios afectaran al crecimiento de la producción agrícola, pecuaria y forestal. Por otra parte, los efectos potenciales de carácter nacional y mundial pueden ser muy graves, sobre todo en algunos países donde el progreso socioeconómico global depende en gran medida del rendimiento de la agricultura (FAO, 1990).

# *Simulación del cambio climático regional*

---

## Simulaciones climáticas con Modelos de Circulación General (GCM's)

Los modelos matemáticos son en la actualidad, una de las herramientas de gran apoyo dentro de la investigación, a todos los niveles y utilizadas en la mayoría de las disciplinas, ya que su principal función, consiste en agilizar las investigaciones y a la vez el economizar recursos, es muy común estar realizando experimentos, y en ocasiones se dificulta el poder repetirlos, ya que es muy costoso, o se requiere de la espera de una nueva temporada, período ciclo o evento para poder realizarlo y de esta manera conocer sus efectos o evoluciones del sistema.

Estos modelos, son el resultado de ecuaciones matemáticas que tratan de simular la naturaleza lo más exacto posible, y su fin primordial es el de poder hacer predicción. Existen diferentes modelos, que tratan de generar escenarios futuros que se pueden presentar en el planeta si se llegara a modificar considerablemente el entorno del mismo, debido a un cambio climático o por un evento físico natural que generará una variabilidad climática con consecuencias graves para la humanidad, algunos de los modelos de circulación general son: CCC de Canadá, GFDL, GISS, y NCAR de Estados Unidos, MRI de Japón, MTC de México etc. Todos con la misma finalidad de estudiar, simular y predecir que sucederá en escenarios a futuro con nuestro entorno.

Con el objeto de entender los cambios del sistema climático, se han desarrollado modelos numéricos que simulan los diferentes procesos e interacciones entre los componentes del sistema climático. Los modelos que incluyen la mayoría de los procesos anteriores se conocen como Modelos de Circulación General (GCM's, por sus siglas en inglés) y comenzaron a ser desarrollados en los años setentas para predicción meteorológica. Estos modelos simulan en buena medida los procesos atmosféricos de gran escala (> 1000 km.). Los procesos físicos de escalas menores son parametrizados es decir, son representados en términos de variables de gran escala mediante formulaciones "físico-empíricas". Generalmente, en las investigaciones de cambio climático estos modelos atmosféricos se han acoplado a modelos del océano, ya que el océano actúa como un gran termorregulador a nivel planetario.

Los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCM's) son hasta el momento las herramientas principales con que se cuenta para estudiar el clima del futuro. Generalmente, los GCM's incluyen forzamientos tales como: la temperatura de la superficie del mar, la cubierta de hielo y nieve o la abundancia de gases de invernadero. Una descripción adecuada del cambio climático requiere que los modelos representen los procesos de retroalimentación entre la atmósfera, el océano, la criósfera y la biosfera. Por esta razón se han desarrollado modelos acoplados (atmósfera-océano-cubierta de hielo-nieve, biosfera).

Aunque los GCM's representan razonablemente bien las principales características de la circulación general de escala planetaria, no simulan adecuadamente los detalles de escala regional, debido a las deficiencias en la representación de algunos procesos físicos de mesoescala (por ejemplo, nubes convectivas o capa límite), sin embargo, el mayor problema de los GCM's al ser utilizados en estudios regionales está relacionado a la baja resolución horizontal en los esquemas numéricos de discretización que se utilizan para resolver las ecuaciones. Hasta hace pocos años, los mejores GCM's tenían resoluciones espaciales de sólo 2.5° a 5° (con un promedio de 270 km. de distancia a 340 km. aproximadamente). En nuestros días, las mejores discretizaciones horizontales son de aproximadamente 1° × 1° (110 km. × 110 km. de distancia) aún insuficientes para resolver procesos regionales. Bajo estas condiciones, forzamientos de gran escala en la circulación general pueden ser captados pero se pierden los efectos debidos a forzamientos locales que en ocasiones influyen fuertemente en el clima regional. Estos forzamientos locales son esencialmente inducidos por topografía compleja, línea de costa, presencia de cuerpos de agua y vegetación, que varían en escalas de 10 a 100 km.

La limitación de los GCM's para captar forzamientos locales tiene un doble efecto. Por un lado, no reproduce en forma realista los detalles climáticos de alta resolución y por el otro, puede contribuir a imprecisiones en las simulaciones dentro de la misma escala de la malla del GCM's. Por ejemplo, el Estado de Tlaxcala, con su orografía compleja, tiene una montaña (La Malintzi), parte de la Sierra Madre Oriental, no está representado por la resolución de los GCM's, haciendo que no se capte su efecto modificador en la precipitación y temperatura, Tlaxcala, aunque es un Estado pequeño cuenta con cuerpos

de agua (laguna de Acuitlapilco, la laguna de Atlangatepec, etc.) que son aún más pequeñas que otros cuerpos o macizos montañosos que influyen directamente en los cambios o variaciones climáticas pero que no son detectados por estos modelos de circulación general.

De los múltiples estudios que se han realizado, para conocer los escenarios de cambio climático o variabilidad climática a nivel mundial, la mayoría son para regiones muy extensas, incluso de escalas planetarias o continentales y muy pocos trabajos se han realizado para escalas regionales, se han hecho estudios de país en diferentes partes del mundo, para la República Mexicana, se realizó un estudio, de "Escenarios básicos y regionales" Estudio de País México, en el cual se presentan los promedios de 30 años de temperatura, precipitación y radiación solar (1940-1970) para 23 puntos de la República Mexicana y los cambios (anomalías) por simulaciones de duplicación de bióxido de carbono de 2 modelos de Circulación General: GFDL R30 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), CCCM (Modelo Canadiense). Para los valores normales aportaron los datos climáticos CLIM y los de los 23 puntos empleados por el Modelo Termodinámico del Clima (MTC), desarrollado en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México, en este estudio, consideran que con esta información es posible iniciar la construcción de los escenarios básicos y regionales de la República Mexicana ya que a los datos del CLIM o del MTC, les sumaron las anomalías de temperatura de los modelos, o bien los multiplicaron por la anomalía de la precipitación (Conde, et al. 1998).

Otro trabajo similar: "Vulnerabilidad de la agricultura en México ante el cambio climático", el objetivo principal, fue realizar un análisis de los impactos que un posible cambio climático tendría en la agricultura en México. El estudio bajo esas condiciones se centró en el cultivo de maíz de temporal, ciclo primavera - verano.

También se estudiaron las posibles medidas adaptativas y su viabilidad mediante un análisis de costo beneficio y una evaluación de las posibles bajas en la producción al disminuir las áreas aptas para este cultivo.

Se determinó la vulnerabilidad al cambio climático, calculando los cambios en las áreas aptas, medianamente aptas y no aptas para el cultivo de maíz, obteniéndose los siguientes resultados: las zonas no aptas se incrementarían en un 10% si los cambios en temperatura y precipitación fueran +2°C y +20% en cambios de precipitación respectivamente. Las regiones más afectadas serían el centro y el norte de México. En el caso que las variaciones fueran de +2°C y de -20% de precipitación, las zonas no aptas aumentarían en un 20% con respecto a las actuales. En el primer escenario, las no aptas crecerían a costa de las medianamente aptas. En el segundo caso, crecerían debido al decremento de las medianamente aptas y de las aptas y así, las zonas medianamente aptas fueron las más variables. (Conde, et al. 1998).

Existen muchos trabajos que se han realizado en la generación de escenarios climáticos en otras regiones del mundo, y las evidencias son similares en todos los casos. Con los resultados obtenidos en dichos estudios, aún no pueden ser evidencia de un posible cambio climático regional, ya que estos engloban zonas muy amplias, extrapolando lo que sucede a nivel general, a zonas que geográficamente son más pequeñas y esto hace suponer que toda la zona es afectada por dicho evento, por esto es necesario realizar estudios a menor escala, específicamente regional con énfasis en cambio climático y conocer más a fondo como influyen o no la orografía de una zona, ya que los cambios detectados en las temperaturas en superficie no son uniformes, ni espacial ni temporalmente, ya que existen ciertos retardos entre los cambios de temperatura de una región a otra. La presencia o cercanía de cuerpos de agua (lagos, lagunas, mares y océanos) parece influir. El calentamiento global en el último siglo ha sido analizado utilizando tres fuentes de datos independientes: la temperatura del aire sobre el continente, la temperatura del aire sobre el océano y la temperatura de la superficie del océano.

Usando GCM's acoplados, se han realizado simulaciones de la respuesta del sistema climático ante una duplicación del bióxido de carbono

Básicamente, los experimentos consisten en simular el clima por un período suficientemente largo, bajo las condiciones actuales (experimento de control) y en

comparar estas condiciones con las que el modelo simula si se incluye un aumento en el CO<sub>2</sub> (experimento con anomalía). De la comparación entre el control y la anomalía se obtienen conclusiones sobre el impacto que el aumento en CO<sub>2</sub> provoca. Los resultados varían ligeramente dependiendo del modelo empleado, pero en general:

- Todos los modelos pronostican un incremento significativo en la media global de la temperatura en superficie debido a la duplicación del CO<sub>2</sub>. El incremento pronosticado será entre 1.9° y 5.2 °C.
- En todos los modelos el calentamiento en los trópicos se queda por debajo de la media global y varía poco entre estaciones, con valores típicos de 2 a 3°C.
- Se observa a lo largo del año una intensificación de la precipitación sobre las altas latitudes y los trópicos y también sobre las latitudes medias durante el invierno. Sin embargo, existen notables diferencias en los cambios de la precipitación a escalas subcontinentales, especialmente en los trópicos.
- El incremento de la evaporación puede llegar a superar al de precipitación en aquellas regiones donde esta última se intensifica, por lo cual se prevé el desecamiento de la superficie terrestre a gran escala en las latitudes medias del hemisferio norte durante el invierno.
- En el caso del hielo oceánico, tanto su espesor como su extensión se reducirán significativamente de producirse un aumento en la concentración de CO<sub>2</sub>, pudiendo incluso desaparecer en el Ártico.

Se pronostican algunos otros resultados asociados al incremento en los gases de invernadero, cuyas señales parecen comenzar a manifestarse:

(Mundo M. 1993).

Mucho del trabajo por realizar en el área de cambio climático consiste en detectar señales que confirmen o desmientan estas tendencias climáticas pronosticadas

## RESUMEN

El Estado de Tlaxcala es el más pequeño en superficie, con 3914 Km. representa el 0.19% de la superficie del país, el Estado se ubica a más de 2000 m sobre el nivel del mar.

Por estar situado en el Eje Neovolcánico, su topografía es montañosa y por ende presenta una gran variedad de microclimas.

La temperatura media anual de la entidad, fluctúa entre los 12°C y los 18°C, el período de lluvias abarca de Abril a Septiembre o Mayo a Octubre, según la zona, donde oscila entre 732.6 y 1200 mm.

Tlaxcala es una región con tradición maicera milenaria, cultivo predominante en casi todo el estado desde antes de Cristo hasta nuestros días. El Estado generalmente se ve afectado por las primeras heladas, las cuales se presentan cuando los cultivos se encuentran en pleno desarrollo, siendo dañados en su mayoría hasta en un 100%, alterando la economía de la población por esta adversidad climática; ante esta problemática se desarrolló el estudio de las temperaturas mínimas o el origen de las heladas inesperadas para el Estado de Tlaxcala.

Para la realización de este trabajo se utilizaron registros diarios, mensuales y anuales de temperatura ambiente y precipitación de las estaciones climáticas de la comisión Nacional del Agua (C.N.A.) del Estado de Tlaxcala. Se aplicó la prueba de homogeneidad de datos para conocer la confiabilidad de los mismos, el método de homogeneidad empleado fue el de Sved-Eisen-Hart que resultó ser un buen evaluador al ser aplicado a estaciones mayores o iguales a 20 años de información climatológica. Solo la estación de Apizaco Tlaxcala resultó ser heterogénea, por lo que fue necesario aplicarle la prueba de varianza, resultando homogénea, la razón de la heterogeneidad con el primer método fue el cambio de ubicación de la estación.

En este trabajo se aplicó un método de Down Scaling para estudiar el impacto que causaría un posible incremento en el CO<sub>2</sub>, en la temperatura media ambiente y la precipitación pluvial del Estado de Tlaxcala. Los resultados sirvieron para analizar posibles escenarios de cambio climático a nivel regional.

Las variables atmosféricas de escala global, fueron representadas por los campos de: temperatura de la superficie del mar (*SST*), presión a nivel del mar (*SLP*), temperatura en 700 mb (*T700*) 2.5 Km. de altura aproximadamente y vorticidad a 500 mb, (*ζ500*) 5 Km. de altura. Como variables regionales se utilizaron: precipitación y temperatura media ambiente.

El proceso de vinculación entre las variables de escala global y regional fue: los campos de escala global se correlacionaron, con las variables de escala regional, generando campos de isocorrelación de los cuales se tomaron los puntos de mayor valor, cuatro en total dos positivos y dos negativos que pueden ser explicados desde un punto de vista dinámico y, en una primera etapa, los más "cercaños" a la región de estudio. A los puntos seleccionados se les aplicó el método del "paso sabio" (*step\_wise*), para obtener las ecuaciones de regresión para cada una de las estaciones utilizadas.

La tesis se ha dividido en una introducción, cuatro capítulos, resultados y conclusiones y por último discusión y sugerencias. En el capítulo uno se analizan aspectos relacionados con los modelos de circulación general, técnicas de escalamiento de las salidas de los GCM's, etc. En el capítulo dos se describen los métodos de análisis, las fuentes de datos usados y los modelos de los que se obtienen escenarios globales de cambio climático. También se examina la metodología, los patrones de circulación de gran escala y su relación con condiciones de superficie en la República Mexicana y el Estado de Tlaxcala. En el capítulo tres se presentan los resultados de los modelos estadísticos regionales de precipitación, su correlación con variables de gran escala y se discute su significado, en el capítulo cuatro se analiza y discute la problemática en el campo con los productores y se realiza una evaluación de los pronósticos realizados para el Estado. Finalmente, en resultados y conclusiones se consideran nuevas interrogantes para trabajos futuros.

# *Marco teórico conceptual*

---

## Sobre los cambios del Clima

El sistema climático de nuestro planeta, que ocurre en la capa gaseosa que rodea al planeta tierra, está constituido por elementos físicos que son dos fluidos uno gaseoso: la atmósfera y el otro líquido: el océano -, continentes, criósfera - (conjunto de hielo y nieve) y la biosfera. Cada uno de estos elementos posee una dinámica propia cuya fuente de energía es básicamente la radiación solar, la cual es máxima sobre la superficie terrestre en las regiones ecuatoriales, disminuyendo gradualmente hacia los polos debido a la curvatura de nuestro planeta. La distribución no homogénea del flujo de radiación sobre la tierra genera lo que se conoce como regiones climáticas, las cuales exhiben un ciclo anual asociado a la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto de la eclíptica. Este ciclo anual es relativamente conocido. Por ejemplo, en la mayor parte de México la temporada de lluvias ocurre durante los meses de junio a septiembre, mientras que la época de secas ocurre de noviembre a abril.

El clima según Arteaga y Castro (1993), es la descripción promedio del estado del tiempo atmosférico en un período y lugar determinado. En otras palabras, el clima es un concepto que sintetiza las propiedades de una sucesión de estados observados del sistema atmósfera – océano - continente. Dichas propiedades son estimadas mediante promedios temporales, por lo que hay una infinidad de posibilidades de elegir la fecha de inicio y fin de la muestra climática. Dos muestras climáticas que son tomadas en diferentes épocas en general llevan a estados del sistema distintos aunque "ceranos".

Los aspectos más interesantes del clima están relacionados a la variabilidad que éste presenta año con año y las tendencias de largo plazo que experimenta. Así, saber si el año próximo las lluvias estarán por encima o por debajo de lo normal, o si el planeta se está calentando o enfriando, es más importante que saber que en alguna región de la república mexicana lloverá en agosto. Gran parte de las actividades socioeconómicas son afectadas por el tipo de anomalía que se presenta año con año.

México es un país de una cultura del clima, más que de una cultura del tiempo meteorológico, ya que depende directamente de las condiciones que prevalecerán en un año normal, climatológicamente ablando, como sucede en los países de latitudes medias. Esto se debe a que en general los cambios del tiempo día con día son muy pequeños en latitudes bajas o tropicales y subtropicales. Los cambios interanuales en el clima pueden ser mucho más importantes. El evento climatológico de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), que evoluciona lentamente con efectos que en principio son poco notables, puede tener un costo muchas veces mayor que el de un huracán, con efectos claros pero de duración de unos pocos días. Las sequías que se producen durante años de ENSO, las variaciones en las lluvias y en las temperaturas estacionales tienen impactos por demás severos. Se estima que el evento de El Niño durante el período 1982-83 tuvo un costo en México y América Central cercano a los 600 millones de dólares, y en el verano de 1997 se reportaron pérdidas en la agricultura en más de 2 millones de toneladas de granos básicos (La Jornada, 4 de nov. 1997) y daños por un costo de alrededor de 8 mil millones de pesos, según declaraciones del secretario de agricultura, ganadería y desarrollo rural.

Para entender los cambios en el clima regional debemos analizar los factores que lo modulan, esto es, los llamados forzantes climáticos, que son todos aquellos factores que impactan al sistema climático y cuya influencia puede manifestarse aún en regiones alejadas geográficamente. Ejemplos de forzantes climáticos son la radiación solar, las erupciones volcánicas, la orografía o la actividad convectiva anómala. El distinguir los forzantes y su papel como reguladores del clima ha sido desde siempre un objetivo de los científicos atmosféricos. En las últimas tres décadas hemos sido testigos de un avance importante en el entendimiento del clima, debido principalmente a la disponibilidad de fuentes de datos más completas (estaciones de superficie, satélites, etc.) y al acelerado uso de computadoras para su procesamiento, mediante los cuales se puede distinguir el papel de algunos forzantes climáticos.

Algunos componentes de la atmósfera terrestre, como vapor de agua, bióxido de carbono, metano y otros gases de invernadero, son capaces de absorber la energía emitida por la superficie terrestre y radiarla, por lo que en principio no toda la radiación

que llega a la superficie, proveniente del sol, sale al espacio. Bajo esta situación se comenzaría a acumular energía. Para mantener un balance, se eleva la temperatura superficial del planeta, y se emite el exceso de energía al espacio. Como resultado, la temperatura de la Tierra es alrededor de 50°C mayor de lo que sería si no existiera la atmósfera (Fig. 1).

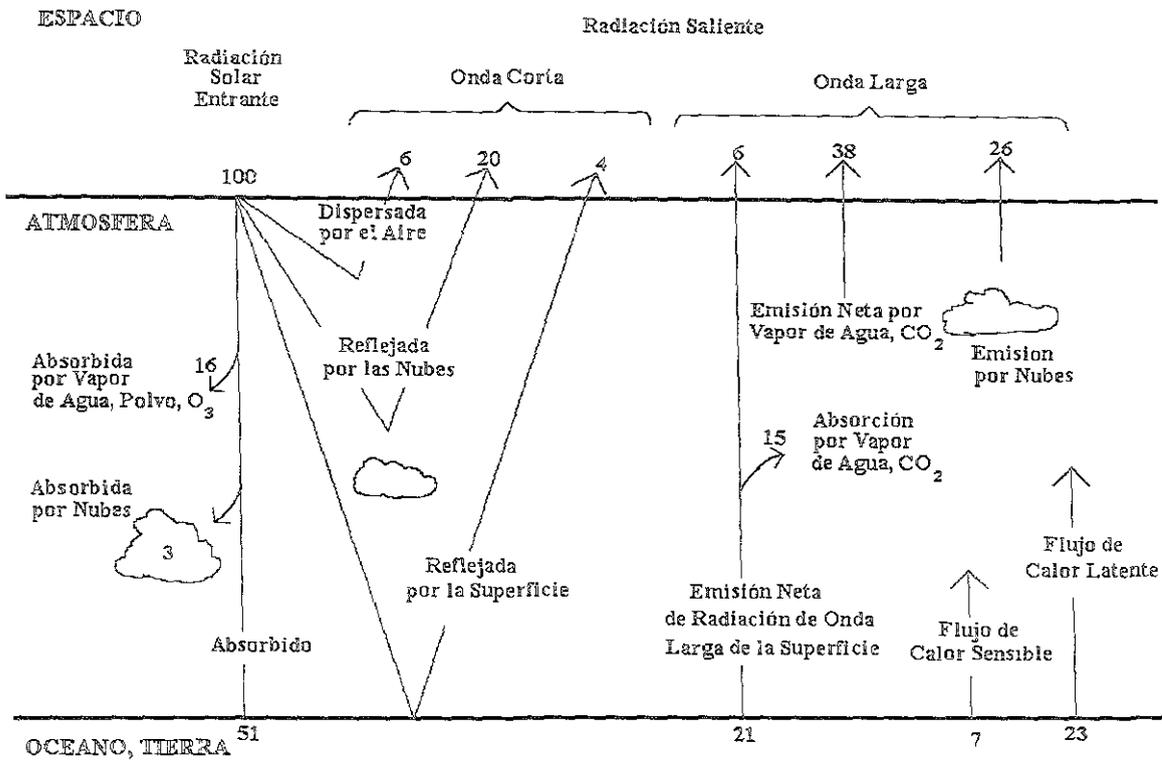


Figura. 1: Esquema del promedio global de radiación y del balance de energía del sistema atmósfera-oceano-continente, relativo a 100 unidades de entrada de radiación solar.

Fluctuaciones en la temperatura del planeta siempre han existido sobre períodos cortos (1-10 años), algunas de las cuales están relacionadas al evento ENSO. En escalas de muchos años y las fluctuaciones en la concentración de los gases de invernadero son más relevantes las circulaciones del océano profundo comienzan a ser importantes para el clima; mientras que en escalas de decenas de miles de años, las fluctuaciones en parámetros astronómicos.

Existen algunos factores climatológicos que hacen que las fluctuaciones del clima se den o no de una manera casi periódica, lo cual repercute en el cambio climático o la variabilidad climática.

*a) Variabilidad interanual*

En escalas interanuales, el modo dominante de variabilidad climática en los trópicos está asociado al evento ENSO. Este evento es un proceso de interacción océano-atmósfera. En su componente oceánica, El Niño corresponde a una anomalía positiva de la temperatura superficial del mar que se extiende desde el Pacífico central hasta la costa de Sudamérica.

Durante un episodio de El Niño, los vientos superficiales del Este se debilitan, por lo que el agua que normalmente se acumula en el Pacífico del Oeste se redistribuye a lo largo del Pacífico tropical. Al aparecer anomalías positivas de temperatura en el Pacífico central, la actividad convectiva máxima se desplaza hacia el Este. Las anomalías en la actividad convectiva generan ondas de Rossby estacionarias que provocan cambios en el clima de Norteamérica, en lo que se conoce como teleconexiones.

La condición opuesta en las condiciones del Pacífico es decir, anomalías negativas en la superficie del Pacífico Central y reforzamiento de los vientos del este y la celda de Walker, se conoce como un evento de La Niña. Aunque se esperaría que a un evento de El Niño siguiera uno de La Niña, la evolución del sistema océano-atmósfera muestra que esto no es necesariamente cierto. En los primeros años de esta década (1991-1994) se ha experimentado un ENSO casi permanente, siendo hasta finales de 1995 que aparecieron condiciones de La Niña. Algunas descripciones del clima podrían presentar al evento de El Niño o de La Niña como desviaciones de la condición normal del Pacífico tropical. En realidad, debiera pensarse que la condición normal es un estado fluctuante entre ambos estados.

*b) Teleconexiones*

Aunque el evento ENSO involucra principalmente variaciones interanuales en la circulación atmosférica y oceánica de los trópicos, su señal se puede detectar más allá de éstos. Las señales extratropicales del ENSO son más pronunciadas durante la fase madura de El Niño (diciembre – enero - febrero), cuando las anomalías de la temperatura de la superficie del mar son mayores (Fig. 2.).

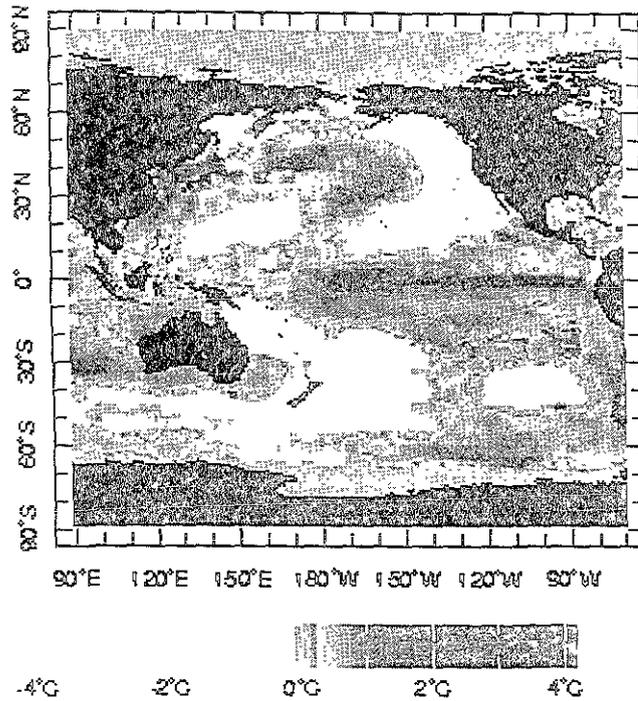


Figura 2.: Patrón característico de anomalías observadas de temperatura de superficie del océano Pacífico durante un año de El Niño.

*c) Variabilidad interdecadal*

Podemos entender por variabilidad interdecadal, a los eventos climatológicos que suelen presentarse de una manera casi cíclica o periódica, como sucede con las manchas solares, las oscilaciones casi bianuales etc. o aquellos cambios interanuales asociados con el evento de El Niño que parecen estar a su vez modulados por fluctuaciones en escalas mayores de tiempo. Así, se tienen variaciones en la actividad de los océanos en

escalas de 30 a 50 años y aún más largas. Un ejemplo de esta variabilidad se tiene al examinar la actividad del evento de El Niño durante los últimos cien años. Torrence y Webster (1995) han utilizado la temperatura superficial del océano en la región conocida como Niño 3 (Fig. 3.), como un parámetro de referencia cuando se presenta una anomalía positiva o negativa en el pacífico ecuatorial, que se manifiesta con cambios en el clima a nivel mundial. Esta región se extiende de 160° latitud W a 120° latitud W y entre 5° latitud S y 5° latitud N. Los datos de TSM (temperatura de la superficie del mar) en la región Niño 3 muestran que a finales del siglo XIX y comienzos del XX la actividad del ENSO fue más grande, disminuyendo sensiblemente a mediados del presente siglo y reactivándose desde la década de los ochenta.

La división zonal del NIÑO 1, 2 y 3, corresponde a las áreas que presentan un mayor calentamiento en las aguas superficiales ecuatoriales zona en la que empieza a manifestar este evento climatológico.

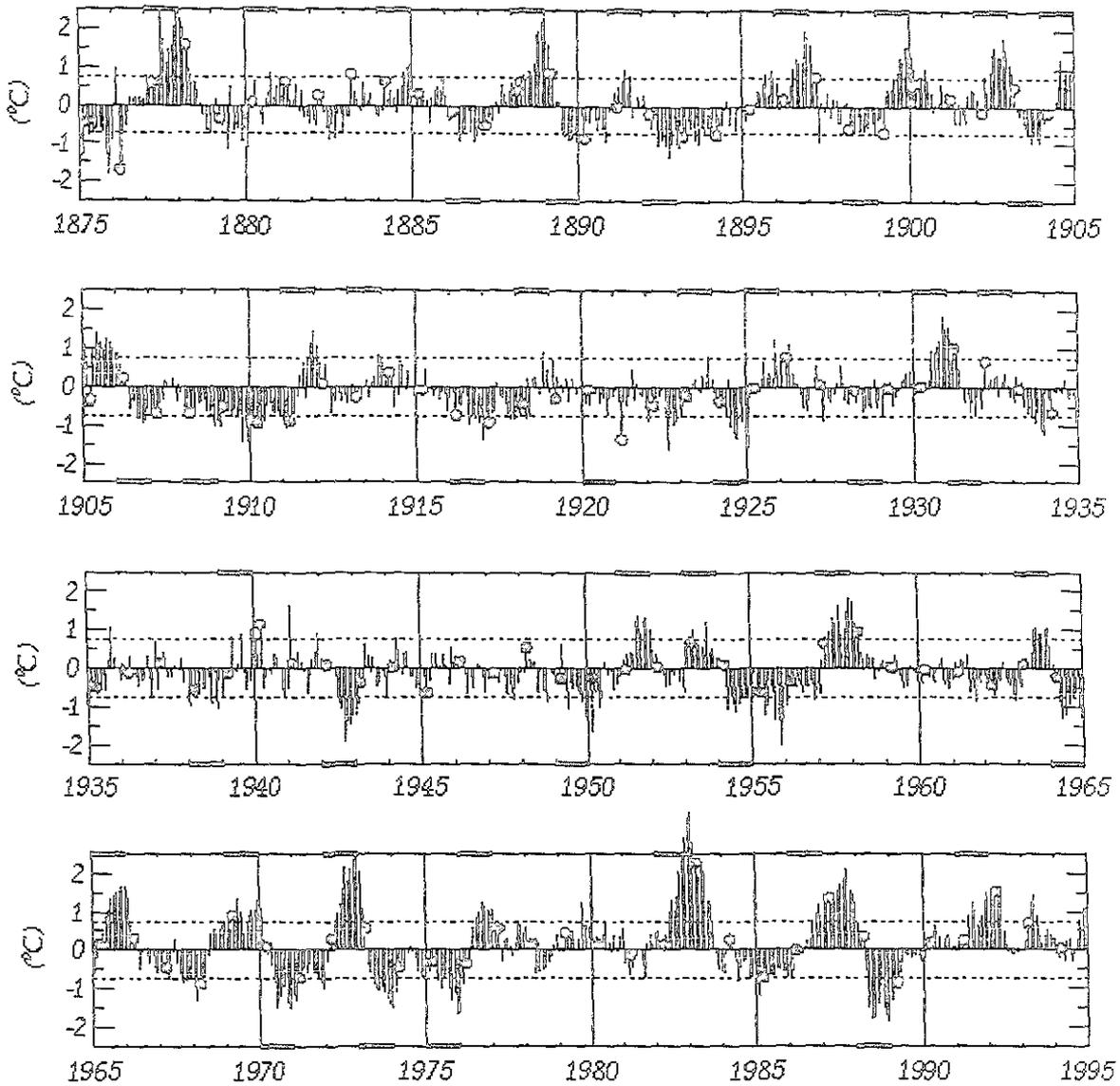


Figura 3: Histograma de anomalías de temperatura superficial del océano sobre el Pacífico Ecuatorial del Este. Los puntos indican marzo y las barras horizontales el inicio de períodos calientes y fríos (Tomada de Kiladis y Diaz, 1989).

Dentro de este marco de referenciz, puede uno preguntarse:

¿ Impactan los valores extremos del campo de temperaturas (EL NIÑO y LA NIÑA), (ENSO), del Océano Pacífico Ecuatorial sobre el clima del Estado de Tlaxcala?

¿Cuál será el posible impacto del cambio climático en México/Estado de Tlaxcala y cómo se manifiesta éste?

¿Qué regiones del Estado de Tlaxcala serán afectadas en mayor medida tanto por la variabilidad como por el cambio del clima?

Tales interrogantes son importantes, no tan sólo desde el punto de vista científico, sino también social, económico, etc. Con base en ellas se ha desarrollado el presente trabajo usando información de diversas fuentes: datos históricos de estaciones climatológicas de superficie, resultados de experimentos numéricos de Modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCM's), modelos de diagnóstico, etc.

Es claro que nuestra sociedad enfrenta el reto de crecer, afectando lo menos posible el medio ambiente. Los planteamientos de desarrollo sustentable deben incluir el estudio de problemas como el anterior, relacionado con el factor clima, en donde el gran reto es diferenciar la variabilidad natural del clima de la variabilidad inducida por el hombre.

En este trabajo se empleó una metodología alternativa con procedimientos estadístico-dinámicos para generar escenarios de temperatura media ambiente y precipitación regional ante un posible cambio climático, por un método de reducción de escala a las salidas de los experimentos  $2\times\text{CO}_2$  y  $1\times\text{CO}_2$  del Modelo de Circulación General NCAR. (National Center for Atmospheric Research)

## CONCEPTUALIZACIÓN

Por claridad conceptual en la lectura del trabajo, se describirán los términos de algunas palabras clave empleadas, para conocer el enfoque dado en la descripción de los procesos o mecanismos de la Variabilidad Climática y el Cambio Climático:

### Clima:

Conjunto de eventos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera en un período o lugar determinado.

### Tiempo atmosférico:

Es el estado momentáneo del conjunto de eventos meteorológicos que se dan en un lugar determinado.

### ENSO:

Por sus siglas en inglés EL NIÑO Oscilación del Sur. Evento climatológico, que consiste, en una anomalía positiva de temperatura en las aguas superficiales del Pacífico Ecuatorial.

### Variabilidad Climática:

Son los eventos climáticos naturales que se dan en la atmósfera, cambios o fluctuaciones que se dan en la temperatura, precipitación etc. de una manera natural y esta puede ser diaria, mensual, anual, decadal glacial etc.

### Cambio Climático:

Son todos aquellos cambios o alteraciones producidas en el clima por efecto de las actividades antropogénicas.

### GCM's:

(Modelos de Circulación General de la Atmósfera) Modelos de generación de escenarios climáticos.

### Gran Escala:

Tamaño o tipo de malla, que tienen los Modelos de Circulación General, en la resolución para la generación de escenarios climáticos. Abarcan escalas planetarias o continentales, las cuales son de carácter muy general y lo que simulan engloba a muchos continentes y no permiten ver con fineza y detalle lo que sucede en un lugar más pequeño, por, ejemplo un país o estado.

### Menor Escala:

Tener mayor poder de resolución, para observar como influye o no la topografía de un lugar en la variabilidad del clima, o en el cambio climático de una zona determinada.

*Temperatura Ambiente:*

Es la temperatura que prevalece en el momento de la observación en un momento y lugar determinado.

*Temperatura mínima:*

Es el menor grado de calor durante un determinado período de observación.

*Promedio Espacial:*

Es el promedio de una serie grande tiempo, para una variable climática, con un mismo período pero para varias estaciones climatológicas.

*Promedio Temporal:*

Es el promedio de una serie grande de tiempo, para una variable climática y para una estación climatológica.

Aún con las dificultades antes descritas, los GCM's son la única herramienta para generar escenarios de cambio climático a futuro. La necesidad de saber como serán estos cambios a escala regional requiere entonces del desarrollo de metodologías que permitan hacer uso de los resultados de los GCM's, y al mismo tiempo de tomar en cuenta forzamientos locales que en ocasiones determinan el clima.

## 1.2 Técnicas de escalamiento de las salidas de los GCM's

Los análisis del impacto del cambio climático han sido realizados a partir de los escenarios resultantes de las simulaciones con GCM's. Sin embargo, se reconoce que la falta de detalles en los escenarios impide obtener conclusiones sobre los cambios a escala regional. El problema consiste entonces en estimar el cambio climático a escala regional a partir de las salidas de GCM's. Desde la década de los años ochentas se han generado metodologías que permiten simular cambios de escala regional e incluso local a partir de pronósticos de circulaciones de gran escala mediante relaciones empírico-estadísticas.

## 1.3 Técnicas empíricas

Las metodologías empíricas consisten en obtener información sobre condiciones locales a partir de patrones o condiciones de gran escala. Para ello, se hace uso de datos históricos en superficie y en altura, a partir de los cuales se obtienen relaciones entre variables.

Los estudios empíricos del cambio climático han seguido dos direcciones

### *1) El uso de datos instrumentales recientes*

*a)* Por comparación de condiciones de superficie (precipitación, nubosidad etc.) durante años calientes y fríos se trata de obtener una aproximación a condiciones bajo calentamiento global. Una de las limitaciones de estos estudios es el obtener significancia estadística para 'conjuntos' calientes y fríos.

b ) Generación de relaciones entre variables del clima regional (por ejemplo, temperatura y precipitación) y el promedio (anual o mensual) de temperatura y precipitación hemisférica. Estas relaciones son usadas para estimar las posibles respuestas del clima regional ante calentamientos globales.

## 2 ) *El uso de análogos paleoclimáticos.*

A partir de datos paleobotánicos o paleohidrológicos, se tratan de inferir posibles patrones de cambio climático regional. Así, se han generado escenarios de clima regional bajo la suposición de un mundo más cálido. Sin embargo, bajo esta metodología se pueden sacar pocas conclusiones de los cambios climáticos regionales.

### 1.2.2. Técnicas semiempíricas

Las técnicas semiempíricas para la simulación del cambio climático regional consisten en traducir la información de gran escala de un GCM de baja resolución en información regional. Esto es posible usando relaciones entre variables de gran escala y variables locales en superficie (temperatura y precipitación). Este problema es conocido como Inversión Estadística del Clima (SCI, Statistical Climate Inversion). Entre las técnicas de SCI se tienen:

#### 1 ) *Uso de anomalías de un GCM*

Esta es la técnica más simple y común, y consiste en obtener las diferencias entre las corridas de control y anómala para después sumarlas a los datos observados en la región analizada (Smith y Tirpak, 1989). Por ejemplo, en experimentos de calentamiento global se obtiene la anomalía de temperatura entre corrida de control y corrida  $2xCO_2$ , y ésta se suma a los datos observados en una región o localidad particular. Tal técnica ha sido utilizada en los análisis de los “Estudios de País” alrededor del mundo, se tomo como patrón de referencia en los modelos el bióxido de carbono, por ser uno de los gases que se está

# *Objetivos e hipótesis*

---

## Objetivo General

El principal objetivo de este estudio es el de analizar las relaciones entre los valores en los campos de temperatura superficial y precipitación del Estado de Tlaxcala, con datos de variables de gran escala y analizar el posible cambio climático regional asociado a un posible incremento global en la concentración de bióxido de carbono en la atmósfera.

## Objetivos Particulares

- Determinar las señales de la variabilidad climática en el Estado de Tlaxcala de los eventos extremos de EL NIÑO y LA NIÑA (ENSO).
- Determinar en que regiones de la República Mexicana y el Estado de Tlaxcala se detectan las señales del cambio climático.
- Probar una metodología para análisis de variabilidad climática regional a partir de reportes de estaciones de superficie, series de tiempo de estaciones climatológicas del Estado de Tlaxcala, campos meteorológicos de gran escala y un modelo de circulación general de la atmósfera (NCAR).

## Hipótesis De Trabajo

Es posible determinar relaciones empíricas entre patrones de circulación de gran escala y patrones de circulación regional de mesoescala para el Estado de Tlaxcala.

Para hacer uso de esta metodología de reducción de escala es necesario introducir tres hipótesis secundarias de trabajo:

- Los Modelos de Circulación General son capaces de simular en forma realista las circulaciones de gran escala que dan origen a las circulaciones de menor escala, que permitan realizar análisis de variabilidad y cambio climático.
- Las relaciones entre variables de gran escala y las de escala regional funcionan aún en condiciones anómalas en el clima.
- Las relaciones estadísticas reproducen (al menos aproximadamente) los datos históricos.

En la presente investigación se tiene como principal objetivo:

- Generar: Mediante modelos estadísticos, escenarios de Cambio Climático Regional en el Estado de Tlaxcala a partir simulaciones de duplicación de CO<sub>2</sub> realizadas con el GCM. NCAR Los escenarios generados corresponderán a cambios en la temperatura y precipitación de invierno (Dic. – Ene. – Feb.) y de verano (Jun. – Jul. – Ago.)
- Así como relaciones de variabilidad interanual con énfasis en valores extremos en el campo de temperaturas del océano Pacífico Ecuatorial del Este.

# Capítulo 1

---

## Modelos climáticos

### 1.1 Modelos de Circulación General (GCM's)

Los Modelos de Circulación General de la atmósfera (GCM's) son hasta el momento las herramientas principales con que se cuenta para estudiar el clima del futuro. Una descripción adecuada del cambio climático requiere que los modelos representen los procesos de retroalimentación entre la atmósfera, el océano, la criosfera, etc. Por esta razón se han desarrollados modelos acoplados (atmósfera-océano-cubierta de hielo-nieve, biosfera) para poder simular lo mejor posible la naturaleza.

Hay dos causas principales por la que los GCM's no se corren con altas resoluciones:

*1. Recursos de cómputo.* El tiempo de CPU requerido para correr un GCM se incrementa aproximadamente con el cuadrado del número de puntos en la horizontal de la malla, el problema de recursos de cómputo es especialmente relevante para un modelo acoplado, pues éste requiere de largos períodos de integración para que los diversos componentes del sistema alcancen el estado de equilibrio.

*2. Procesos físicos de escala sub-malla.* El aumento en la resolución espacial en los GCM's implica que se comienzan a incluir procesos físicos de meso e incluso microescala, los cuales ya no pueden ser descritos en términos de las parametrizaciones del GCM y por lo tanto, requieren de una representación explícita en términos de ecuaciones hidrodinámicas. Tal representación no es simple, pues en la mayoría de los casos se desconoce como estos procesos de pequeña escala interactúan con el flujo de mayor escala.

Aún con las dificultades antes descritas, los GCM's son la única herramienta para generar escenarios de cambio climático a futuro. La necesidad de saber como serán estos cambios a escala regional requiere entonces del desarrollo de metodologías que permitan hacer uso de los resultados de los GCM's, y al mismo tiempo de tomar en cuenta forzamientos locales que en ocasiones determinan el clima.

## 1.2 Técnicas de escalamiento de las salidas de los GCM's

Los análisis del impacto del cambio climático han sido realizados a partir de los escenarios resultantes de las simulaciones con GCM's. Sin embargo, se reconoce que la falta de detalles en los escenarios impide obtener conclusiones sobre los cambios a escala regional. El problema consiste entonces en estimar el cambio climático a escala regional a partir de las salidas de GCM's. Desde la década de los años ochentas se han generado metodologías que permiten simular cambios de escala regional e incluso local a partir de pronósticos de circulaciones de gran escala mediante relaciones empírico-estadísticas.

## 1.3 Técnicas empíricas

Las metodologías empíricas consisten en obtener información sobre condiciones locales a partir de patrones o condiciones de gran escala. Para ello, se hace uso de datos históricos en superficie y en altura, a partir de los cuales se obtienen relaciones entre variables.

Los estudios empíricos del cambio climático han seguido dos direcciones

### *1) El uso de datos instrumentales recientes*

*a)* Por comparación de condiciones de superficie (precipitación, nubosidad etc.) durante años calientes y fríos se trata de obtener una aproximación a condiciones bajo calentamiento global. Una de las limitaciones de estos estudios es el obtener significancia estadística para 'conjuntos' calientes y fríos.

b ) Generación de relaciones entre variables del clima regional (por ejemplo, temperatura y precipitación) y el promedio (anual o mensual) de temperatura y precipitación hemisférica. Estas relaciones son usadas para estimar las posibles respuestas del clima regional ante calentamientos globales.

## 2 ) *El uso de análogos paleoclimáticos.*

A partir de datos paleobotánicos o paleohidrológicos, se tratan de inferir posibles patrones de cambio climático regional. Así, se han generado escenarios de clima regional bajo la suposición de un mundo más cálido. Sin embargo, bajo esta metodología se pueden sacar pocas conclusiones de los cambios climáticos regionales.

### 1.2.2. Técnicas semiempíricas

Las técnicas semiempíricas para la simulación del cambio climático regional consisten en traducir la información de gran escala de un GCM de baja resolución en información regional. Esto es posible usando relaciones entre variables de gran escala y variables locales en superficie (temperatura y precipitación). Este problema es conocido como Inversión Estadística del Clima (SCI, Statistical Climate Inversion). Entre las técnicas de SCI se tienen:

#### 1 ) *Uso de anomalías de un GCM*

Esta es la técnica más simple y común, y consiste en obtener las diferencias entre las corridas de control y anómala para después sumarlas a los datos observados en la región analizada (Smith y Tirpak, 1989). Por ejemplo, en experimentos de calentamiento global se obtiene la anomalía de temperatura entre corrida de control y corrida  $2xCO_2$ , y ésta se suma a los datos observados en una región o localidad particular. Tal técnica ha sido utilizada en los análisis de los “Estudios de País” alrededor del mundo, se tomo como patrón de referencia en los modelos el bióxido de carbono, por ser uno de los gases que se está

emitiendo en mayor proporción a nivel mundial, y es uno de los principales en los cambios climáticos ante un aumento de temperatura, sabemos que de los múltiples gases que se emiten como: plomo, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, clorofluorocarbonos etc. El de mayor proporción es el bióxido de carbono y es la variable que se maneja en el modelo de circulación general.

## 2) *Perfect-Prog (Pronóstico-Perfecto)*

Esta es la primera técnica que se desarrolló para tomar ventaja de los modelos de Pronóstico Numérico del Tiempo (NWP) y fue usada entre otros por Klein (1982). Los datos históricos observados son usados en el desarrollo de ecuaciones de regresión entre variables de gran escala y de superficie. Estas ecuaciones son entonces evaluadas con valores de un pronóstico generados por el modelo para inferir valores de superficie. En este sentido, los pronósticos de gran escala se suponen “perfectos”, como las observaciones [Wilks, 1995]. Esta es la técnica que se utiliza en el presente trabajo.

## 3) *Model Output Statistics (MOS)*

La técnica MOS [Glahn y Lowry, 1972] es similar a la anterior, pero utiliza los valores “históricos de las salidas del modelo” correlacionados con las variables de superficie para obtener pronósticos locales.

La mayor limitación de las técnicas semiempíricas es que los forzamientos de mesoescala y sus interacciones con los sistemas de escala sinóptica y de gran escala, no son siempre descritos sobre bases físicas. Por lo tanto, no hay certeza que las relaciones predictivas desarrolladas bajo condiciones del clima del presente sean válidas también bajo condiciones de cambio climático. Por otro lado, la elección apropiada de los predictores es crucial para un funcionamiento adecuado de estos métodos. Desde el punto de vista operacional, la principal ventaja de los procedimientos semiempíricos es que son computacionalmente baratos y no requieren del uso de grandes equipos de cómputo.

### 1.2.3 Técnicas de modelación dinámica del clima regional

Las técnicas de modelación dinámica para la simulación del clima regional incluyen explícitamente los forzamientos de mesoescala. Para esto se incrementa la resolución del modelo sobre un área de interés específico. Esto puede realizarse de dos maneras: utilizando mallas de resolución variable o mediante técnicas de “anidamiento” en la que un modelo regional de alta resolución es forzado por las circulaciones de un modelo global de baja resolución. Por ejemplo, el conocido como MM5 es un modelo que ejecuta las tareas antes indicadas.

Sin embargo, la técnica de la modelación por anidamiento está en etapa de desarrollo y bajo prueba las parametrizaciones físicas (por ejemplo, precipitación y procesos físicos de la superficie), algoritmos numéricos y la asimilación de las condiciones de frontera, por lo que aún no se tienen resultados concretos. Esta técnica está en etapa de desarrollo en México. (Magaña et al. 1997, 1998, 1999).

# Capítulo 2

---

## 2.2 Datos y métodos de análisis

### 2.2.1 Datos

En el presente trabajo, se emplearon las series de tiempo de la red de estaciones climatológicas de la CNA del Estado de Tlaxcala, 12 estaciones para datos de precipitación y 10 para datos de temperatura ambiente (media mensual), las series de tiempo para algunas estaciones varían de 1961 a 1997 y de 1975 a 1997, las estaciones utilizadas son las siguientes:

*01 Apizaco.*

*02 Atlangatepec.*

*03 Huamantla.*

*04 Tlaxcala Capital*

*05 Tlaxco.*

*06 El Carmen Tequexquitla*

*07 San Antonio Calpulalpan*

*08 Ixtacuixtla*

*09 Tepetitla*

*10 Españita.*

*11 Tocatlán..*

*12 San Pablo Zitlaltepec*

Las primeras 10 estaciones sólo cuentan con datos de temperatura media mensual y el número asignado fue un control nuestro en el manejo de la información de las estaciones.

### 2.2.2 Sobre los datos

#### 1) Observaciones

La variable de superficie de mayor interés para la realización de este trabajo, es la precipitación estacional a escala regional, para el Estado de Tlaxcala. Para ello, se utilizaron los datos de precipitación de 12 estaciones y 10 de temperatura media mensual de la red de estaciones climatológicas de la CNA (Fig. 2.1).

## ESTADO DE TLAXCALA

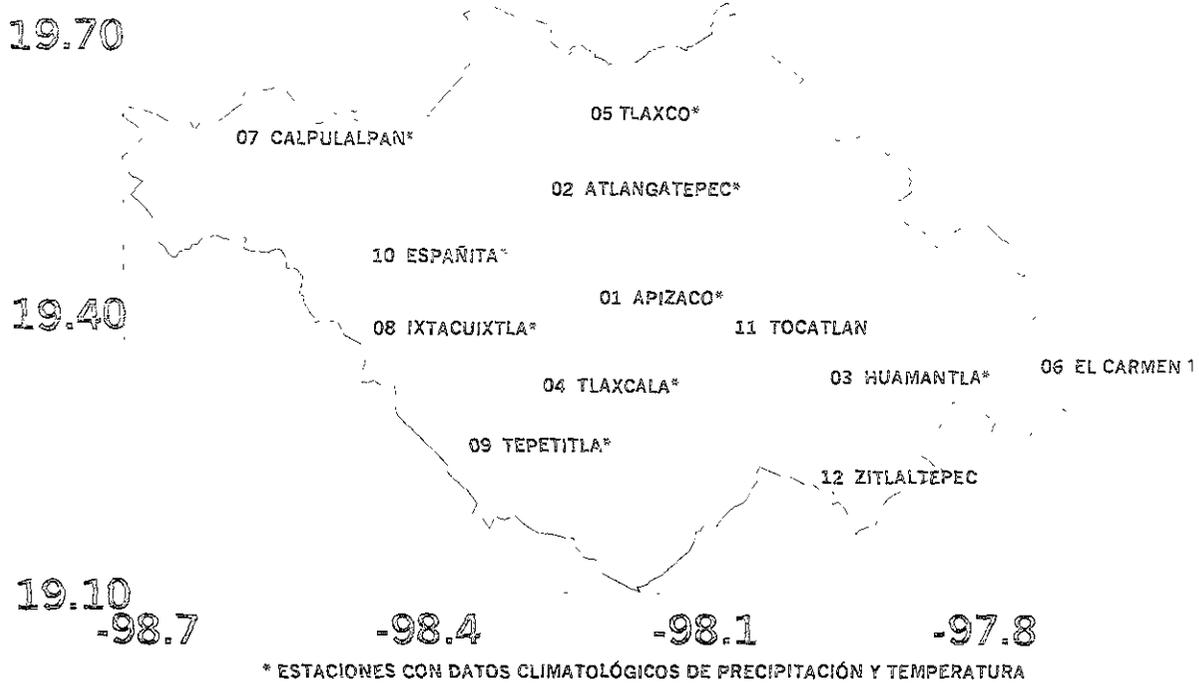


Fig. 2.1: Red de estaciones climatológicas utilizadas de la Comisión Nacional del agua (CNA)

HECHO POR OROZCO F S

ESCALA APROX 1 75 000

Para el Estado de Tlaxcala, estas estaciones formarán una región, sin que se haya aplicado un criterio objetivo de regionalización. Los detalles sobre el procedimiento de una regionalización están descritos en Hosking y Wallis (1997). Las series de tiempo para estas estaciones son de 1961 a 1997 y en 4 estaciones de 1975 a 1997.

Debido a los períodos con que se dispone para las variables de gran escala, se han tomado los registros de superficie para el período 1961-1997. En este período ocurrieron 10 episodios calientes en: 1963-1964, 1965-1966, 1969-1970, 1972-1973, 1977-1978, 1983-1983, 1986-1987, 1991-1992, 1993-1994, 1996-1997, separados por 5 eventos más fríos 1964-1965, 1970-1971, 1973-1974, 1975-1976, 1988-1989.

### 2.2.3 Prueba de homogeneidad de datos

Para poder realizar un estudio de este tipo en el que se manejan registros climatológicos (diarios, mensuales y/o anuales), con series largas de tiempo, es importante verificar la calidad y confiabilidad de los datos con que se va a trabajar; existen muchas pruebas para analizarlos y, en este caso se utilizó, la prueba de Homogeneidad de Datos.

Sobre la homogeneidad de datos, existe una manera fácil de hacer la comprobación de homogeneidad de los mismos para saber si los registros son o no confiables para poder ser utilizados en trabajos climatológicos de este tipo, con el método de SVED-EINSENHART. Se usan los datos en orden cronológico y después de haber determinado el valor de la media ( $m$ ), (o mediana, según se elija), se cuenta el número de veces en el que la serie cambia de valores superiores o inferiores de ( $m$ ) y viceversa.

El número total de cambios ( $U$ ) se aumenta en una unidad y se compara con los límites de la distribución normal, que según Doorembos J. para el caso de estudio, el intervalo de confianza para registros homogéneos es de  $10 - 17$ ,  $10 \leq U + 1 \leq 17$ . Este intervalo presenta límites de significancia, aproximadamente, para 10 y 90%. Cuando ( $U$ ) está en esos límites se considera que la muestra es homogénea, si en la prueba realizada la estación resulta ser heterogénea y se cree tener la explicación (cambio de localización de la estación climatológica, ajuste de los aparatos de medición, etc.), se realiza un análisis de varianza para verificar su homogeneidad. (Orozco 1989).

PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE DATOS							
ESTACIÓN: <u>TLAXCALA</u>		PERIODO: <u>1961-1998</u>		MEDIA: <u>12.6</u>			
No DE CAMBIOS DE (U) <u>15-1</u>		NÚMERO DE DATOS: <u>38</u>					
INTERVALO DE (U) <u>10-17</u>		RECORD: <u>HOMOGÉNEO</u>		TEMP. AMB.			
Año	Temp.	Diferencia	Signo	Año	Temp	Diferencia	Signo
1961	12.8	0.2	+	1980	11.9	-0.7	-
1962	12.7	0.1	+	1981	10.4	-2.2	-
1963	13.1	0.5	+	1982	13.0	0.4	+
1964	12.9	0.3	+	1983	11.2	-1.4	-

1965	11.1	-1.5	-	1984	11.4	-1.2	-
1966	11.6	-1.0	-	1985	11.6	-1.0	-
1967	11.2	-1.4	-	1986	15.7	3.1	+
1968	11.8	-0.8	-	1987	12.3	0.3	+
1969	12.7	0.1	+	1988	11.5	-1.1	-
1970	11.2	-1.4	-	1989	12.9	0.3	+
1971	12.7	0.1	+	1990	13.2	0.6	-
1972	12.0	-0.6	-	1991	13.2	0.6	+
1973	12.2	-0.4	-	1992	12.9	0.3	+
1974	12.7	0.1	+	1993	13.6	1.0	+
1975	11.9	-0.7	-	1994	13.2	0.6	-
1976	11.1	-1.5	-	1995	13.6	1.0	+
1977	12.7	0.1	+	1996	12.2	-0.4	-
1978	12.0	-0.6	-	1997	12.4	-0.2	-
1979	11.7	-0.9	-	1998	11.7	-0.9	-

Tabla 1 Prueba de homogeneidad de datos para la estación de Tlaxcala Capital.

Los datos de "circulación de gran escala" consisten en medias mensuales de:

- i ) Temperatura en 700 mb (T700), (altura promedio de 2.5 Km.)
- ii ) Vorticidad relativa a 500 mb ( $\zeta_{500}$ ), calculada a partir de la altura geopotencial a 500 mb, Z500 (altura promedio de 5.5 Km.)
- iii ) Presión a nivel del mar (SLP, Sea Level Pressure), y
- iv ) Temperatura de la superficie del mar (SST, Sea Surface Temperature).

- a) Temperatura a 700 mb. Es la temperatura que se registra en la superficie de la atmósfera a una altura aproximada de 2.5 Km. en la zona de estudio.
- b) Vorticidad: Es la rotación de un fluido desde el punto de vista diferencial, es decir solo una pequeña parte o muestra de valores de viento a una altura aproximada de 5.5 Km.
- c) Presión a nivel del mar. Es el valor de la presión que se esta registrando en la zona de estudio en un momento determinado.
- d) Temperatura de la superficie del mar. Datos de temperatura de la superficie del mar en la zona del Pacífico Ecuatorial, del NIÑO3.

La elección se basó en la disponibilidad de estas variables para un largo período, y su generación en los experimentos con GCM's.

Los tres primeros archivos se obtuvieron del Centro Nacional para la Investigación Atmosférica de los Estados Unidos. (NCAR, National Center for Atmospheric Research), y consisten en mallas casi hemisféricas de  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  de resolución para el período de 1947 - 1992. Los datos de SST fueron obtenidos del Hadley Center, y están en mallas globales de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  para el período 1948 - 1994. (Pérez, 1997).

#### *Salidas de experimentos $2xCO_2$ - $1xCO_2$ en GCM*

En cuanto a los datos o salidas del GCM, se dispone de datos de la corrida de control (concentración actual de  $CO_2$  atmosférico, sin variación en el tiempo) y del experimento de anomalía (duplicación del  $CO_2$  atmosférico) correspondiente a campos medios estacionales de (diciembre-enero-febrero) invierno en el Hemisferio Norte y jja (junio-julio-agosto) verano en el Hemisferio Norte, a diferentes alturas. Las variables de que se dispone para el modelo NCAR son: temperatura del aire, altura geopotencial, componentes  $u$  y  $v$  del viento, cubierta nubosa a diversos niveles de presión, a nivel de superficie; la presión media al nivel del mar, humedad del suelo, temperatura y precipitación. La resolución de los datos es T21 ( $5.6^{\circ} \times 5.6^{\circ}$ ) y están dispuestos en coordenadas gaussianas, el modelo acoplado que se utilizó fue el NCAR, cuyas salidas fueron usadas para el análisis de precipitación y temperatura media ambiente regional del Estado de Tlaxcala.

#### *a) Modelo NCAR*

Es el modelo utilizado en el presente trabajo y este modelo atmosférico es global con resolución romboidal (alrededor de  $4.5^{\circ}$  de latitud  $\times$   $7.5^{\circ}$  de longitud), geometría continental realista, nueve niveles sigma en la vertical, y parametrización de procesos de superficie-tierra. Utiliza un ciclo anual de forzamiento solar (pero sin un ciclo diario) y calcula la humedad del suelo (cubeta de 15 cm), cubierta de nieve, nubosidad y radiación.

El modelo de océano global tiene una resolución latitud-longitud de 5°, costas y topografía de fondo realista, cuatro capas, y una formulación termodinámica simple del mar de hielo. Detalles de los modelos de la atmósfera y océano se pueden encontrar en Washington y Meehl (1992).

El arranque de los experimentos fue ejecutado corriendo una simulación de 50 años del modelo oceánico con forzamientos atmosféricos observados (esfuerzo del viento y temperatura), después de haber inicializado el modelo del océano durante el primer año con secciones transversales de temperatura y salinidad climatológicas. El modelo atmosférico fue inicializado con datos de una corrida de 15 años de un modelo de capa mezclada del océano. Los modelos de atmósfera y océano fueron entonces acoplados y corrieron en modo de prueba para una simulación de 16 años, después de la cual la simulación de control ( $1 \times \text{CO}_2$ ) y el experimento con  $\text{CO}_2$  variable fueron iniciadas. En el modelo acoplado, la atmósfera y el océano se comunican una vez al día de la manera descrita por Washington y Meehl (1992).

#### 2.2.4 Metodología

Los datos históricos observados disponibles corresponden a medias mensuales de Z500, pero los campos disponibles en las simulaciones con el GCM corresponden a vientos en 500 mb. Por tanto, se optó por transformar los campos de altura geopotencial a campos de vorticidad relativa geostrófica, sabiendo que sólo se calcula esta variable al norte de 20°N. Para ello se utiliza la relación:

$$\zeta = \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.1)$$

donde  $f$  es el parámetro de Coriolis ( $f = 2\Omega \sin \phi$ ), siendo  $u, v$ , las componentes del viento geostrofico;  $g$ , la aceleración de la gravedad y,  $\zeta$  la vorticidad relativa. Numéricamente, se

procedió a calcular el viento geostrófico y a partir de éste se obtuvo la vorticidad relativa geostrófica, (Pérez 1997).

La resolución temporal de la salida del GCM es estacional (verano e invierno), por lo tanto el análisis de datos observados es también estacional. Así, se calcularon anomalías estacionales de precipitación por región para invierno (DJF) y verano (JJA), por ser estos períodos los extremos en el clima de México. De igual forma se calcularon las medias estacionales para los campos de  $\zeta_{500}$ , T700, SLP, SST del período 1948-1987.

### *i) Patrones de correlación*

Los campos de correlación espacial entre los valores de la precipitación acumulada para 12 estaciones climatológicas del Estado de Tlaxcala y 10 estaciones con valores de temperatura media mensual estacional (DJF y JJA) por región y los campos de SLP, SST, T700,  $\zeta_{500}$ , se obtuvieron usando el coeficiente de correlación

$$r_{ij}(X_R, Y_R) = \frac{\sum_{t=t_0}^{t=if} (X_{ij} - \bar{X}_{ij})(Y_{ijR} - \bar{Y}_{ijR})}{\left\{ \sum_{t=t_0}^{t=if} (X_{ij} - \bar{X}_{ij})^2 \sum_{t=t_0}^{t=if} (Y_{ijR} - \bar{Y}_{ijR})^2 \right\}^{1/2}} \quad (2.2)$$

donde:

$R$  : Indica que es para la región asociada al Estado de Tlaxcala.

$X$  : Variable independiente, predictor (SST, SLP,  $\zeta_{500}$ , T700)

$Y$  : Variable dependiente, predicando (precipitación acumulada estacional por región)

$r_{ij}$  : Coeficiente de correlación el punto de malla  $ij$

$t_f - t_0$  : Período de la serie de precipitación propia para cada región

El análisis de correlaciones entre un punto y un campo permite:

- a ) Conocer cuantitativamente como están relacionadas dos variables.
- b ) Interpretar dinámicamente la estructura de los patrones de isocorrelaciones como análogos de patrones de anomalías de circulación de gran escala. (Pérez 1997).

Una vez obtenidos los campos de isocorrelaciones se eligen aquellas correlaciones entre precipitación y variables de gran escala con significancia estadística que de preferencia puedan ser interpretadas en términos de dinámica, esto es, patrones climáticamente identificados como teleconexiones. Tal es el caso de patrones como PNA (Pacific/North American Pattern) presente durante años de ENSO. Lo mismo sucede con las isocorrelaciones de temperatura media de las 10 estaciones climatológicas del Estado de Tlaxcala elegidas contra las variables de gran escala, para también ser considerandos los resultados previos con los de otros autores.

#### *ii ) Modelo de regresión lineal multivariado*

Una vez identificados los cuatro puntos de mayor correlación para las zonas de el Golfo de México, Macizo Continental Mexicano, Océano Pacífico y el Ecuador, en la zona en que se presenta el evento climatológico de EL NIÑO, en la región 3 (obteniendo dos correlaciones positivas y dos negativas), en los cuatro campos de gran escala (*SST*, *SLP*, *ζ500*, *T700*), (tabla 2) una vez obtenidas las correlaciones, se extraen de la base de datos de estas variables, sus series de tiempo correspondientes a la precipitación total acumulada y temperatura media mensual, se forma una matriz para cada estación climatológica del Estado de Tlaxcala, contra las variables de gran escala, la matriz queda conformada por 19 columnas, la primera representa el período (número de años de la serie climática), la segunda es la variable utilizada que puede ser (precipitación total acumulada o temperatura media mensual según sea el caso), las columnas 2 a 5 son el valor de la (*SLP*) para cada uno de los puntos de mayor correlación, las columnas 6 a 9 corresponden a la (*SST*), de la 10 a la 13 es la (*T700* mb) y, las últimas cuatro columnas son la (*ζ500* mb) o vorticiad, se aplica un análisis de regresión lineal multivariada con un modelo *step-wise*. El algoritmo *step-wise* parte de un modelo con un gran número de posibles variables independientes, que

se van eliminando si éstas no son estadísticamente significativas. El algoritmo reingresa al modelo variables que se vuelven significativas cuando otras variables son removidas. Así se obtiene un conjunto pequeño de variables significativas que integran el modelo de regresión lineal multivariado.

Las ecuaciones de regresión lineal multivariada presentan el siguiente esquema:

$$Y = \beta + \sum_{i=1}^4 \alpha_i X_i[\lambda, \phi] \quad (2.3)$$

donde, Y es la variable independiente (precipitación), X<sub>i</sub> la i-ésima variable independiente localizada en la longitud λ y la latitud φ y α, β son constantes del modelo de regresión.

En total se dispondrá de 44 ecuaciones de regresión, una por región, 12 para precipitación (pcp) de invierno, 12 para verano, 10 para temperatura (tmp.) de verano y 10 para tmp. de invierno donde la variable dependiente es la precipitación o la temperatura media mensual, según sea el caso. Una vez obtenidos los valores observados medios de la anomalía, se procede a graficar en el paquete computacional SURFER 32 para obtener los mapas del Estado de Tlaxcala para el modelo estadístico NCAR 2xCO2- el control de precipitación de verano e invierno y el modelo estadístico NCAR 2xCO2- el control de temperatura de verano e invierno, cabe mencionar que de esta manera se está haciendo una reducción de escala, y ahora cada estación climatológica representa una región haciendo un total de 12 para el Estado de Tlaxcala (Pérez 1997).

No Y NOMBRE DE ESTACIÓN CLIM.	REGION. GOLFO DE MÉXICO.	CONTINENTE	OCEANO PACÍFICO	ECUADOR
01 APÍZACO	-70W, 25N 6+	-132.5W, 42.5N 5+	-120W, 25N 4-	-100W, -12.5S 4-
02 ATLANGA	-70W, 25N 5+	-127.5W, 45.2N 4+	-120W, 25N 4-	-100W, 0.5N 5+
03 HUAMANTLA	-110W, 32.5N 3-	-75W, 7.5N 5-	-130W, 45N 5-	-100W, 2.5N 4+
04 TLAXCALA	-70W, 27.5N 5+	-135W, 42.5N 5+	-120W, 25N 4-	-102.5W, 0.5N 3+
05 TLAXCO	-65W, 25N 6+	-130W, 45N 4+	-120W, 25N 3-	-100W, 0.5N 5+
06 EL CARMÉN T.	-90W, 25N 5+	-132.5W, 45N 4+	-122.5W, 25N 4-	-102.5W, 0.5N 5+

07 CALPULALPAN	-75W, 25N 5+	-105W, 32.5N 3-	-117.5W, 12.5N 4+	-102.5W, 0.5N 4+
08 IXTACUÍXTLA	-65W, 32.5N 4+	-122.5W, 45N 5+	-105W, 5N 6+	-130W, 22.5N 4-
09 TEPETITLA	-110W, 35N 2-	-150W, 32.5N 6+	-130W, 22.5N 5-	-107.5W, 0.5N 6+
10 ESPANITA	-65W, 25N 5+	-120W, 45N 5+	-97.5W, 17.5N 3-	-77.5W, 0.5N 5+
11 TOCATLAN	-72.5W, 25N 4+	-92.5W, 42.5N 3-	-120W, 15N 2+	-100W, 2.5N 3+
12 ZITLALTEPEC	-75W, 25N 6+	-95W, 17.5N 4-	-160W, 15N 4-	-102.5W, 0.5N 5+

Tabla 2 : Puntos de mayor correlación de precipitación de invierno con vorticidad

No Y NOMBRE DE ESTACIÓN CLIM.	REGIÓN. GOLFO DE MÉXICO.	CONTINENTE	OCEANO PACÍFICO	ECUADOR
01 APIZACO	-150W, 30N 3-	-112.5W, 22.5N 4+	-95W, 20N 4+	-127W, -10S 4+
02 ATLANGA	-117.5W, 20N 3-	-95W, 12.5N 4+	-80W, 15N 7+	-40W, 27.5N 3-
03 HUAMANTLA	-120W, 30N 3-	-92.5W, 12.5N 4+	-80W, 17.5N 5+	-60W, 42.5N 3-
04 TLAXCALA	-150W, 32.5N 4-	-92.5W, 10N 4+	-60W, 15N 6+	-70W, 32.5N 4-
05 TLAXCO	-147.5W, 17.5N 6+	-95W, 20N 2+	-60W, 25N 4+	-160W, 30N 4-
06 EL CARMEN T.	-150W, 30N 4-	-140W, 15N 4+	-42.5W, 32.5N 4+	-102.5W, 12.5N 1-
07 CALPULALPAN	-145W, 17.5N 6+	-100W, 12.5N 4+	-95W, 22.5N 4+	-60W, 25N 4+
08 IXTACUÍXTLA	-150W, 35N 5-	-115.5W, 22.5N 4+	-60W, 17.5N 5+	-120W, 12.5N 2-
09 TEPETITLA	-95W, 20N 4+	-80W, 15N 6+	-140W, 35N 3-	-70W, 35N 3-
10 ESPANITA	-60W, 25N 4-	-110W, 12.5N 3+	-140W, 25N 5-	-85W, 25N 2+

Tabla 3 : Puntos de mayor correlación de temperatura media ambiente de verano con S:S:T.

No Y NOMBRE DE ESTACIÓN CLIM.	REGIÓN. GOLFO DE MÉXICO.	CONTINENTE	OCEANO PACÍFICO	ECUADOR
01 APIZACO	-92.5W, 22N 2-	-110W, 15N 3-	-180W, 30N 2+	-132.5W, -5 S 3+
02 ATLANGA	-65W, 22.5N 4+	-112.5W, 17.5N 6-	-140W, 0 E 3+	-95W, 22.5N 1-
03 HUAMANTLA	-90W, 25N 2-	-110W, 17.5N 5-	-125W, -2.5 S 3-	-70W, 15N 2+
04 TLAXCALA	-90W, 27.5N 3-	-107.5W, 7.5N 2+	-47.5W, 30N 4-	-130W, 25N 2-
05 TLAXCO	-100W, 10N 3-	-150W, 5N 4-	-175W, 27.5N 4+	-90W, 25N 3-
06 EL CARMEN T.	-100W, -2.5S 3-	-107.5W, 15N 3-	-92.5W, 20N 1+	-80W, 12.5N 4+
07 CALPULALPAN	-160W, 7.5N 4-	-112.5W, 17.5N 4-	-72.5W, 25N 3+	-170W, 25N 1+
08 IXTACUÍXTLA	-110W, 17.5N 5-	-170W, 12.5N 5-	-90W, 25N 2-	-160W, 27.5N 5+
09 TEPETITLA	-110W, 17.5N 5-	-90W, 25N 3+	-160W, 27.5N 5+	-122.5W, 12.5N 3+
10 ESPANITA	-117.5W, 12.5N 4+	-90W, 22.5N 4-	-90W, 0 E 2-	-50W, 25N 3+
11 TOCATLAN	-135W, 2.5N 6-	-92.5W, 27.5N 5-	-142.5W, 30N 3+	-110W, 17.5N 4-
12 ZITLALTEPEC	-107.5W, 20N 5-	-145W, 30.5N 4+	-45W, 30N 5-	-78W, 15N 2+

Tabla 4 : Puntos de mayor correlación de precipitación de verano con SST

No Y NOMBRE DE ESTACIÓN CLIM.	REGIÓN. GOLFO DE MÉXICO.	CONTINENTE	OCEANO PACÍFICO	ECUADOR
01 APIZACO	-117.5W, 12.5N 4+	-155W, 42.5N 4+	-77.5W, 27.5N 3-	-130W, -32.5N 3+
02 ATLANGA	-117.5W, 12.5N 2+	-65W, 27.5N 4-	-150W, 42.5N 3-	-90W, 10N 1-

03 HUAMANTLA	-67.5W, 29N 5-	-147.5W, 42.5N 4-	-135W, 30N 2+	-117.5W, 12.5N 2+
04 TLAXCALA	-67.5W, 27.5N 3-	-152.5W, 42.5N 4-	-130W, 32.5N 3+	-117.5W, 12.5N 4+
05 TLAXCO	-77.5W, 27.5N 3-	-162.5W, 37.5N 4-	-130W, 32.5N 4+	-117.5W, 12.5N 4+
06 EL CARMEN T.	-87.5W, 17.5N 3+	-175W, 12.5N 4-	-157.5W, 25N 3-	-102.5W, 7.5N 2+
07 CALPULALPAN	-52.5W, 32.5N 3+	-137.5W, 37.5N 3+	-150W, 25N 3-	-100W, 15N 4+
08 IXTACUIXTLA	-85W, 27.5N 2-	-162.5W, 27.5N 4-	-127.5W, 17.5N 4+	-87.5W, 2.5N 4+
09 TEPETITLA	-85W, 27.5N 2-	-162.5W, 27.5N 4-	-119W, 17.5N 6+	-87.5W, 2.5N 4+
10 ESPANITA	-65W, 30N 2-	-87.5W, 27.5N 4+	-120W, 2.5N 2+	-110W, 12.5N 3-

Tabla.5. : Puntos de mayor correlación de temperatura media ambiente de invierno con S:S T

## 2.2.5 Escenarios de cambio climático en Tlaxcala

### *Los campos de precipitación y temperatura*

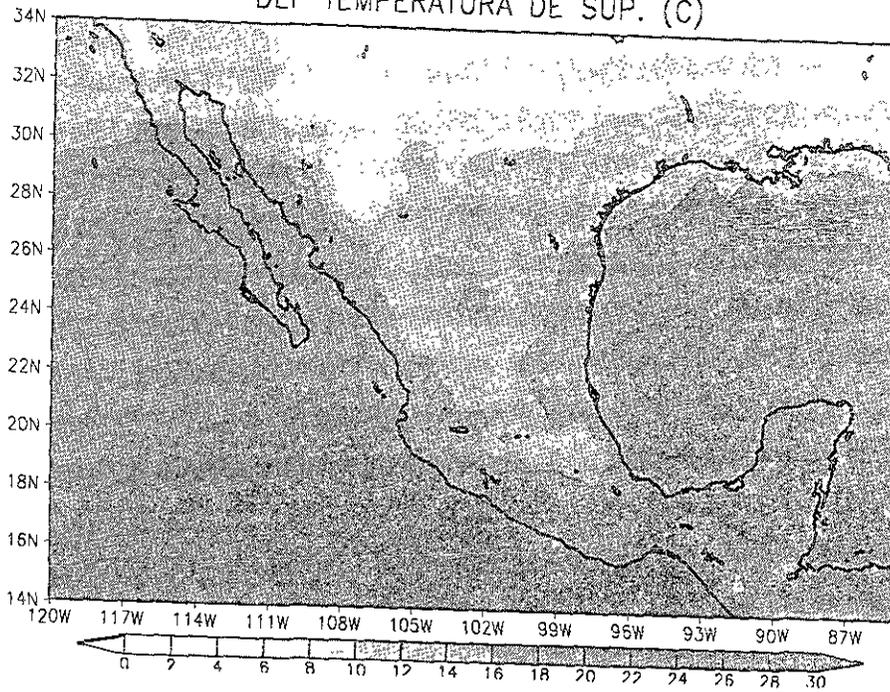
Con el propósito de tener patrones climáticos de precipitación y temperatura, para el invierno y verano, y tenerlos como referencia de comparación en la creación de los escenarios climáticos, se consideraron las series de los campos climatológicos generados por Legates y Wilmott (1990) los cuales tienen una resolución espacial de  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  (Fig. 2.2) los cuales, para los casos de temperatura (figs. 2.2 y 2.3) se observa que es posible determinar un patrón climatológico de temperaturas para el Estado de Tlaxcala a partir de datos de gran escala, así también, el campo de precipitación muestra un patrón bien definido, la temperatura ambiente, para la mayor parte del país es de  $12^{\circ}\text{C}$  aproximadamente esta temperatura queda registrada para la mayor parte del Estado de Tlaxcala al realizar un acercamiento o zoom, para el verano (JJA) (fig. 2.3) casi todo el país presenta un rango de temperatura entre  $14^{\circ}\text{C}$  a  $16^{\circ}\text{C}$ , quedando de igual manera el Estado de Tlaxcala dentro de este rango.

Para referirnos a la variabilidad climática de la precipitación, es necesario conocer la distribución global, regional y local de esta variable, para poder evaluar la calidad del GCM en simulaciones de precipitación, se requiere que las corridas o experimentos de control que se realicen, reproduzcan al menos en aproximación, la distribución de la precipitación observada

Para el caso de la precipitación con este banco de datos utilizado, en el invierno (fig.2.4), (DJF) la mayor precipitación ocurre en el sur de la República Mexicana debido en parte al paso de frentes fríos (“Nortes”) cuya frecuencia es mayor en esta temporada del año. Para Tlaxcala la máxima precipitación se registra al noreste disminuyendo en la mayor parte del mismo, esto por una influencia de gran escala producida por los nortes. Durante el verano (fig. 2.5) la zona Sur del país es la más lluviosa, debido a la presencia de la Zona Inter-Tropical de Convergencia (ITZC, por sus siglas en inglés), mientras que en el centro del país y al norte se observa una disminución de la misma, para el Estado de Tlaxcala al realizar un zoom, esta información de gran escala también es registrada, se observa un máximo en la zona norte y suroeste del mismo, son las zonas más productiva del Estado, también se observa una precipitación casi generalizada con un rango cercano a los 500 mm de precipitación.

LEGATES-WILMOTT

DEF TEMPERATURA DE SUP. (C)



ESCALA APROX 1.80 000 000

DEF TEMPERATURA (°C) LEGATES-WILMOTT

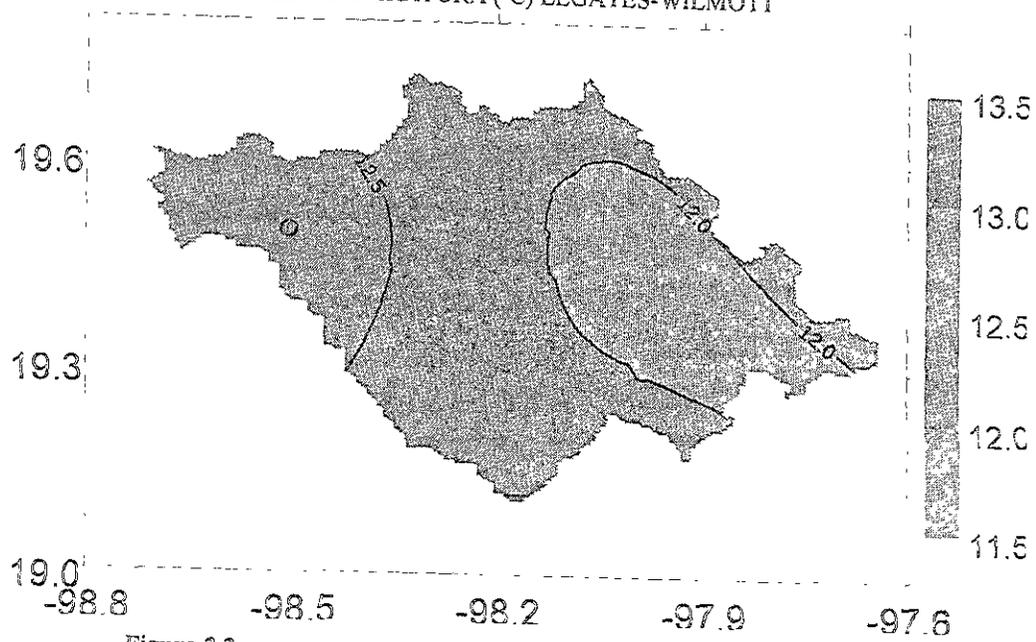


Figura 2.2: Patrones climatológicos de temperatura (°C) para México y el Estado de Tlaxcala, invierno (DEF). ESCALA APROX 1 50 000

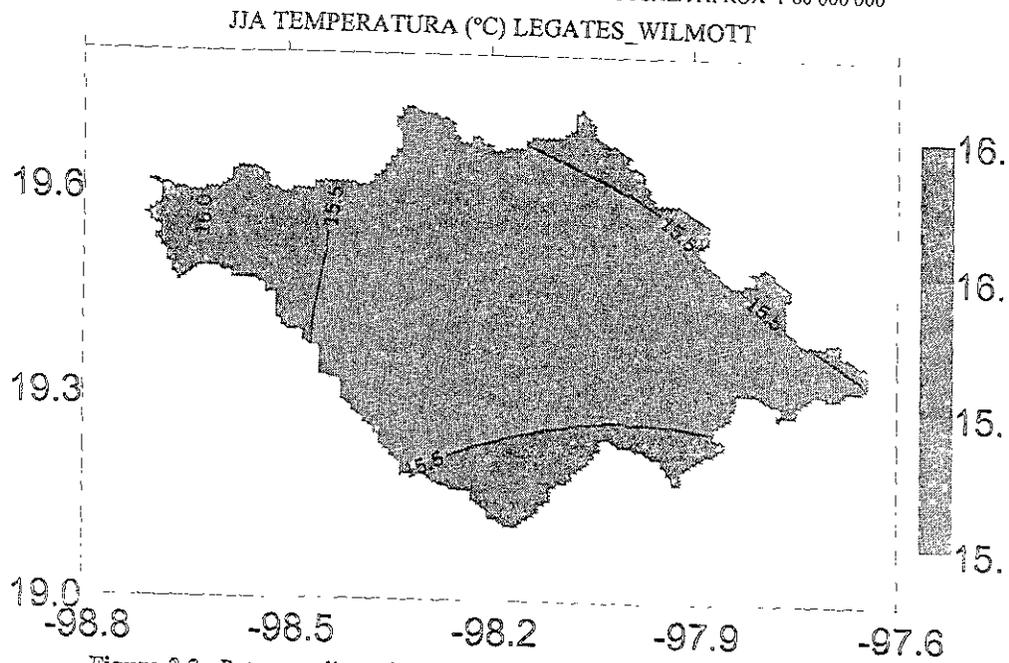
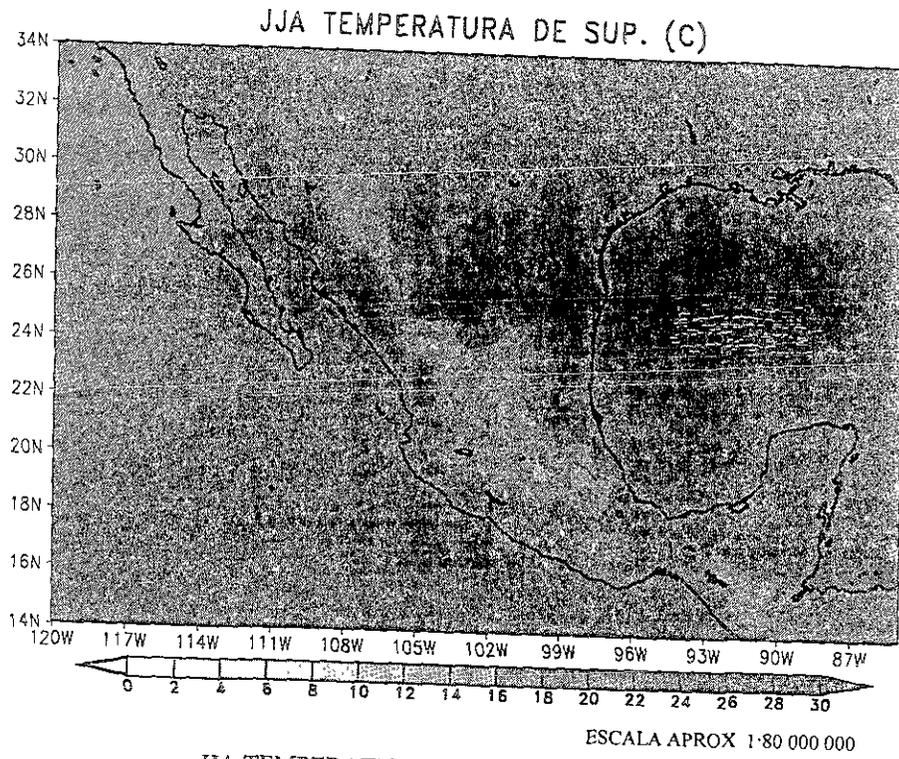
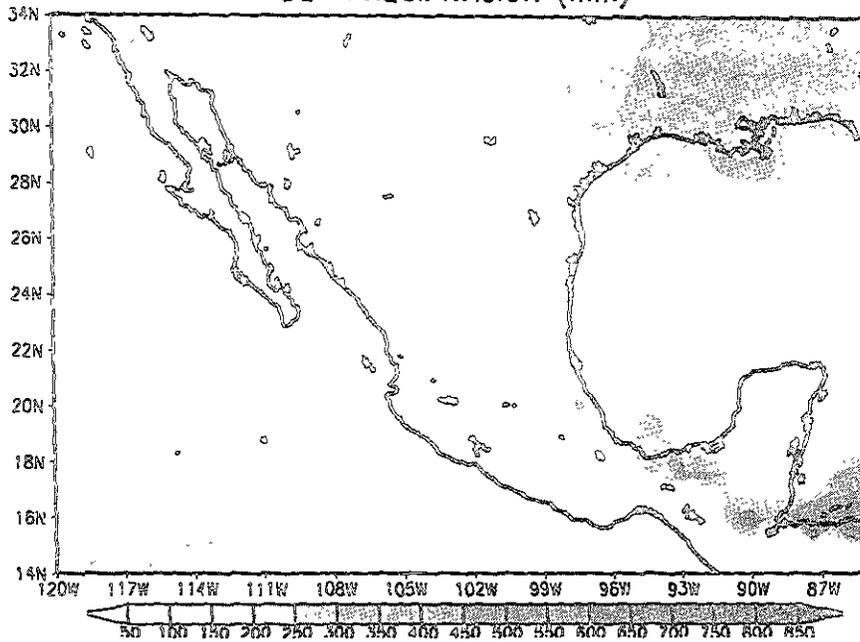


Figura 2.3: Patrones climatológicos de temperatura (°C) para México y el Estado de Tlaxcala, verano (JJA).

LEGATES\_WILMOTT

DEF PRECIPITACION (mm)



ESCALA APROX 1: 80 000 000

DEF. PRECIPITACIÓN (mm) LEGATES-WILMOTT

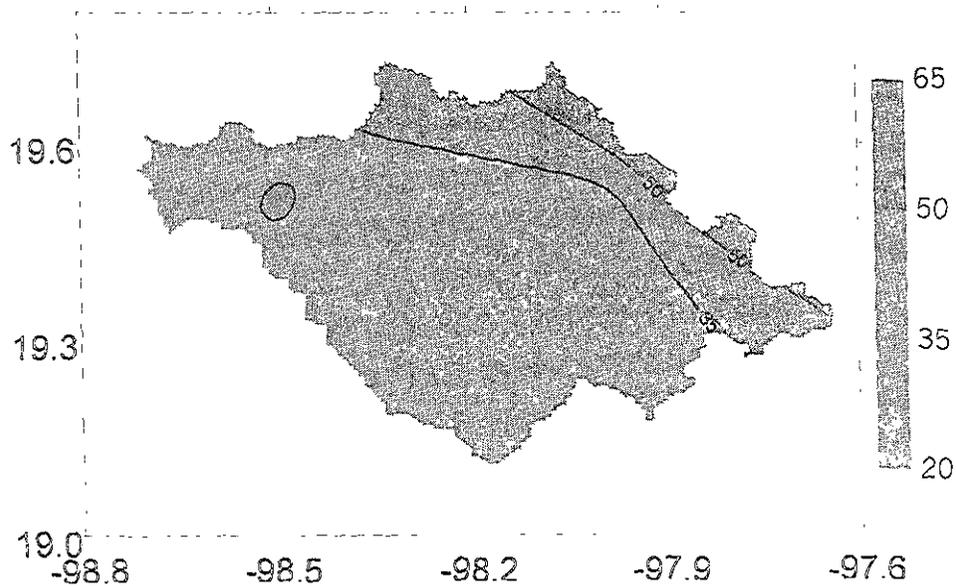
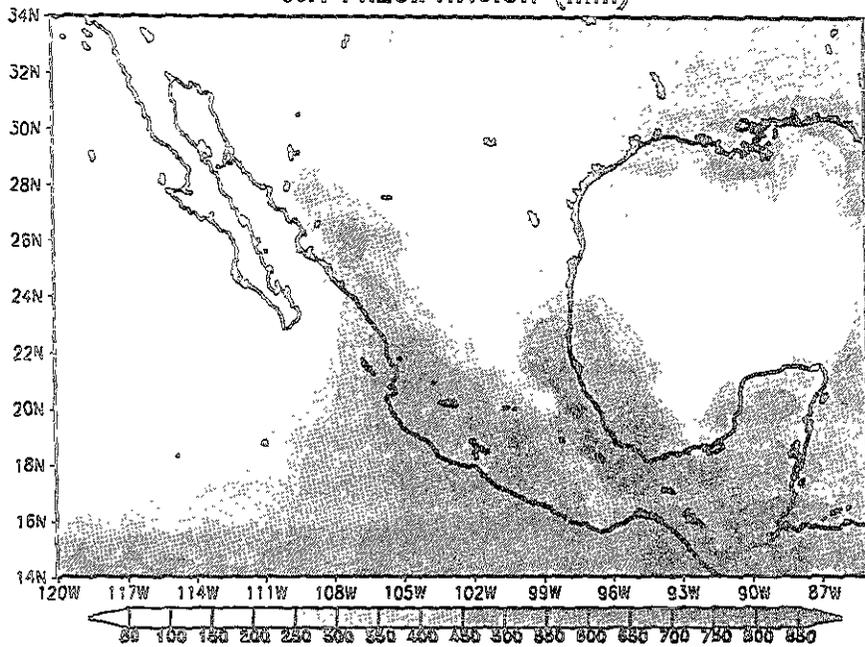


Figura 2.4: Patrones climatológicos de precipitación acumulada (mm) para México y el Estado de Tlaxcala para invierno (DEF).  
ESCALA APROX 1: 50 000

LEGATES\_WILMOTT

JJA PRECIPITACION (mm)



ESCALA APROX 1: 80 000 000

JJA PRECIPITACIÓN (mm) LEGATES-WILMOTT

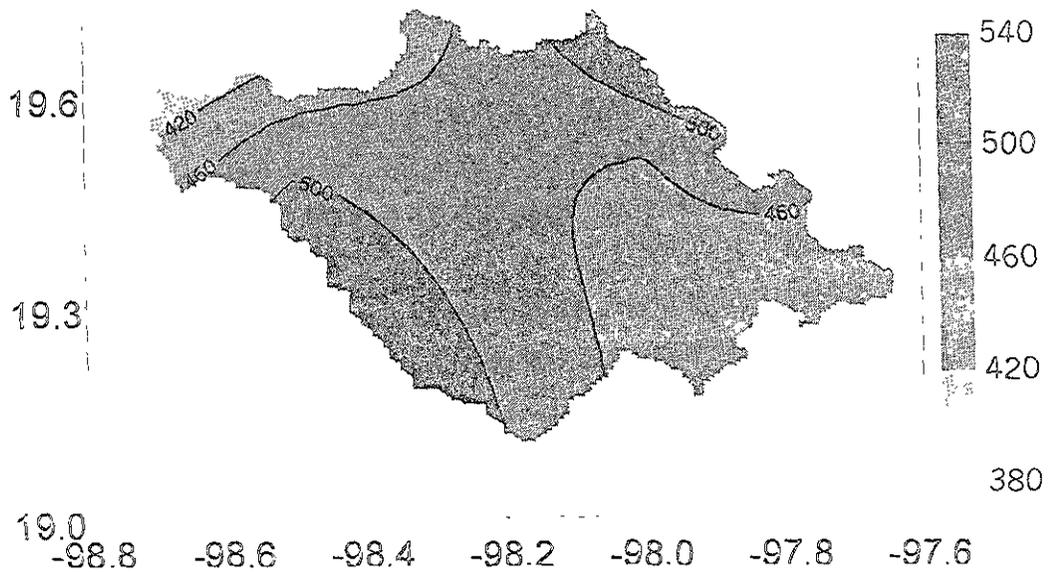


Figura 2.5: Patrones climatológicos de precipitación acumulada (mm) para México y el Estado de Tlaxcala, verano (JJA).  
ESCALA APROX 1: 50 000

Las proyecciones de cambio climático inducido por un incremento en la concentración de gases de invernadero se han realizado en base a experimentos con un GCM que consideran las interacciones atmósfera - océano - continente - biósfera - criósfera.

El GCM NCAR acoplado a modelos de océano, utilizado en experimentos climáticos de duplicación en las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico, corresponde a integraciones de más de 70 años. En dicho experimento se tiene una "corrida de control" en la que la concentración de CO<sub>2</sub> no varía en el tiempo, y otra, llamada "corrida anómala", en la que varía la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico hasta llegar al nivel del doble que el inicial. Las salidas o campos climatológicos generados en este experimento numérico son la base de los análisis de cambio climático. Sin embargo, los resultados de este estudio sólo permiten tener una idea de los cambios climáticos que ocurrirán a gran escala, por lo que para estimar los cambios a escala regional del Estado de Tlaxcala es necesario realizar procesamientos adicionales de los campos que el GCM entrega.

## 2.2.6 Los experimentos 2×CO<sub>2</sub> - 1×CO<sub>2</sub>

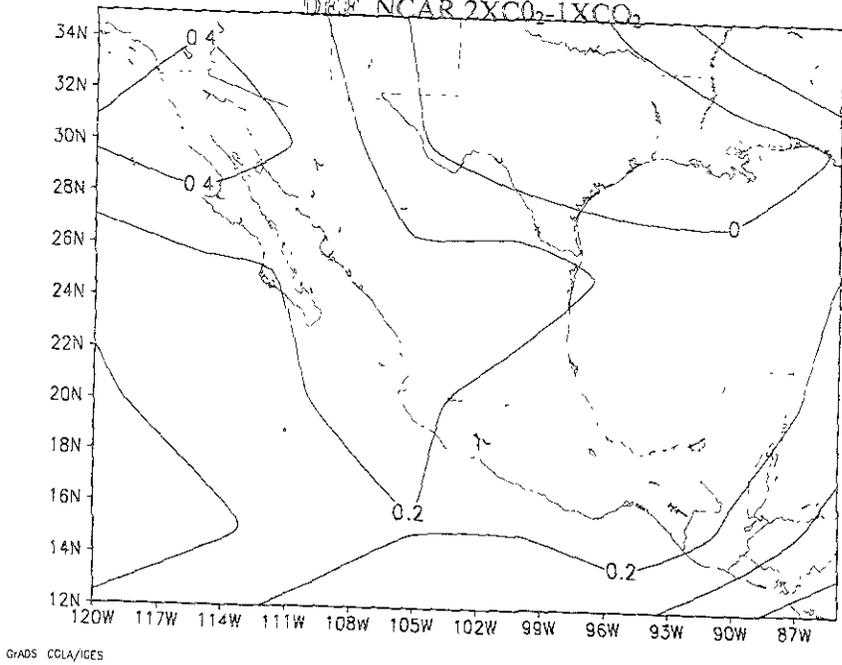
### 1) *Los cambios en la temperatura superficial*

Con los patrones climáticos de temperatura y precipitación que se tienen como referencia para la República Mexicana, por el banco de datos climatológicos generados por Legates y Wilmott, se tienen las climatologías para la República Mexicana y el Estado de Tlaxcala.

Se puede considerar que las simulaciones climatológicas de temperatura superficial continental son en general más adecuadas que las de precipitación. Los modelos de circulación general dan una buena aproximación de los valores observados de temperatura, a escala sinóptica para esta variable, el modelo NCAR nos da un valor muy parecido en consistencia al existente en la República Mexicana, y al realizar un zoom para el Estado de Tlaxcala, conserva el gradiente de temperatura, en la magnitud de las anomalías (2XCO<sub>2</sub>-1XCO<sub>2</sub>), se puede decir que el calentamiento sobre la mayor parte del país, de acuerdo a lo que arroja la creación de este escenario, si se presentara un doblamiento de CO<sub>2</sub>, en

aproximadamente 75 años, será de entre 0.2 y 0.4°C para el noroeste de la República Mexicana en la zona de Baja California Norte y para el resto del país de 0.2°C (Fig. 2.6), analizando la región del Estado de Tlaxcala, el incremento de la temperatura se encuentra en el rango de 0.2°C y 0°C para casi todo el Estado con un comportamiento en el avance de la temperatura del sureste al noroeste, mientras que para el verano (Fig. 2.7), la simulación para la República Mexicana sería de un incremento que va de sureste al noroeste con un incremento de 0.6°C a 2.6°C ; en la región del Estado de Tlaxcala queda comprendida entre el rango de 0.5°C a 0.6°C y con un desplazamiento de sureste al noroeste nuevamente, tal concordancia en las simulaciones de temperatura de superficie se debe principalmente a que, por un lado, el campo de temperatura de superficie sobre la República Mexicana y el Estado de Tlaxcala está altamente relacionado con la temperatura a 700 mb, (*T700 mb*) y la vorticidad (*ζ500*) las cuales son simuladas a escala sinóptica de forma adecuada por el modelo de circulación general. Por otro lado, la temperatura en superficie depende en gran medida de los flujos de calor en la superficie. El modelo NCAR, sin embargo, no presenta ajuste de flujos de calor, por lo que los valores de temperatura de superficie que simula, aunque parecidos en su estructura espacial a los observados, están sistemáticamente por debajo de los reales.

ANOMALIAS DE TEMPERATURA EN SUP.  
DEF NCAR 2XCO<sub>2</sub>-1XCO<sub>2</sub>



GRADS CCLA/ICES

ESCALA APROX 1 80 000 000

ANOMALIAS DE TEMPERATURA EN SUPERFICIE  
DEF NCAR 2XCO<sub>2</sub>-1XCO<sub>2</sub>

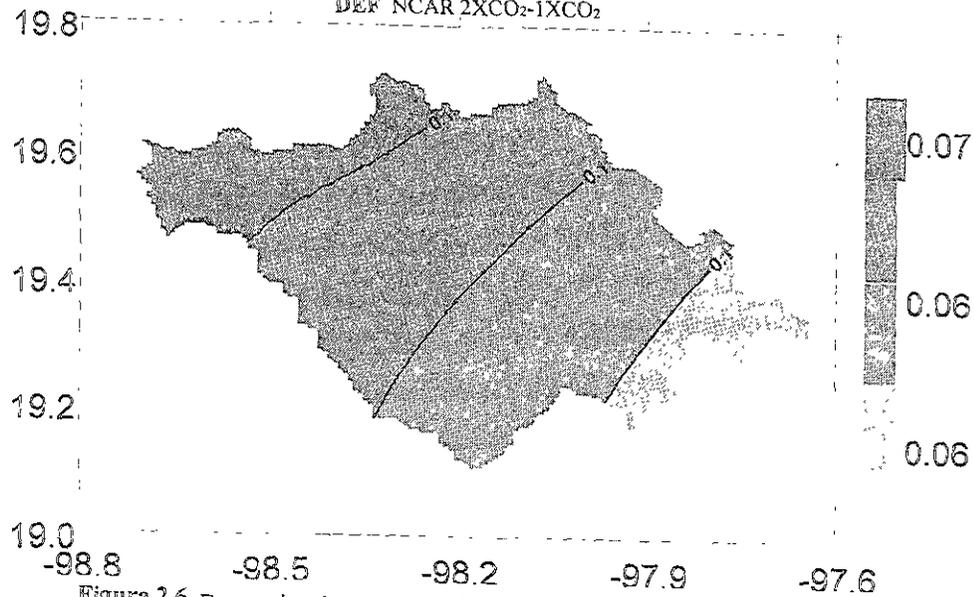


Figura 2.6 Escenarios de anomalías de temperatura de superficie (°C) obtenidos del experimento 2xCO<sub>2</sub> - 1xCO<sub>2</sub> para el invierno (DJF) dados por el GCM NCAR

ESCALA APROX 1 50 000

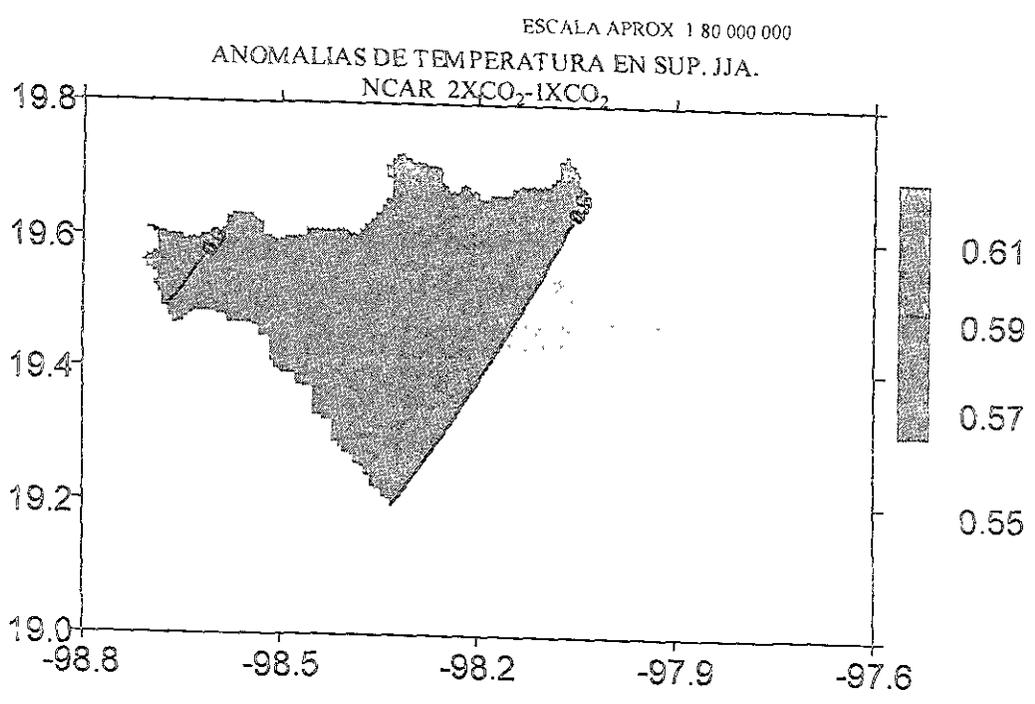
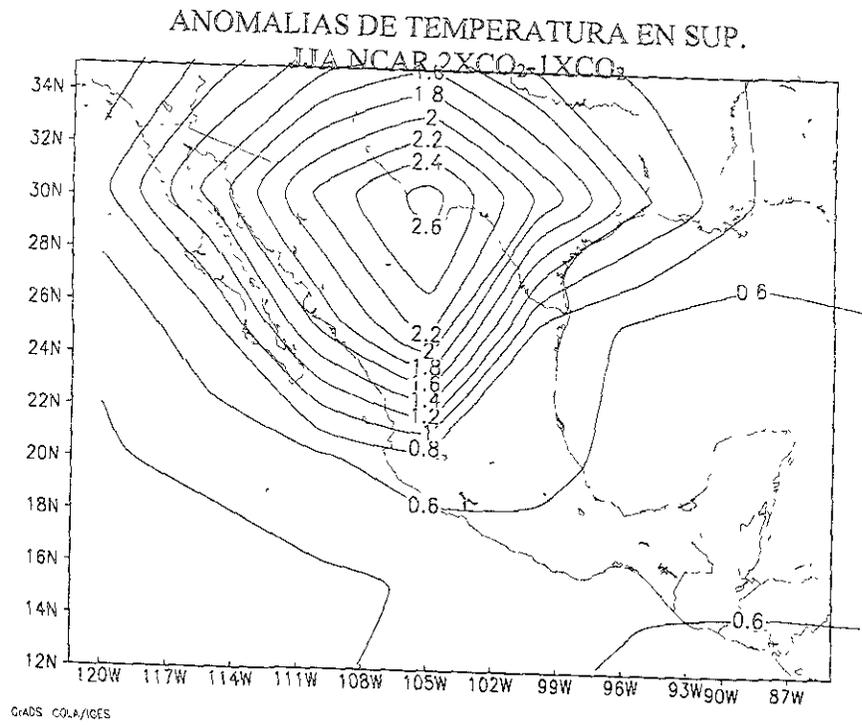


Figura 2.7 Escenarios de anomalías de temperatura de superficie (°C) obtenidos de los experimentos 2xCO<sub>2</sub> - 1xCO<sub>2</sub> para el verano (JJA) dados por el GCM NCAR ESCALA APROX 1 50 000

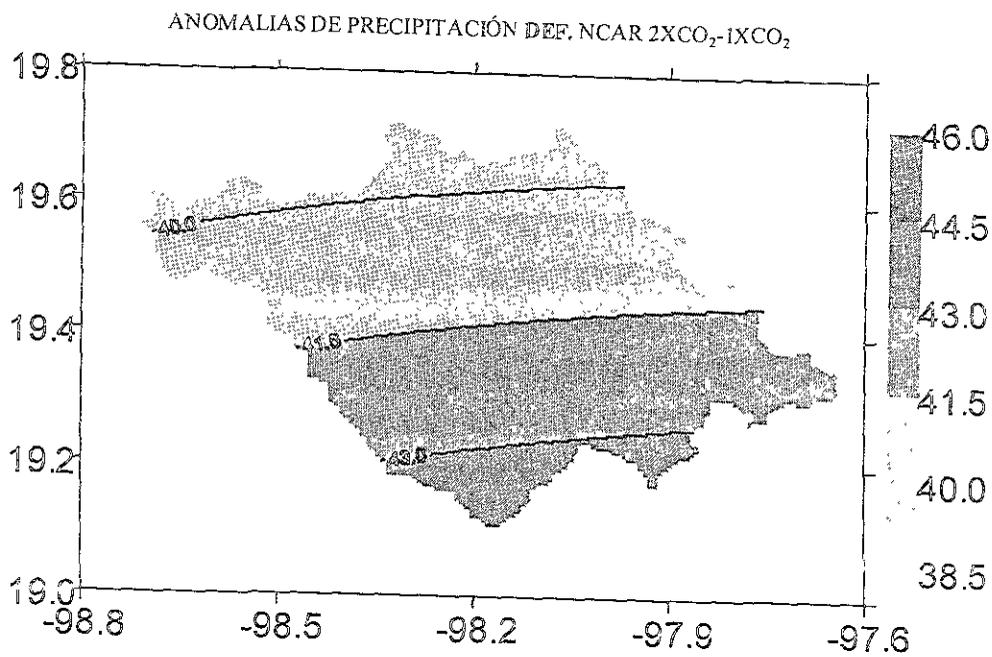
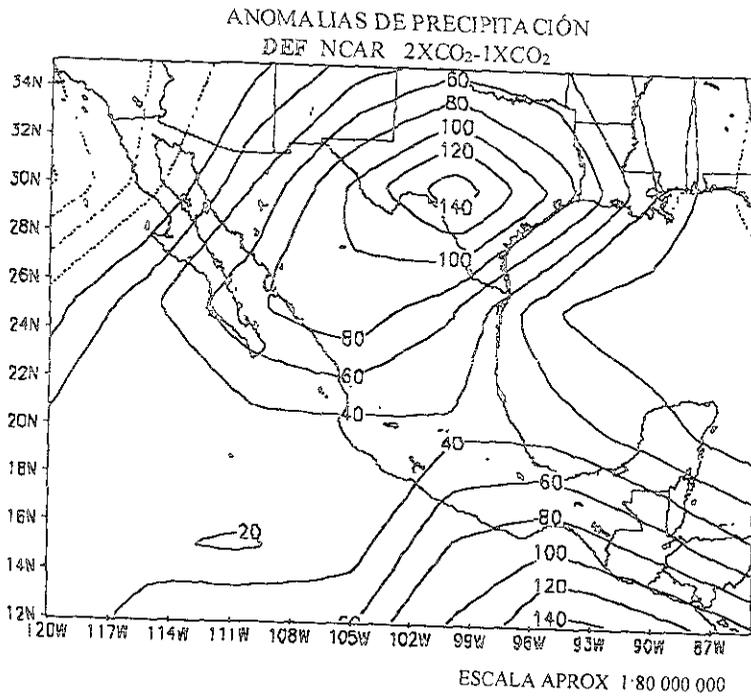
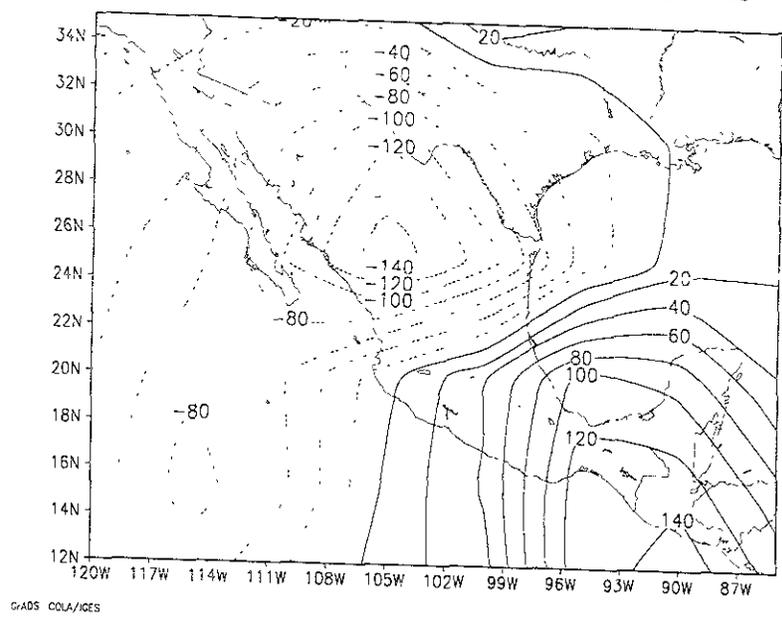


Figura 2.8 Escenarios de anomalías de precipitación (mm) obtenidos de los experimentos 2xCO<sub>2</sub> - 1xCO<sub>2</sub> para el invierno (DEF) dados por el GCM NCAR

ANOMALIAS DE PRECIPITACIÓN JJA NCAR 2XCO<sub>2</sub>-1XCO<sub>2</sub>



ESCALA APROX 1 80 000 000

ANOMALIAS DE PRECIPITACION  
JJA NCAR 2XCO<sub>2</sub>-1XCO<sub>2</sub>

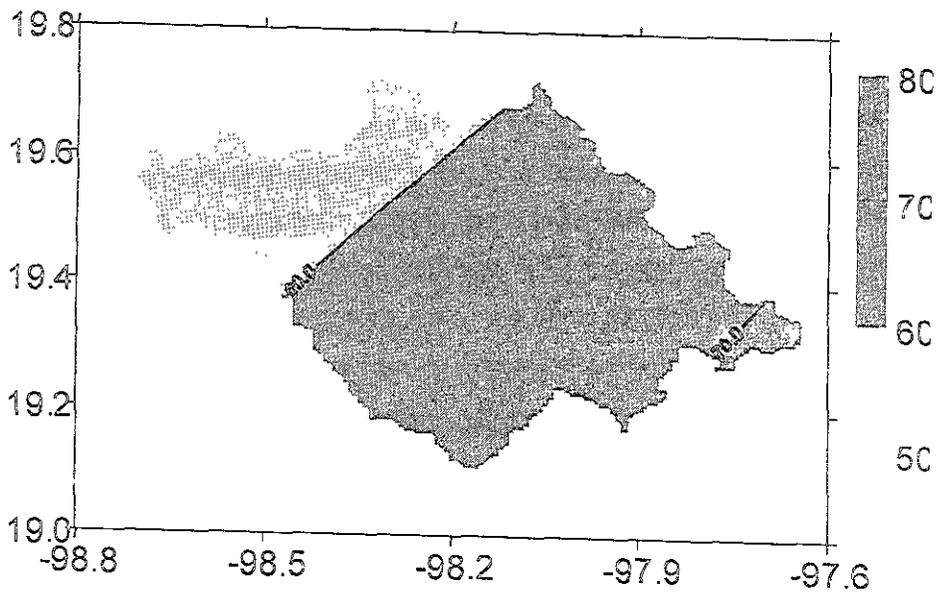


Figura 2.9 Escenarios de anomalías de precipitación (mm) obtenidos de los experimentos 2xCO<sub>2</sub> - 1xCO<sub>2</sub> para el verano (JJA) dados por el GCM NCAR  
ESCALA APROX 1 50 000

Los cambios más difíciles de determinar, sin embargo, son los de precipitación. Su simulación no es muy adecuada por involucrar una gran cantidad de procesos físicos en todo tipo de escalas espaciales y temporales, además de que es necesario asegurar conservar propiedades importantes de los procesos de la lluvia tales como: intermitencia, estacionalidad y un comportamiento multifractal. (Koutsoyiannis y Pachakiis, 1996). Por ello, la generación de escenarios regionales de cambios en precipitación asociados al aumento de gases de invernadero requiere un tratamiento especial.

Bajo este mismo esquema de análisis con los datos climatológicos de la República Mexicana, los escenarios de anomalías de precipitación, que presenta el acercamiento para el estado, se observa que para el invierno (DJF) (fig. 2.8) la mayor cantidad de precipitación se registraría en la zona sur, área de influencia de la montaña la Malintzi, disminuyendo ligeramente hacia el norte. Durante el verano (JJA), (fig. 2.9) se registra un máximo en la zona este en la población de Calpulalpan incrementándose hacia el sureste con un máximo en el este lugar en el que se localiza la zona más desértica del Estado (El Carmen Tequexquitla).

El modelo presenta algunas limitaciones para simular los campos de precipitación pero se puede analizar lo que predice, bajo un escenario de cambio en el clima del planeta por incremento en los gases de invernadero. Los patrones de cambio se obtienen al calcular la diferencia entre los campos de precipitación y el experimento anómalo y el de control. Las anomalías de precipitación de invierno son mejores simuladas que para los del verano, al menos en lo que a magnitud se refiere.

Por lo tanto para generar un escenario en los campos de temperatura y precipitación ante un posible doblamiento del CO<sub>2</sub> para las estaciones de invierno y verano, es necesario aplicar una metodología que permita la reducción de escala, este método se conoce como “*downscaling*”, que permite deducir anomalías de precipitación regional a partir de campos de gran escala, de esta manera ahora cada estación climatológica va a representar una región, y, por lo tanto se tendrán 12 regiones climatológicas para la creación de escenarios

de precipitación de verano e invierno y 10 regiones para temperatura media ambiente, para invierno y verano.

En la siguiente sección será explicado cada paso de la metodología que fue seguida para este fin, así como los resultados obtenidos.

# Capítulo 3

---

## 3.1 Modelo estadístico regional de precipitación

### 1) *Correlaciones de precipitación con variables de gran escala*

Como se mencionó anteriormente, una de las metodologías de escalamiento propuestas consiste en encontrar las relaciones estadísticas estacionales entre las variables predictando (temperatura y precipitación regional para el Estado de Tlaxcala) a las variables predictoras (campos de gran escala observados de  $\zeta_{500}$ ,  $T_{700}$ ,  $SLP$  y  $SST$ ). Para esto, se obtienen patrones de correlación entre la temperatura y la precipitación regional con variables de gran escala. Tales relaciones constituyen lo que en Meteorología se conoce como un diagnóstico.

Con el fin de ilustrar el procedimiento seguido ("correlaciones de un punto"), se presenta el análisis para invierno y verano entre variables de gran escala y la precipitación y temperatura ambiente para 4 estaciones climatológicas del Estado de Tlaxcala (Fig. 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4). Los diagnósticos muestran que las correlaciones de precipitación de invierno, la circulación de gran escala modula la variabilidad interanual sobre la parte central de México. Tal conclusión se alcanza al observar que las isocorrelaciones entre  $\zeta_{500}$ ,  $T_{700}$  y  $SLP$  y la precipitación en el Estado de Tlaxcala corresponden al patrón del Pacífico Norte América (PNA) asociado a un tren de onda estacionario, característico de inviernos durante eventos de El NIÑO. Este resultado también se obtiene al analizar la correlación entre  $SST$  y precipitación en esta región. Claramente, se observa que a mayor temperatura en el Pacífico Tropical Centro-Este, mayor precipitación invernal en el altiplano de México. La modulación de la precipitación invernal en la mayor parte del país y la ocurrencia del evento ENSO ha sido analizada por Magaña y Quintanar (1997). Evidentemente, no toda la variabilidad en la precipitación de invierno puede ser explicada por la ocurrencia del ENSO. Existen otros factores de importancia como las anomalías de  $SST$  en el Caribe, circulaciones invernales en los trópicos o las interacciones trópicos - extratropicos que determinan la variabilidad en la temporada invernal de lluvias.

La influencia de factores adicionales al ENSO o de circulaciones de gran escala parece ser más determinante durante el verano. En esta estación, varios factores relacionados con la precipitación y su variabilidad son de menor escala (mesoescala) y de origen puramente tropical (huracanes, ondas del este, monzón de Norteamérica, etc.). Sólo en algunos casos la variabilidad en precipitación regional parece estar asociada a circulaciones atmosféricas de latitudes medias de gran escala, Magaña y Quintanar (1997) han mostrado que tal anticorrelación puede interpretarse en términos de circulaciones directas en niveles inferiores que producen convergencia de humedad en la costa Occidental de México, llevando a un monzón de Norte América más intenso. Las fluctuaciones de temperatura en el Golfo de México, el Caribe y en todo un corredor del Atlántico donde se generan parte de las perturbaciones tropicales características de esta época, también juegan un papel importante. Tal es el caso de los huracanes y ondas del Este que impactan la Península de Yucatán trayendo consigo humedad en forma de precipitación estableciendo el período de lluvias para el Estado de Tlaxcala y muchas regiones del país en esta época del año.

ESTACIÓN CLIMATOLOGICA 05 TLAXCO CORRELACIONES CON PRECIPITACIÓN PARA DEF

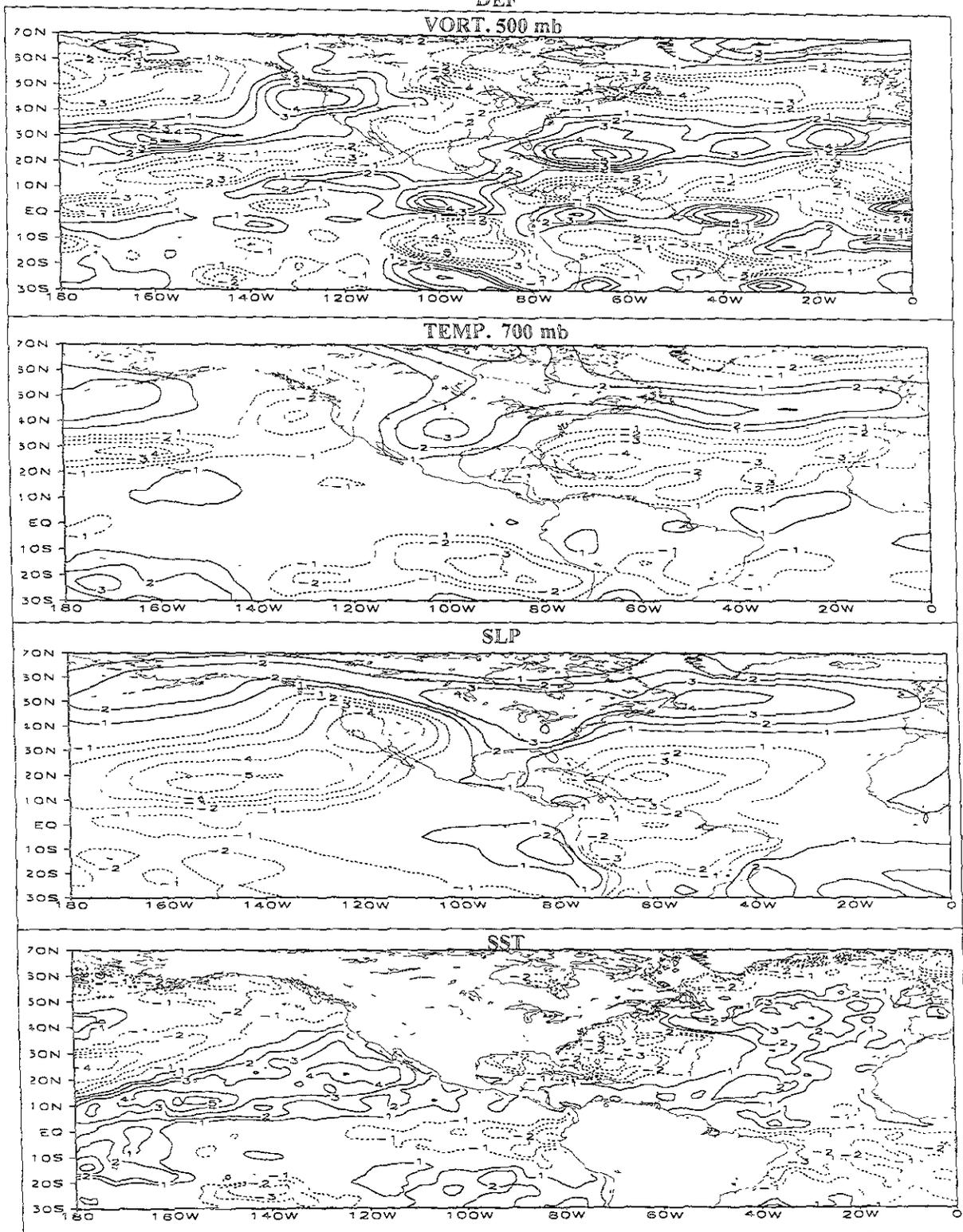


Figura 3.1: Patrones de correlación (x10) entre precipitación de invierno y las variables de gran escala.

ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA 04 TLAXCALA CAPITAL CORRELACIONES CON  
PRECIPITACIÓN PARA JJA

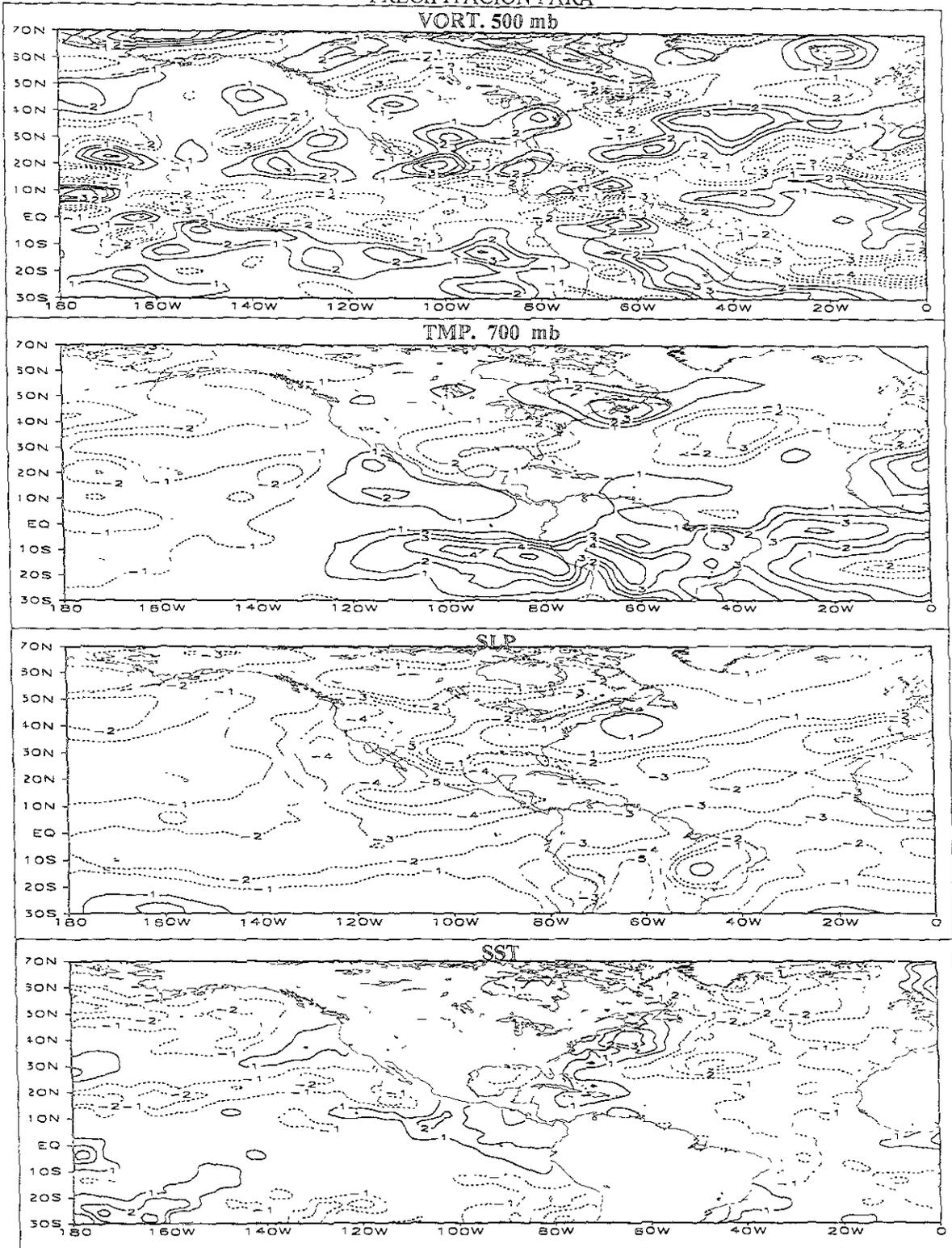


Figura 3.2: Patrones de correlación (x10) entre precipitación de verano y las variables de gran escala.

ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA 03 HUAMANTLA CORRELACIONES CON TEMPERATURA  
 PARA DEF

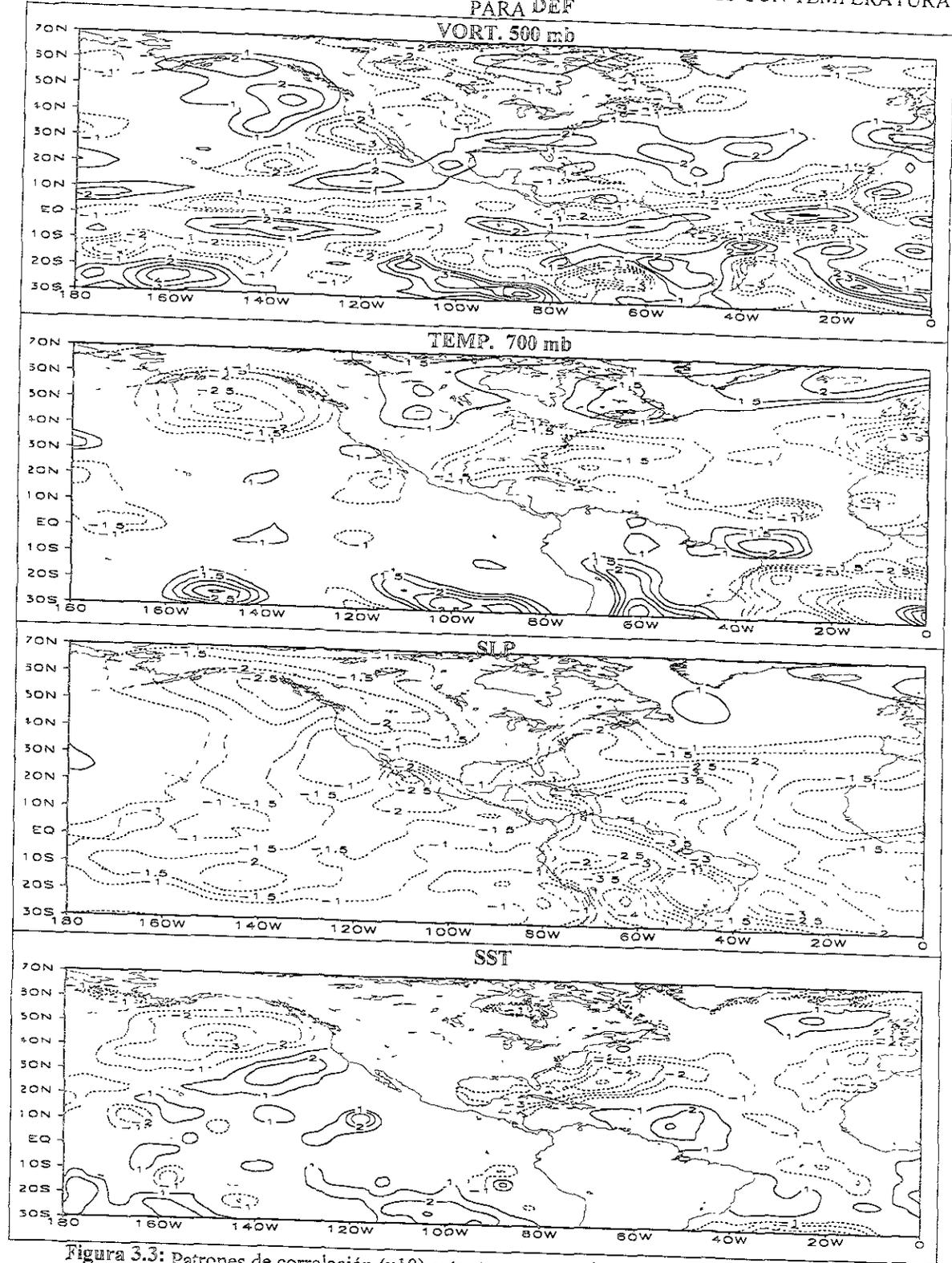
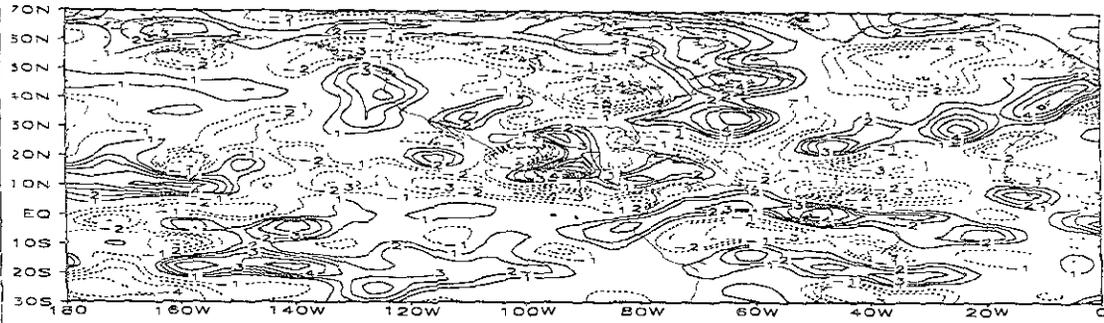


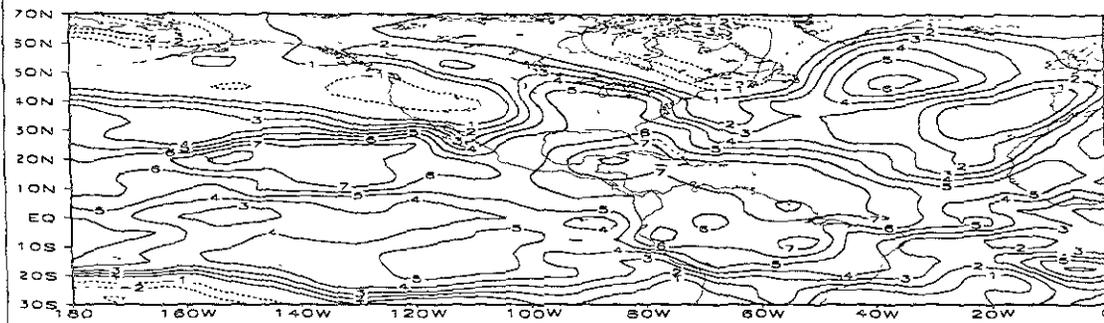
Figura 3.3: Patrones de correlación (x10) entre temperatura de invierno y las variables de gran escala.

ESTACIÓN CLIMATOLOGICA 08 IXTACUIXTLA CORRELACIONES CON TEMPERATURA  
PARA JJA

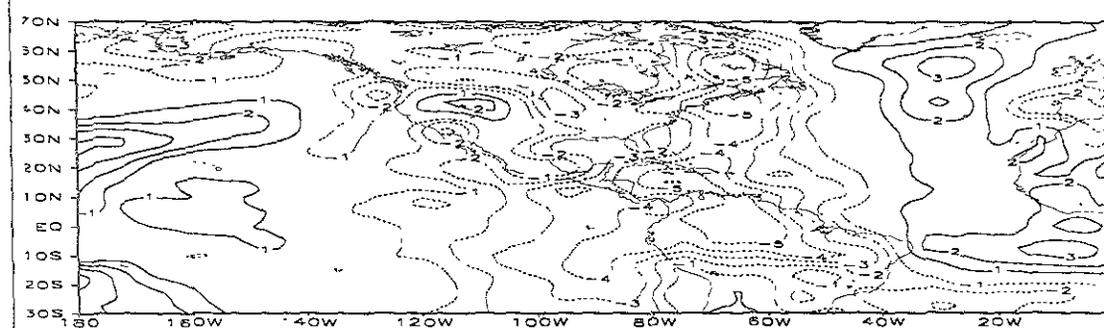
VORT. 500 mb



TEMP. 700 mb



SLP



SST

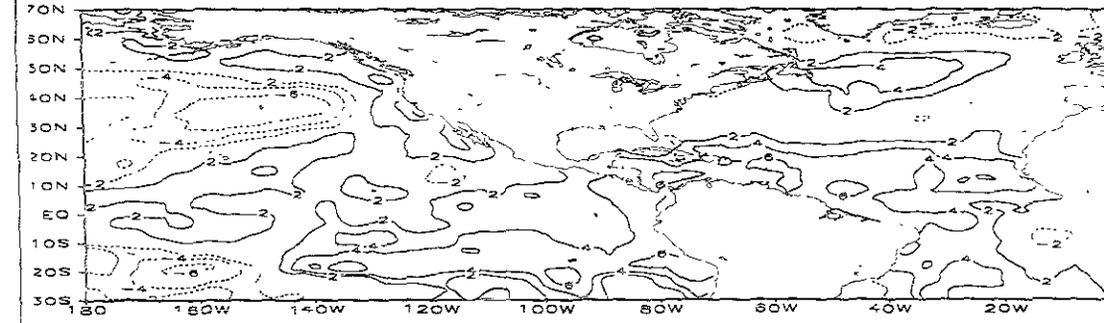


Figura 3.4: Patrones de correlación (x10) entre temperatura de verano y las variables de gran escala.

## 2) Ecuaciones de regresión multilínea por región

Mediante el análisis de los campos de correlación es posible determinar las variables y los lugares que guardan las correlaciones más significativas. Tales correlaciones, aunadas a su interpretación en términos de la dinámica atmosférica, permiten seleccionar las variables de gran escala para diagnosticar la temperatura media ambiente y la precipitación regional. Los predictores potenciales de la ecuación de regresión y el predictando (temperatura o precipitación regional) se determinaron para invierno y verano, mediante el uso de ecuaciones de regresión multilínea.

Para cada una de las 12 estaciones climatológicas se construyen relaciones de diagnóstico. Éstas corresponden a ecuaciones de regresión lineal multivariada encontradas mediante el método de eliminación por pasos hacia adelante, comúnmente conocido como "step-wise", el cual optimiza el número de predictandos que explican la varianza para un nivel de significancia elegido. La elección de los predictandos está además determinada por el significado físico que la correlación tenga. Así, las relaciones entre *SST* asociadas a patrones de El Niño, PNA, etc., fueron preferidas sobre aquellas que, aunque estadísticamente significativas, eran complicadas de interpretarse dinámicamente.

Las variables seleccionadas para cada ecuación de regresión no fueron más de cuatro tanto para invierno (Fig. 3.5) como para verano (Fig. 3.6). Durante el invierno las variables de altura parecen jugar un papel más determinante que en verano, mostrando que la circulación atmosférica invernal del Estado de Tlaxcala, adquiere características de latitudes medias. En el verano la precipitación parece estar más en función de parámetros de superficie, como presión a nivel del mar y temperatura superficial del océano. A manera de ejemplo se muestra el tipo de ecuaciones de diagnóstico obtenidas para la precipitación de invierno de la estación (05) de la población de Tlaxco, situada al norte del Estado, la (04) que es Tlaxcala Capital al centro del Estado, para precipitación de verano, la (03) Huamantla, para temperatura de invierno, localizada al este y por último la estación (08) Ixtacuixtla con temperatura de verano, situada al suroeste del Estado, (se tienen las ecuaciones para precipitación y temperatura ambiente de verano e invierno para cada una de las diferentes estaciones climatológicas).

## ECUACIONES DE PRECIPITACIÓN DE INVIERNO

Para doce estaciones climatológicas del Estado de Tlaxcaia.

$$\begin{aligned} \text{Pcp 01} &= 13.37 * \text{SST}_{(-120\text{W } 22.5\text{N})} - 10.14 * \text{SST}_{(-82.5\text{W } 2.5\text{N})} + 32.98 * \zeta 500_{(-70\text{W } 25\text{N})} \\ \text{Pcp 02} &= 11.35 * \text{SST}_{(-130\text{W } 25\text{N})} + 21.57 * \zeta 500_{(-70\text{W } 25\text{N})} + 20.37 * \zeta 500_{(-100\text{W } 05\text{N})} \\ \text{Pcp 03} &= -39.04 * \text{SLP}_{(-152.5\text{W } 12.5\text{N})} - 53.27 * \zeta 500_{(-75\text{W } 7.5\text{N})} + 20.88 * \zeta 500_{(-130\text{W } 45\text{N})} \\ \text{Pcp 04} &= -9.38 * \text{SLP}_{(-65\text{W } 0\text{E})} + 27.79 * \text{SST}_{(-150\text{W } 12.5\text{N})} + 25.79 * \zeta 500_{(-70\text{W } 275\text{N})} \\ \text{Pcp 05} &= 13.01 * \text{SST}_{(-125\text{W } 22.5\text{N})} - 9.48 * \text{SST}_{(-82.5\text{W } -2.5\text{S})} - 8.92 * \text{T700}_{(-165\text{W } 275\text{N})} + \\ & 31.14 * \zeta 500_{(-65\text{W } 25\text{N})} \\ \text{Pcp 06} &= 7.6 * \text{SST}_{(-115\text{W } 20\text{N})} + 14.05 * \zeta 500_{(-90\text{W } 25\text{N})} + 22.26 * \zeta 500_{(-102.5\text{W } 5\text{N})} \\ \text{Pcp 07} &= -11.97 * \text{SST}_{(-82.5\text{W } -2.5\text{S})} + 32.66 * \zeta 500_{(-75\text{W } 25\text{N})} \\ \text{Pcp 08} &= -9.81 * \text{SLP}_{(-152.5\text{W } 22.5\text{N})} - 19.36 * \text{T700}_{(-180\text{W } 27.5\text{N})} + 11 * \zeta 500_{(-65\text{W } 32.5\text{N})} \\ & + 16.28 * \zeta 500_{(122.5\text{W } 45\text{N})} \\ \text{Pcp 09} &= -23.83 * \text{T700}_{(-180\text{W } 27.5\text{N})} + 8.43 * \zeta 500_{(-150\text{W } 32.5\text{N})} + 19.43 * \zeta 500_{(-107.5\text{W } 5\text{N})} \\ \text{Pcp 10} &= -19.01 * \text{T700}_{(-180\text{W } 30\text{N})} + 50.28 * \zeta 500_{(-65.5\text{W } 25\text{N})} + 52.26 * \zeta 500_{(-77.5\text{W } 5\text{N})} \\ \text{Pcp 11} &= -8.33 * \text{SLP}_{(-62.5\text{W } 0\text{N})} + 24.88 * \text{SST}_{(-155\text{W } 12.5\text{N})} - 17.52 * \zeta 500_{(-92.5\text{W } 42.5\text{N})} \\ \text{Pcp 12} &= 51.57 * \zeta 500_{(-75\text{W } 25\text{N})} - 18.6 * \zeta 500_{(-95\text{W } 17.5\text{N})} + 37.33 * \zeta 500_{(-102.5\text{W } 5\text{N})} \end{aligned}$$

## ECUACIONES DE PRECIPITACIÓN DE VERANO

Para doce estaciones climatológicas del Estado de Tlaxcala.

$$\begin{aligned} \text{Pcp 01} &= 9.98 * \text{T700}_{(-92.5\text{W } 45\text{N})} + 4.51 * \text{T700}_{(-95.5\text{W } -12.5\text{S})} - 12.34 * \zeta 500_{(-105\text{W } 27.5\text{N})} \\ \text{Pcp 02} &= 12.2 * \text{SST}_{(-65\text{W } 22.5\text{N})} + 5.1 * \text{SST}_{(-95\text{W } 22.5\text{N})} \\ \text{Pcp 03} &= 5.39 * \text{SLP}_{(-95\text{W } 25\text{N})} - 7.59 * \zeta 500_{(-122.5\text{W } 17.5\text{N})} - 10.36 * \zeta 500_{(-90\text{W } 17.5\text{N})} \\ \text{Pcp 04} &= -0.02 * \text{SLP}_{(-55\text{W } 25\text{N})} - 7.48 * \text{SST}_{(-107.5\text{W } 7.5\text{N})} + 6.97 * \text{T700}_{(-65\text{W } 45\text{N})} + 4.28 \\ & * \text{T700}_{(-112.5\text{W } 2.5\text{N})} - 8.03 * \zeta 500_{(-130\text{W } 0\text{E})} \\ \text{Pcp 05} &= -64.01 * \text{SST}_{(-100\text{W } 10\text{N})} \\ \text{Pcp 06} &= -36.35 * \text{SST}_{(-100\text{W } -2.5\text{S})} + 30.38 * \text{T700}_{(-125\text{W } 275\text{N})} + 77.01 * \zeta 500_{(-85\text{W } -5\text{S})} \\ \text{Pcp 07} &= 60.43 * \text{SST}_{(-170\text{W } 2.5\text{N})} \\ \text{Pcp 08} &= -56.35 * \text{T700}_{(-135\text{W } 37.5\text{N})} - 104.32 * \zeta 500_{(-102.5\text{W } 30\text{N})} \\ \text{Pcp 09} &= 80.92 * \text{SST}_{(-160\text{W } 27.5\text{N})} \\ \text{Pcp 10} &= -6.2 * \zeta 500_{(-112.5\text{W } 25\text{N})} \\ \text{Pcp 11} &= -112.26 * \text{SST}_{(-135\text{W } 2.5\text{N})} + 185.34 * \text{T700}_{(-77.5\text{W } 7.5\text{N})} + 84.46 * \zeta 500_{(-125\text{W } 17.5\text{N})} \end{aligned}$$

$$Pcp\ 12 = -15.81 * SLP_{(-67\ 5W\ 40N)} - 62.09 * SST_{(-107\ 5W\ 20N)}$$

### ECUACIONES DE TEMPERATURA DE INVIERNO

Para diez estaciones climatológicas del Estado de Tlaxcala.

$$TMP\ 01 = 0.22 * SLP_{(-95W\ 22\ 5N)}$$

$$TMP\ 02 = 2.5 * \zeta_{500}_{(-80W\ 32\ 5N)}$$

$$TMP\ 03 = -0.81 * SLP_{(-55W\ 17\ 5N)}$$

$$TMP\ 04 = 0.22 * T700_{(-105W\ 50N)}$$

$$TMP\ 05 = 0.43 * T700_{(-142\ 5W\ 20N)} + 2.04 * \zeta_{500}_{(-95W\ 10N)}$$

$$TMP\ 06 = -0.33 * T700_{(-130W\ 30N)}$$

$$TMP\ 07 = 1.02 * SST_{(-137.5W\ 37.5N)} - 0.63 * \zeta_{500}_{(-110W\ 22.5N)} + 1.66 * \zeta_{500}_{(-97\ 5W\ 7.5N)}$$

$$TMP\ 08 = 0.37 * T700_{(-90W\ 2.5N)}$$

$$TMP\ 09 = 0.381 * T700_{(-50W\ 15N)}$$

$$TMP\ 10 = -2.32 * \zeta_{500}_{(-142.5W\ 17.5N)}$$

### ECUACIONES DE TEMPERATURA DE VERANO

Para diez estaciones climatológicas del Estado de Tlaxcala.

$$TMP\ 01 = 0.251 * T700_{(-125W\ 22.5N)}$$

$$TMP\ 02 = -0.42 * SST_{(-117.5W\ 20N)} + 1.27 * SST_{(-80W\ 15N)}$$

$$TMP\ 03 = 1.25 * SST_{(-80W\ 17\ 5N)} - 0.53 * T700_{(-90W\ 2.5N)} - 0.45 * \zeta_{500}_{(-100W\ 10N)}$$

$$TMP\ 04 = -0.48 * SST_{(-70W\ 32\ 5N)}$$

$$TMP\ 05 = 0.75 * T700_{(-72\ 5W\ 27.5N)} - 1.18 * \zeta_{500}_{(-125W\ 25N)}$$

$$TMP\ 06 = -0.154 * SLP_{(-57\ 5W\ 42.5N)}$$

$$TMP\ 07 = 0.99 * SST_{(-60W\ 25N)}$$

$$TMP\ 08 = 0.1 * SLP_{(-67.5W\ 42.5N)} + 0.08 * SLP_{(-110W\ 42.5N)} + 0.79 * SST_{(-60W\ 17\ 5N)}$$

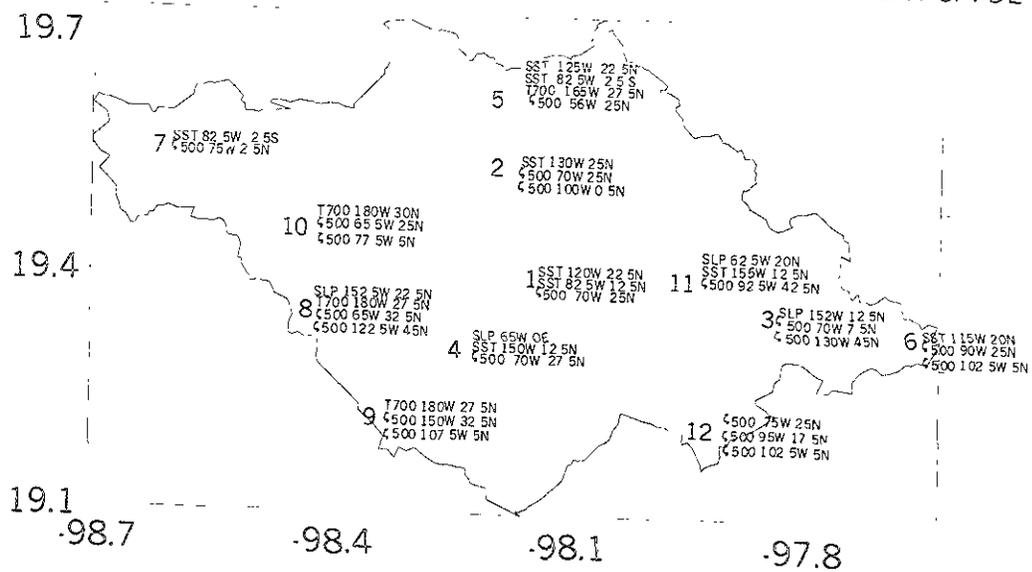
$$TMP\ 09 = -0.9 * SST_{(-70W\ 35N)}$$

$$TMP\ 10 = -0.72 * T700_{(-95W\ 37.5N)} + 1.7 * \zeta_{500}_{(-65W\ 37.5N)}$$

La variable pcp corresponde a la precipitación, los subíndices al número de la región.

Las variables predictoras se evalúan en el punto indicado entre paréntesis.

VAR. DE GRAN ESCALA SIGNIFICATIVAMENTE CORRELACIONADAS PARA LA PCP. DE INV.



VAR. DE GRAN ESCALA SIGNIFICATIVAMENTE CORRELACIONADAS PARA LA PCP. DE VER.

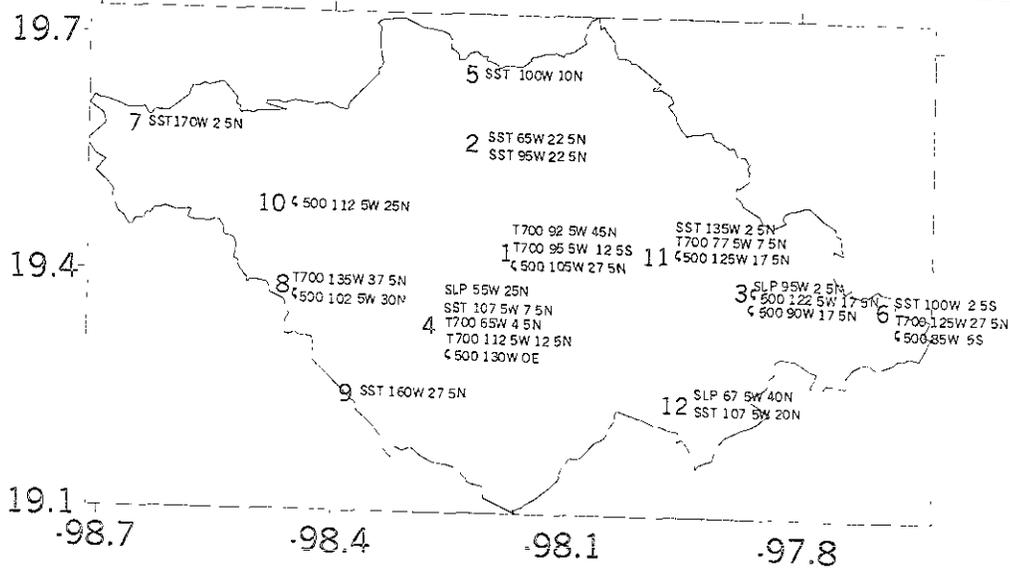
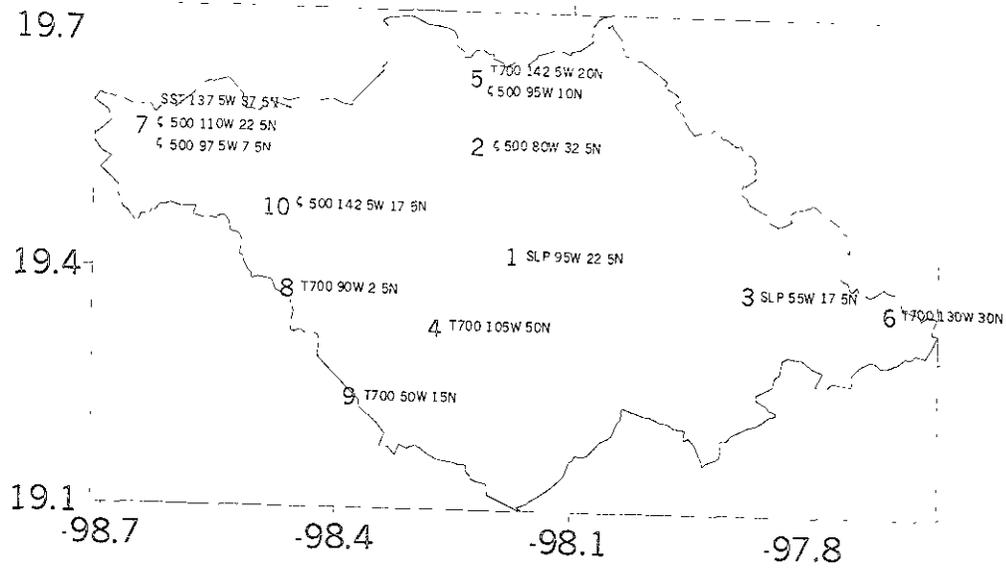


Figura: 3.5: Ubicación de las variables de gran escala significativamente correlacionadas para las doce estaciones climatológicas del Estado de Tlaxcala para precipitación de invierno y verano. ESCALA APROX 1: 50 000

VAR. DE GRAN ESCALA SIGNIFICATIVAMENTE CORRELACIONADAS PARA LA TMP. DE INV.



VAR. DE GRAN ESCALA SIGNIFICATIVAMENTE CORRELACIONADAS PARA LA TMP. DE VER.

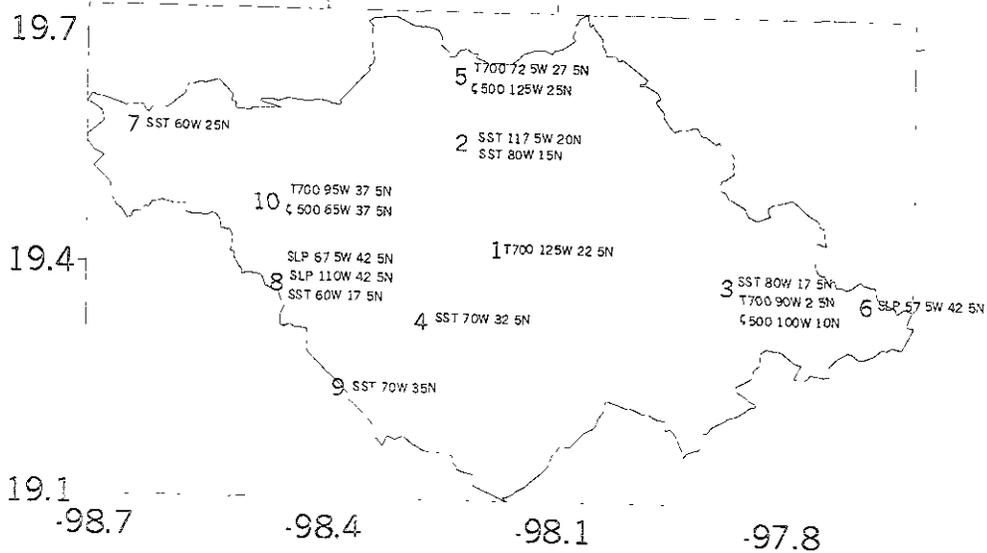


Figura: 3.6: Ubicación de las variables de gran escala significativamente correlacionadas para las doce estaciones climatológicas del Estado de Tlaxcala para temperatura de invierno y verano.  
 ESCALA APROX 1. 50 000

### 3) Validación del modelo estadístico regional

Una vez construido el conjunto de ecuaciones que definen al modelo estadístico de diagnóstico de precipitación regional, se realizaron pruebas para evaluar la calidad del modelo. La prueba más importante consistió en mostrar que éste es capaz de reproducir los campos de precipitación regional a partir de los predictandos o variables de gran escala observados. Las ecuaciones de las 12 estaciones de precipitación y las 10 de temperatura se evaluaron con los valores medios observados de invierno y verano de  $\zeta_{500}$ ,  $T_{700}$ ,  $SLP$ , y  $SST$ . En general, el modelo reproduce el patrón de precipitación tanto en magnitud como en distribución espacial, tanto en el invierno (Fig. 3.7 y Fig. 3.9) como en el verano (Fig. 3.8 Y Fig. 3.10).

Una vez establecido que el modelo estadístico es capaz de reproducir los campos observados de precipitación a partir de valores observados, se procedió a evaluar el modelo estadístico con valores de los campos de gran escala generados por el GCM para la corrida de control de NCAR. En el caso de los experimentos de control, se puede observar que el patrón de precipitación generado con el modelo estadístico presenta una precipitación más homogénea para todo el Estado con dos máximos de precipitación al sureste y noroeste del mismo.

# Capítulo 4

## 4.1 Medidas ante la variabilidad y el cambio climático en el Estado de Tlaxcala

### 4.2 Variabilidad Climática

En nuestro país, como en muchas otras regiones tropicales y subtropicales, el clima es caracterizado de manera empírica por un período lluvioso de mayo a septiembre y un seco entre noviembre y abril. Tal conocimiento es utilizado para la determinación del inicio de las actividades de siembra de temporal durante la primavera. Uno de los sistemas asociados a la variabilidad climática, experimentada año con año, es el evento de EL NIÑO, el cual ha recibido durante 1997 y 1998 una gran atención en los medios de información debido a los problemas que ocasiona en numerosas actividades económicas y en recursos naturales, (Magaña et. al. 1999).

Los impactos de EL NIÑO en el Estado de Tlaxcala, se manifiestan principalmente en la variabilidad en el régimen de lluvias; por ejemplo en el evento de 1982-1983 queda muy marcado el control de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar en la zona NIÑO 3 sobre la precipitación en el Estado de Tlaxcala (Fig.4.1).

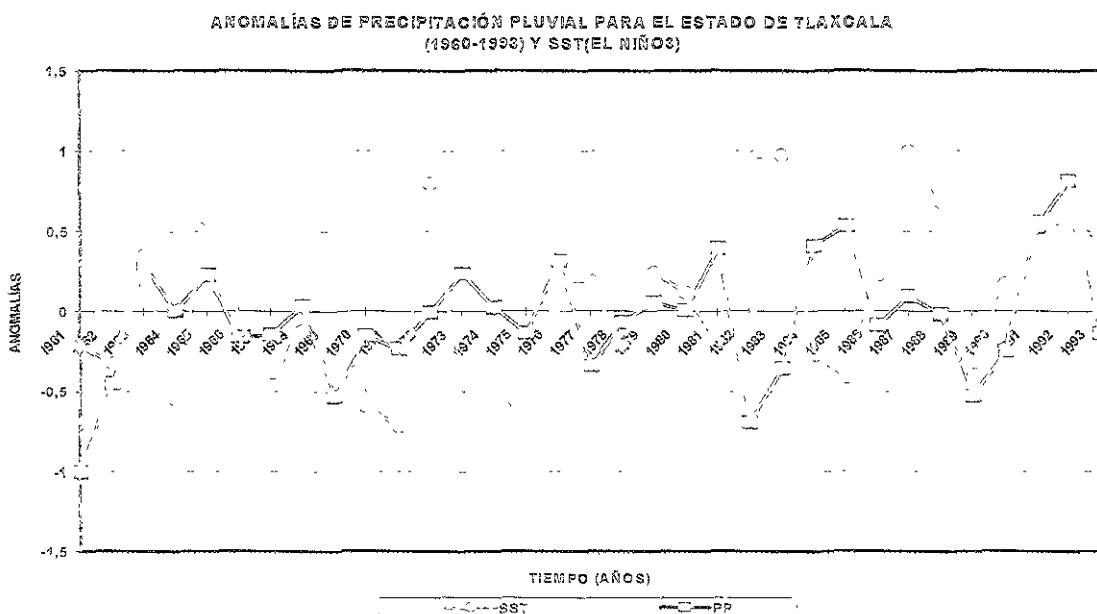


Fig. 4.1 Impacto de "EL NIÑO" de 1982-1983 sobre la lluvia del Estado de Tlaxcala

### 4.3 Sobre los pronósticos

El clima en el Estado de Tlaxcala tiene gran variabilidad espacial debido, a su complicada orografía y a los cambios de uso de suelo de una región a otra. Tales cambios entre regiones resultan en diferencias del tiempo meteorológico que se experimentan de un lugar a otro, día con día. Sin embargo, el clima de la región está en general modulado por factores de mayor escala espacial que perduran en escalas de tiempo de una estación a un año, así, se tiene que el clima de Tlaxcala es altamente dependiente de la ocurrencia de un evento de EL NIÑO o de su contraparte, LA NIÑA. Estas condiciones en invierno o verano pueden determinar una temporada lluviosa o seca, caliente o fría por ejemplo, desde el punto de vista de la climatología, con relación a la precipitación pluvial. En invierno llueve 69% arriba de lo normal en condiciones de "EL NIÑO" y, 61.5% por abajo con "LA NIÑA", y en verano, llueve 12.5% abajo de lo normal en condiciones de "EL NIÑO" y, 19.4% con "LA NIÑA", esto a nivel estatal, destacándose que hay diferente grado de impacto a nivel regional. También se reduce el periodo libre de heladas con la presencia de "EL NIÑO" y, en consecuencia, también reduce el periodo húmedo (Fig. 4.2), (Vázquez, 1998; Morales y Magaña, 1999).

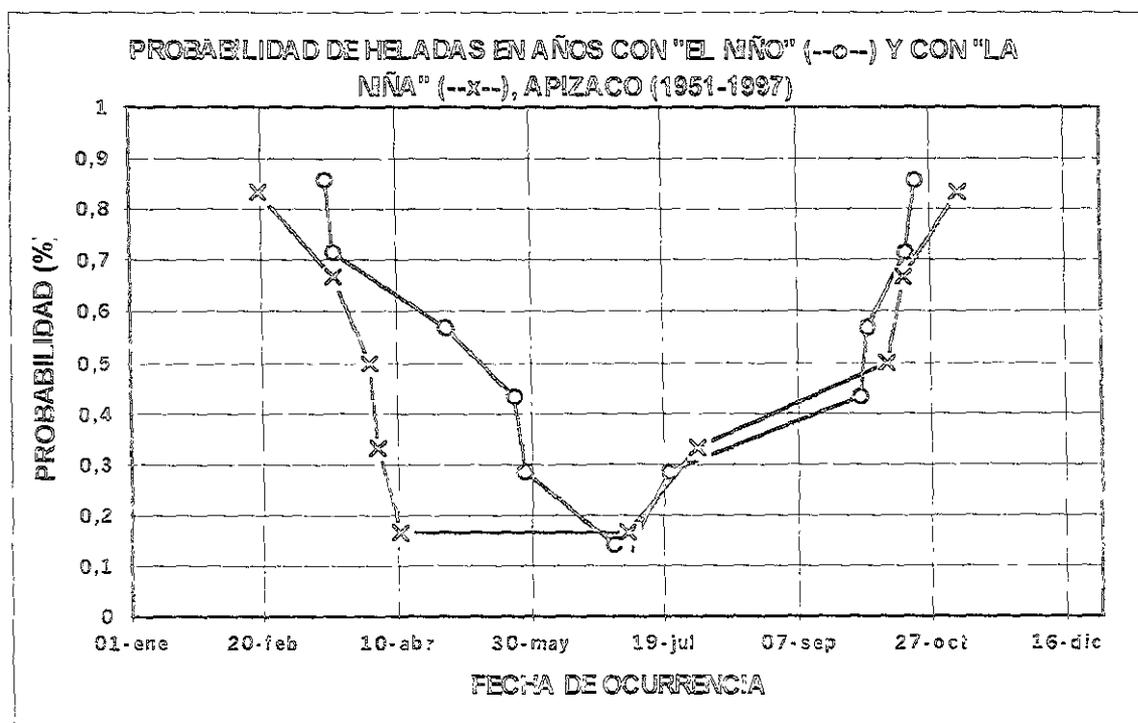


Fig. 4.2 Probabilidad de heladas para la estación de Apizaco en años de EL NIÑO y LA NIÑA

La planeación de las actividades económicas, en particular, la agricultura, sólo puede darse cuando, además, de diagnosticar el clima, se pronostica el tiempo, en la actualidad ya se emiten pronósticos estacionales a nivel regional. Países como Brasil y Perú, ampliamente afectados por el evento de EI NIÑO, utilizan información de diagnóstico y pronóstico de este evento para planear sus actividades. En México, el Estado de Tlaxcala se ha convertido en el objeto de un estudio piloto, del cual se espera seguir obteniendo resultados de interés científico y práctico que puedan ser empleados en otros estados. Aunque es claro que los pronósticos del clima tienen incertidumbre, no es necesario esperar a tener pronósticos perfectos para comenzar a hacer uso de la información climática.

La demanda por información meteorológica va creciendo de manera substancial, y con ello la necesidad de formar personal capacitado en el área de diagnóstico y pronóstico del clima. En varias partes del mundo por ejemplo, en Tucson Arizona siguen con interés los resultados del proyecto Tlaxcala, pues de éste pueden surgir metodologías de colaboración entre la comunidad científica y la comunidad productiva.

#### 4.4 Realización del pronóstico

Muchos de los pronósticos climatológicos que se realizan, son para regiones muy grandes, a nivel de continente o país, y, cuando los pronósticos son para escalas menores, estas abarcan uno o varios estados, sin importar si toda la región cuenta con datos climatológicos. Generalmente en los pronósticos, no se considera la fisiografía, filtrando los efectos locales y excluyendo los microclimas. Por lo tanto algunos pronósticos climatológicos no tienen mucho rango de confianza, por lo que es necesario trabajar en la realización de pronósticos regionales con escalas menores y que sean más confiables.

Par el caso específico del Estado de Tlaxcala, se requiere conocer con más precisión el clima regional para zonificar el estado, y, proponer cultivos que se adapten a los climas existentes. Es de esperarse que exista una gran cantidad de microclimas en una superficie de 300 000 hectáreas que están destinadas al cultivo del Estado. Debido a la orografía tan compleja del mismo, existen muchos microclimas por ejemplo, la zona de

Españita, situada al oeste, del Estado, es una región que no se ve afectada por los eventos climatológicos extremos como las heladas, sequías, vientos etc.

Por otro lado, los productores requieren conocer algunas estrategias agrícolas ligadas con pronósticos climáticos para planificar las labores del campo. Por ejemplo, si se realizara un pronóstico que saliera a principios de año, y si el productor sospechara de la existencia de humedad residual en el suelo por las lluvias de invierno, entonces podría decidir cuando sembrar, si en marzo o en mayo.

De igual manera les interesa conocer la marcha mensual de la precipitación y saber en que meses se presentará o no la canícula y si ésta será seca o húmeda, para elegir el tipo y variedad de cultivo que sembrará, (semillas precoces o resistentes a la sequía), ante esas características del clima esto último es de vital importancia para los productores de la zona de Toluca de Guadalupe (Terrenate), por las características del clima y suelo de la región.

Además, les interesa conocer ¿qué cantidad de precipitación tendrán? y, ¿por cuánto tiempo?, ¿cuándo se presentaran las heladas inesperadas o las granizadas? etc. estas necesidades de los productores se transforman en un gran reto para los científicos interesados en la realización de pronósticos climáticos regionales.

Ante estas necesidades del productor, es necesario hacerles ver que un pronóstico es saber o conocer que pasará en un futuro inmediato pero, es algo al asar, es un bolado y lo que se pronosticó, puede ocurrir o no, por la complejidad del clima.

Existen diferentes tipos de pronósticos y de usuarios de los mismos, también hay eventos que son altamente predecibles como los eclipses de sol o de luna, las apariciones de cometas, manchas solares etc. Estos eventos se pronostican de una manera muy certera y con mucha antelación.

Hay otros sistemas o eventos que no se pueden pronosticar con mucha exactitud, ya que están sujetos a variables azarosas y complejas como las tormentas, tornados, ciclones,

huracanes etc. Estos son eventos que interactúan de manera no lineal con otros elementos del clima y, al realizar un pronóstico climatológico, existe la incertidumbre de que lo pronosticando no suceda o se presente con mayor intensidad.

Dependiendo del usuario o del estudio que se este realizando, van a existir diferentes tipos pronóstico.

Si hablamos de clima, existen algunos pronósticos que se nombran por el tiempo de antelación que estos predicen, por ejemplo:

Meteorológico: a corto plazo:	de unas horas hasta una semana
Meteorológico a mediano plazo:	de varias semanas
Climático: mensual a largo plazo:	mensual
Climático: estacional a largo plazo extendido:	de varios meses
Climático: a muy largo plazo:	mayor a una estación

Existen también diferentes técnicas que se utilizan para la realización de un pronóstico, por ejemplo:

**Estadístico:** Se utilizan bancos de datos y análisis climatológicos

**Estadístico - dinámico:** Se utilizan valores de datos climático estacionales

**Por analogías:** Son patrones de comportamientos climáticos, de eventos que han sucedido en períodos anteriores comparados con las tendencias actuales

En este caso de estudio y, para realizar un pronóstico climatológico de precipitación para el Estado de Tlaxcala, el método empleado fue, el de análogos climáticos, el cual se basa en examinar las anomalías de temperatura y precipitación observadas en años previos del evento climatológico de EL NIÑO o LA NIÑA.(EL NIÑO, mayor temperatura y menos precipitación en verano), (LA NIÑA, temperaturas bajas pero con mayor precipitación en verano).

Se tomó como base el monitoreo del Pacífico Ecuatorial, para conocer la marcha mensual y anual del evento de EL NIÑO o LA NIÑA y en base a sus características se

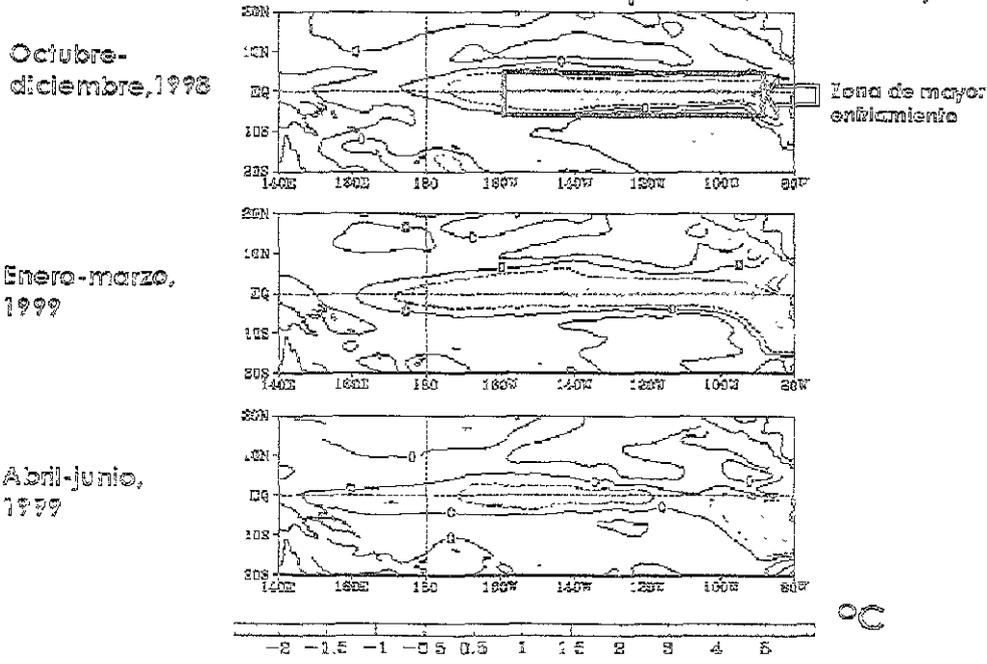
generó un pronóstico de estos eventos, para 1998 y 1999 respectivamente, al generar los pronósticos de temperatura de superficie para 1998 en el Pacífico Ecuatorial, indicaban que sería año del evento de EL NIÑO y para 1999 de LA NIÑA.

Para la realización del pronóstico climático regional para Tlaxcala por analogías, se hizo a partir de las situaciones observadas en los inviernos de 1970-1971, 1973-1974, 1975-1976 y 1888-1989, cuando este evento climatológico estuvo presente, con base a la magnitud del mismo, (Fig. 4.3 y 4.4).

Para el caso de 1998, se tenía latente la presencia del evento de EL NIÑO en el cual se esperaba poca precipitación en ese ciclo agrícola, posteriormente se buscó toda la información existente de años anteriores con las características de este evento.

Se realizó un seguimiento del comportamiento de las temperaturas (ambiente, máxima y mínima) y, de la distribución de la precipitación a lo largo del año, para generar el pronóstico regional sobre la base del banco de datos climatológicos que ya se tenía preparado con observaciones de estaciones climatológicas del Estado de Tlaxcala y de la República Mexicana

**Pronóstico de la anomalía de la temperatura del mar, °C**



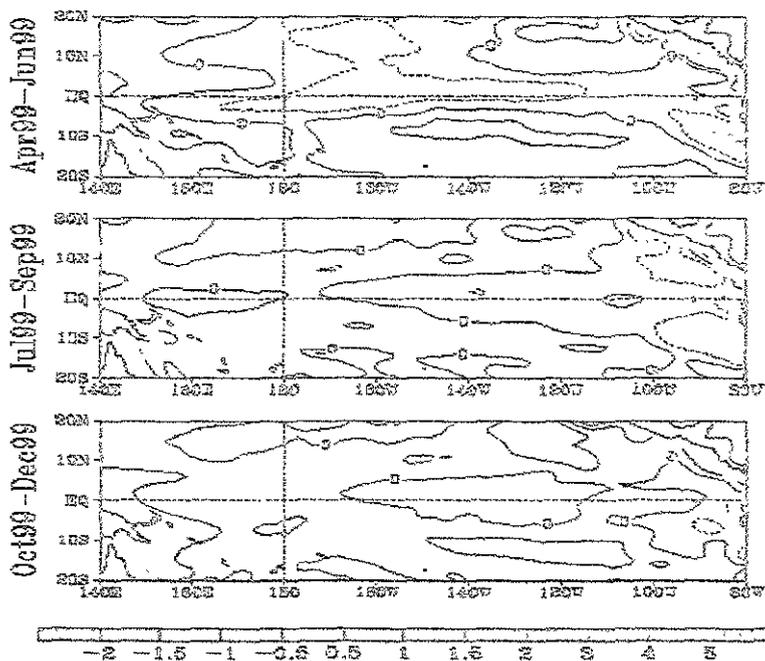
Actualización: 7 octubre, 1999. FUENTE: NOAA-NCEP-CMSS.

Octubre 20, 1998

Fig. 4.3 Pronóstico de anomalías de temperatura de la superficie del océano período 1998/1999



FORECAST SST Anomaly (3-Mon. Average)



Last Update: Wed Apr 7 1999

Fig. 4.4 Pronóstico de anomalías de temperatura de la superficie del océano período 1999

Una vez realizado el pronóstico regional de precipitación mensual para el Estado de Tlaxcala, para 1998 (Fig 4.5), y, 1999 (Fig. 4.6), se procedió a realizar un seguimiento de evaluación del mismo, con la precipitación pronosticada y la observada y, conocer las medidas preventivas que tomaron los productores al conocer los pronósticos.

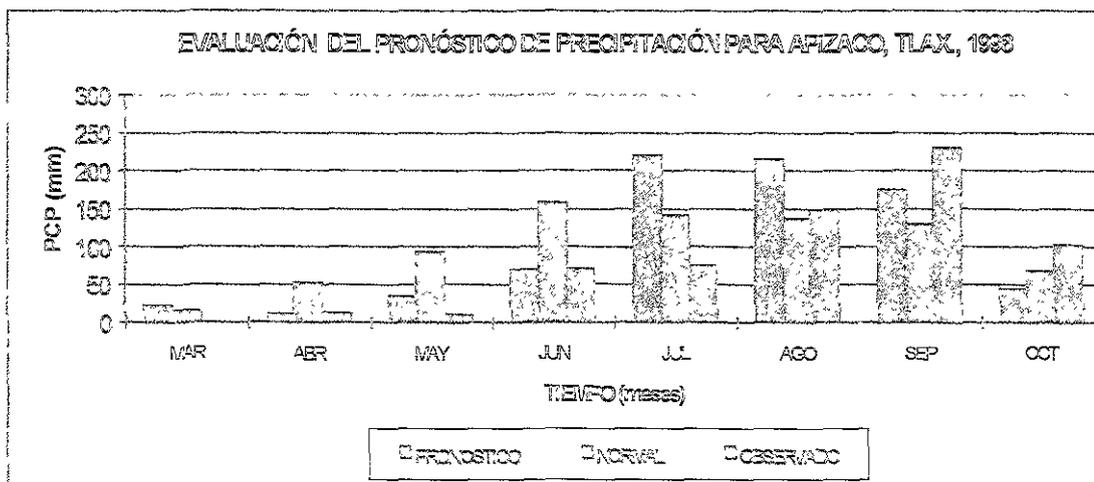


Fig. 4.5 Pronóstico y evaluación del pronóstico de precipitación para 1998 (Apizaco)

De los dos pronósticos realizados, 1998, el correspondiente al evento de EL NIÑO tuvo una mejor simulación en la cantidad de precipitación con lo ocurrido en la realidad (con los datos observados de precipitación), esto indicando, tal vez, que el océano y la atmósfera están más acoplados que la intensidad de la anomalía en la SST como un mecanismo para la presencia o ausencia de precipitación en el Estado.

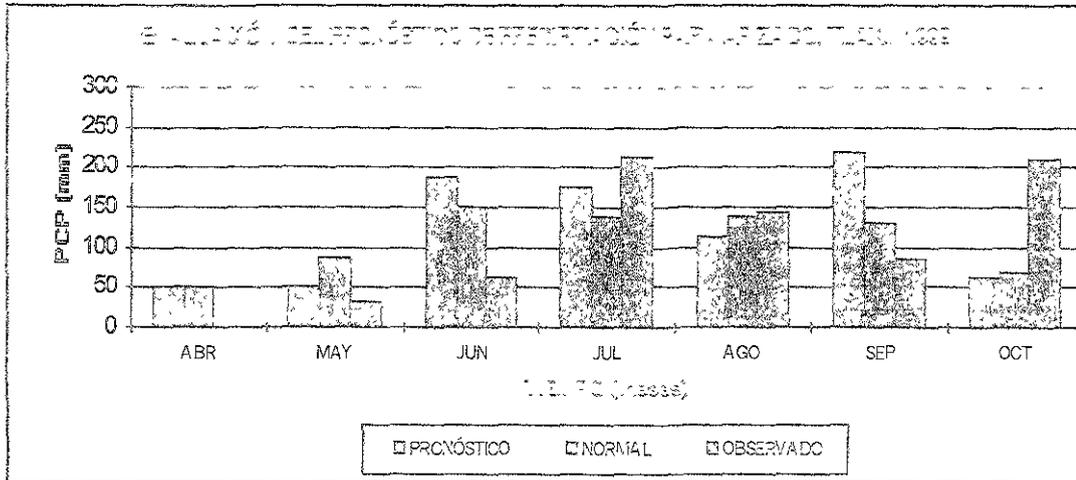


Fig. 4.6 Pronóstico y evaluación del pronóstico de precipitación para 1999 (Apizaco)

#### 4.5 Entrevista a productores

A través de los años se han puesto en práctica diferentes estrategias y alternativas para ayudar al productor en el campo, se han creado bancos de semillas de granos básicos de muchas partes del mundo y del país, para obtener semillas mejoradas, por ejemplo: de maíz, trigo, cebada, centeno etc. (híbridos o criollos de la región), que sean precoces, resistentes a las sequías y a las heladas.

Sin embargo eso no ha sido suficiente para mejorar las cosechas y mitigar los efectos nocivos de los eventos climatológicos adversos sobre los cultivos, ya que es de vital importancia conocer las características físicas de la región en donde se quieren introducir estos cultivos para eficientar las prácticas agrícolas y obtener mejores cosechas.

A pesar de las medidas preventivas que se han instrumentado, para ayudar al productor, estas se han mostrado insuficientes ya que se requiere de más información, no solo sobre paquetes tecnológicos, sino también sobre el clima del estado y su región.

Anteriormente los productores a través del conocimiento empírico adquirido a lo largo de los años, y este a su vez transmitido por generaciones, les permitía conocer el clima de su región, teniendo bien definidas las fechas de inicio de siembra. Los productores realizaban su calendarización basados en el seguimiento de “*las cabañuelas*”, las cuales indicaban al inicio del año como se presentaría el clima a lo largo del ciclo agrícola.

Otro apoyo que los productores utilizan como indicativo para conocer el clima e iniciar sus cultivos, es el calendario de Galván o la rueda Salomónica.

En la actualidad, y, dentro de la realidad del productor estos conocimientos no han sido suficientes para tomar las medidas y decisiones pertinentes para la planificación de sus cultivos y la implementación de medidas alternativas en la prevención de desastres para sus cosechas.

Por lo tanto, el campesino requiere de tener a su alcance y de manera oportuna información más específica sobre el clima de su región, basado en un carácter más científico y respaldado con bases físicas y climatológicas en un ámbito regional, estatal y nacional.

Cuando se difundió el pronóstico de precipitación para el Estado de Tlaxcala con los productores, se canalizó por medio de varias instituciones como la Fundación Produce de Tlaxcala A.C., el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), la Universidad Autónoma de Tlaxcala y con apoyo de personal capacitado de la UNAM.

Se realizaron reuniones con productores y comisariados ejidales de diferentes comunidades, y, en seminarios se les dio a conocer en que consistía el pronóstico y cómo se presentarían las lluvias a lo largo del ciclo agrícola de 1998, y, en su oportunidad y con antelación el ciclo agrícola correspondiente a 1999.

Cuando se realizó el primer pronóstico de precipitación para el Estado, en 1998, muchos productores, hicieron caso omiso del mismo, sembrando normalmente en marzo o abril como suelen hacerlo. Sin embargo la precipitación se retrasó y no tuvieron la humedad suficiente en el suelo para que las semillas germinaran.

Posteriormente en el mismo ciclo agrícola (1998), los productores se acercaron con sus comisariados ejidales, para solicitarles más información referente a lo que decían los pronósticos de precipitación de los que les habían hablado, mostrando ahora mayor interés en conocer la marcha mensual de la precipitación y su distribución mensual para cada una de las comunidades para las que se había realizado el pronóstico.

Se les comentó a los productores que de acuerdo a la información que contenía el pronóstico, las condiciones climatológicas que prevalecerían para ese año, serían del evento de EL NIÑO, y, que sería un año con precipitación por abajo de lo normal y que esta se establecería de una forma normal en junio.

Además, se les resaltó el hecho de que en septiembreabría lluvia muy por arriba de lo normal, esto con el fin de que los productores que ya habían sembrado y su semilla no había germinado, volviesen a resembrar y tomaran las precauciones pertinentes para la elección del tipo de semilla que utilizarían para contrarrestar el exceso de humedad y evitar la presencia de fungosis (hongos como la rolla lineal por ejemplo).

En las pláticas que sostuvimos con los productores, nos dimos cuenta de que muchos de ellos, desconocían total o parcialmente en que consistía el evento climatológico de EL NIÑO y sus efectos en el campo, por lo que fue necesario explicarles cuales son los efectos negativos en la agricultura con la presencia de este evento o en su defecto como aprovechar esta variabilidad climática natural.

## Sucesos de 1998

Para hacer una evaluación y seguimiento de los resultados obtenidos en el campo con los productores que conocieron los pronósticos y con los que no los conocieron, se

realizaron algunas reuniones con los productores de diferentes municipios del Estado para saber que medidas tomaron o no al saber que tenían una información adicional de la distribución de la precipitación en el Estado, y, los comentarios fueron los siguientes:

El señor Onésimo Pérez Vázquez: quien es un productor originario de la población de Matamoros Tlaxco, mencionó: *en muchas ocasiones nosotros los productores tenemos la culpa de que los cultivos no se logren, ya que generalmente sembramos de acuerdo a nuestras costumbres a inicio de año, ya que el indicativo para que sembremos, es la presencia de las primeras lluvias, y, aunque nosotros vemos que el clima y el suelo están secos, sembramos de todos modos exponiéndonos a que por falta de humedad no germinen las semillas.*

*Más sin embargo al aventuramos a sembrar y sin estar seguros si continuará lloviendo, después de haber sembrado o si se retrasaran las lluvias, cosa que en la mayoría de las veces sucede, no llueve y el suelo se encuentra seco y como consecuencia nuestras semillas no germinan y, tenemos las primeras pérdidas del ciclo agrícola*

Continuó diciendo, *en el Estado de Tlaxcala se tienen 2 factores muy importantes que afectan de una manera directa los cultivos, y son las sequías y las heladas.*

*Generalmente en la región hiela cuando las semillas está en una etapa tierna, cuando esto sucede a principio del ciclo, tenemos todavía la alternativa de volver a resembrar o en su defecto cambiar de cultivo para tener al menos forraje para los animales y no tener que desembolsar para poder comprar forraje o alimento.*

Don Onésimo nos comentó que en 1998, sembró a tiempo (16 de mayo), y no logró cosechar ni un kilo, ya que al mes de haber sembrado todo estaba seco por la falta de lluvia.

En esa región, comentó Don Onésimo, que los productores generalmente siembran entre la primera y segunda semana de mayo, siempre y cuando se hayan presentado las primeras lluvias. Para realizar la siembra de cebada o las “tapas” como ellos le llaman,

las realizan a partir del 15 de mayo, y, el trigo lo siembran un poco antes, ya que su desarrollo es más lento.

*Si realizáramos la "tapa" de trigo (comenta Don Omésimo), en la misma fecha que la cebada, es altamente probable que tengamos pérdida total en los cultivos por efectos de las heladas que generalmente se presentan cuando el grano se encuentra en etapa de maduración. Cosa que sucede con mucha frecuencia en la región y dice, yo me he fijado que la distribución de las heladas no es homogénea en toda la zona, pero si afectan a los cultivos, y termina diciendo, en la zona de Tlaxco generalmente esperamos que las primeras heladas de la temporada se presenten a partir de la segunda quincena de septiembre.*

Continuando con el marco de las entrevistas, nos encontramos con el señor Faustino Hernández quién es el titular de la Coordinadora Nacional Obrera Campesina Independiente de Tlaxcala (CENOCIR), además de ser un pequeño productor del municipio de Plan de Ayala.

Don Faustino, nos mencionó que productores del poblado de Mitepec, municipio de Españita en 1998, a principio del ciclo agrícola, junto con ejidatarios de la población de Tlalpan, Españita, San Lucas Tecopilco etc. solicitaron su apoyo por parte de la dependencia que él representa para realizar los cultivos correspondientes a ese ciclo agrícola.

Don Faustino les dijo, *yo tengo conocimiento de un pronóstico de lluvias que se realizó para los productores del Estado, y de acuerdo a lo que dice, les sugiero no sembrar hasta que empiecen las lluvias, ya que de acuerdo al pronóstico las lluvias se presentarán tardías. La mayor parte de los presentes, le contestaron: no podemos esperar más ya que de acuerdo al calendario de siembra tradicional y por la calendarización que establece el seguro agrícola para quienes lo solicitamos es demasiado tarde. y no podemos esperar más y por lo tanto vamos a sembrar esperando que pase lo que el creador quiera.*

El señor Faustino continuó diciendo: *Como al mes y medio, regresaron nuevamente para pedir ayuda y poder conseguir u obtener semilla de cebada, ya que las "tapas" de los cultivos que habían sembrado anteriormente no germinaron por falta de humedad. Yo creo que fue una mala experiencia para los productores que no tomaron en cuenta las sugerencias que les hicimos referente al primer pronóstico, el cual nos que sería un año con condiciones climatológicas del evento de EL NIÑO y que por lo tanto tendríamos precipitación tardía y por abajo de lo normal.*

Otro productor que también quiso participar con sus experiencias obtenidas en el campo fue el señor José Isabel González vecino de la población de Capulac.

Menciona que se ha dado cuenta de que el clima no es homogéneo en el Estado de Tlaxcala argumenta: *yo me he dado cuenta de que a pesar de que el Estado es muy pequeño, también es muy variable ya que mientras llueve en la población de la Ciudad Industrial Xicohtencatl que se encuentra a 4 o 5 kilómetros de distancia "acá" en el pueblo no cae "ni una" gota.*

*También puedo ver dijo: hay una gran cantidad de microclimas, mientras unas zonas se ven afectadas por las heladas, a otras no les pasa nada, yo por ejemplo, sembré en 1998 el 27 y 28 de junio maíz, trigo y mi "frijolito" y obtuve mejores cosechas que en 1999 cosa que no pasó con otros compañeros, ya que yo apliqué el pronóstico en 1998.*

## Sucesos de 1999

En 1999, fue diferente para muchos de los productores, ya que estos actuaron de una manera distinta y con más cautela en el momento de las siembras y, no lo hicieron con las fechas convencionales a las que estaban acostumbrados.

El reporte del pronóstico para ese año, indicaba que las primeras lluvias se presentarían de una manera esporádica en mayo, pero para junio ya se tendría generalizada la precipitación en el Estado.

Muchos productores haciendo caso del pronóstico decidieron esperar hasta la fecha que marcaba el inicio de lluvias para sembrar (finales de mayo y principios de junio), y no tener pérdidas a inicio del ciclo de cultivo por falta de humedad en los suelos.

De igual forma el señor Onésimo Pérez Vázquez: nos comentó sus experiencias de 1999. Él sembró de acuerdo a las fechas que indicaban los pronósticos, y, la producción de maíz que obtuvo dijo: *aunque mi maíz estuvo un poco helado, al menos coseche algo, ya que en esa ocasión sembré en julio y no en mayo como solía hacerlo, por lo tanto logre tener un poco de cosecha, al menos para alimentar a la familia en este año.*

Continuó diciendo *1999 fue más húmedo que 1998, hubo precipitación en exceso, y además, fue mucho más frío lo cual generó una gran cantidad de heladas que afectaron los cultivos. Es muy cierto que fue un año con más humedad pero fue un ciclo de cultivo muy frío. Las bajas temperaturas en el campo, hacen que se alargue el ciclo vegetativo de los cultivos haciéndolos más susceptibles de ser dañados por las heladas de temporada que se presentan cuando el cultivo se encuentra a medio ciclo vegetativo y ya no se puede recuperar la planta.*

Además, comentó: *en 1999, cayeron unas heladas del 18 al 22 de septiembre, las cuales perjudicaron algunas zonas del municipio que se encuentran en las cañadas, afortunadamente dice, existen algunas laderas que generalmente por su ubicación se ven beneficiadas y logran ser menos dañadas por las heladas.*

Dentro del marco de las entrevistas Don José Isabel González nos comentó: *en 1999, sembré lo mismo que en 1998, maíz y trigo solo que más temprano (mayo), desafortunadamente, el 21 de septiembre una helada afectó mis cultivos y perdí todo.*

Generalmente continuó diciendo: *todos los productores de la región de Capulac esperamos las primeras heladas después del 15 de septiembre pero unas heladas son más intensas que otras y no sabemos por que.* (este es un tema de investigación que se sugiere para tratar de conocer que tipo de circulación atmosférica - oceánica determina este hecho observado por los productores).

Terminó diciendo Don José: *En 1999 en la región, la mayor parte de los productores no obtuvimos cosechas, ya que fue un año muy frío y con muchas heladas, las primeras heladas se presentaron en mayo y junio dañando parcialmente los cultivos, posteriormente se presentaron otras en septiembre y octubre (23,24,25,y 26), y como existía bastante humedad en el suelo, la cosecha de maíz se hirvió, (los granos de la mazorca no llenaron)*

#### 4.6 Fechas de eventos especiales:

Dentro de los diferentes comentarios que los productores hicieron durante la entrevista, ellos mencionaron que cuando en los medios informativos (radio o televisión) anuncian la presencia de una masa de aire seco y frío en el norte de la República Mexicana, generalmente a los 12 o 15 días después del reporte, en el Estado de Tlaxcala se presentan masas de aire seco y frío propiciando las heladas.

Lo mismo sucede, según la experiencia de los productores, dicen: *cuando se tiene la presencia de un norte o ciclón en el Estado de Veracruz o Tamaulipas, trae consigo humedad y, para fortuna de nosotros en Tlaxcala, queda establecida la época de lluvias favoreciendo enormemente la agricultura.*

Finalmente, las entrevistas terminaron, haciendo todos una reflexión, comparación y balance de los dos años en que se les presentó el pronóstico.

EVENTOS CLIMATOLÓGICOS ESPECIALES QUE SE PRESENTARON EN 1998 Y 1999 EN EL ESTADO DE TLAXCALA	
1998	1999
Fue año de EL NIÑO	Fue año de LA NIÑA
Fue un año muy cálido	Fue un año muy frío
Se presentó poca precipitación	Hubo más precipitación de lo normal
Fue un año muy seco	Fue un año con muchas heladas y granizadas

Llovió mucho a fin de año	No llovió a principio de año
Hubo poca o nula producción de cultivos	Las cosechas fueron más abundantes
En muchas regiones del Estado se presenta pérdida total en los cultivos, por falta de lluvia	08 de junio lluvia torrencial 09 de junio inundaciones en el Estado 10 de junio granizada en la población de Tetla. 11 de junio nieve en la Malintzi 13 de julio fuerte helada en San Cosme.

Las zonas que se vieron más severamente afectadas por las granizadas en el Estado en 1999 son las siguientes:

San Simeón Xipetzingo, Hueyotlipan, Recova, Adolfo López Mateos y Españita.

Con base a los acontecimientos sucedidos en 1998 y 1999, se buscó información en fuentes oficiales para conocer dicha situación y ver su punto de vista.

La empresa que nos atendió y nos brindó información oficial, fue la Aseguradora Agrícola y Ganadera (AGROASEMEX) de la región Tlaxcala, atendida por el Ing. Ricardo Pérez León, el cual nos mostró los siguientes reportes que en su oportunidad la empresa realizó para la entrega oportuna en su informe de daños:

Nota: los textos que se presentan a continuación son una copia fiel transcritos de los reportes que nos proporcionó la empresa:

Reporte de AGROASEMEX para 1998. Como se informó con anterioridad, el presente ciclo agrícola fue completamente atípico, ya que al inicio del mismo, las lluvias no se presentaron en forma normal, registrándose solo precipitaciones esporádicas, erráticas y extemporáneas, razón por la cual, el aseguramiento bajó considerablemente, pues la siembra de maíz, cebada y trigo, se realizaron en muchos casos fuera de las fechas recomendadas para el efecto.

ESTE TEXTO HA SIDO  
 REVISADO Y  
 AUTORIZADO POR  
 EL COMITÉ DE  
 INVESTIGACIÓN Y  
 EVALUACIÓN

Posteriormente, una vez que ya estaban establecidos los cultivos y por ende asegurados, siguieron presentándose las lluvias en forma irregular, es decir, solo llovía de vez en cuando y en algunas partes. Lo anterior trajo como consecuencia afectación a los cultivos asegurados por sequía, que es la principal causa de los siniestros por los que se está pagando la indemnización.

También, es de hacer notar, que en septiembre, octubre y noviembre se registraron fuertes y continuas precipitaciones pluviales que, aunque solo una parte del trigo afectaron en la producción, hubo necesidad de ampliar la vigencia de las pólizas, porque no existía piso para llevar a cabo la recolección de trigo y la cebada.

#### Reporte de AGROASEMEX para 1999

Hasta principios de agosto se vislumbraba un ciclo agrícola con mínimos riesgos de pérdida, por ende se esperaba que el impacto de posibles inundaciones, fueran del mismo orden, no obstante en la segunda quincena de agosto se presenta una sequía en los municipios de Cuapiaxtla, Alzayanca, Huamantla y Tlaxco, que afectó en grado medio a fuerte los cultivos de esta zona.

Posteriormente en septiembre (21,22 y 23), se presentó un fenómeno gélido (helada), afectando a todos los cultivos asegurados en grado de medio a fuerte y que estas se encontraban en una etapa fenológica de grano lechoso.

Finalmente en las últimas fechas, el campo Tlaxcalteca no ha sido ajeno de los fenómenos meteorológicos, que están afectando fuertemente la parte central y sur del país, que son vientos fuertes, exceso de humedad e inundaciones que se han dejado notar y que a la fecha se siguen presentando lluvias en todo el Estado, afectando de igual forma a los cultivos.

Es de importancia hacer mención que en este momento, existe un 60% de la superficie del cultivo de cebada en condiciones de trilla, sin embargo, debido a las inclemencias del tiempo persistentes, no ha sido posible efectuar la recolección correspondiente.

Como consecuencia de los efectos climatológicos que afectan el ramo agrícola en la entidad, se estima pagar por indemnización 700 mil pesos aproximadamente. Siempre y cuando no se agrave la situación.

Los datos oficiales proporcionados por AGROASEMEX, de la superficie en hectáreas, cultivada y asegurada por ellos para protegerlas de diferentes siniestros climatológicos en el ciclo agrícola primavera verano 1999/99 en el Estado de Tlaxcala, son los siguientes:

**SUPERFICIE SINIESTRADA EN HECTÁREAS**

CULTIVO	SUP. SEMBRADA	TOTAL	PARCIAL
MAÍZ	125,854	28,989	96,865
FRIJOL	7,542	2,455	5,087
TRIGO	41,613	2,357	39,256
CEBADA	45,158	9,586	35,572
HABA SECA	2,047	17	2,030
HABA VERDE	859	53	806
PAPA	2,462	198	2,264
CALABAZA	103	21	82
CHICHARO	129	118	11
OTROS	15,791		15,791
TOTAL	241,558	43,794	197,764

De acuerdo al balance realizado por la empresa, en base a los siniestros climatológicos que se presentaron en 1999, obtuvieron el siguiente reporte:

**Conclusión del reporte de AGROASEMEX Tlaxcala para 1999**

En 1999, los factores climatológicos, determinantes en la pérdida de la producción de los cultivos fueron: sequía y helada. El factor sequía incidió en que los cultivos, se sembraron fuera de las fechas normales, desfasándose éstas, desde 20 días a un mes y medio propiciando que las primeras heladas que se presentan en septiembre y octubre fueran las causas, determinantes en la baja producción y la mala calidad de la producción, toda vez que la mayoría de los cultivos se encontraban en una etapa fenológica de grano lechoso. El exceso de humedad, granizo y vientos huracanados, sus efectos no fueron los que tuvieron gran impacto.

Con los reportes antes mencionados, nos dimos cuenta de la problemática que se vivió y se sigue viviendo en el agro tlaxcalteca.

## 4.7 Medidas de adaptación conociendo el pronóstico

En el marco de las entrevistas, los productores también mencionaron que pusieron en práctica algunas alternativas de siembra tardía ante los resultados que arrojaba el pronóstico.

Con dicha alternativa pudieron salvar en parte sus cultivos, ya que no se aventuraron a sembrar maíz de una manera tradicional para autoconsumo, sino, que lo sembraron para obtener forraje para su ganado y, que sembraron cebada o trigo para tener granos y comercializarlos o cambiarlos por alimento para sus familias.

De esta manera, no realizaron gastos infructuosos en su afán de querer producir maíz para su manutención a lo largo del año.

Con las experiencias obtenidas de los dos pronósticos, ahora los productores mencionan que no solo se requiere de un pronóstico de lluvias en la que sepan en que mes va a llover y los meses en los que no habrá precipitación. Si no también de un esquema de pronóstico que les indique que tipo de cultivo se podría utilizar ante una posible contingencia climática para obtener mayores rendimientos, o al menos evitar pérdidas económicas de sus cultivos.

Quieren saber que cantidad de precipitación se tendrá en el año, y, que tipo de cultivo pueden introducir en su región, (maíz, trigo, cebada o avena), ya que existe un sin número de microclimas en el Estado con características muy especiales para la adaptación de otro tipo de cultivos.

Aunque la mayor parte del Estado, es sembrado tradicionalmente por maíz, existen algunas regiones que tienen un alto potencial para el cultivo del trigo y la cebada así como para la siembra de hortalizas, estas regiones son: Calpulalpan, Españita, Toluca de Guadalupe etc. que tienen características físicas especiales.

Onésimo Pérez Vázquez: comenta que de acuerdo a las experiencias que los productores han obtenido en el campo, y, con base a las características físicas de su región sugiere: *en la población de Matamoros Tlaxco ya no es recomendable sembrar maíz mejorado, ya que crece demasiado grande, con unas cañas muy bonitas pero, lo malo es que al elote no le da tiempo de madurar, la mazorca no llena y es alcanzada por el hielo.*

El señor Onésimo sugiere: *es mejor sembrar el maíz criollo de la región ya que está más adaptado a las condiciones climatológicas de la zona y, aunque las cañas sean pequeñas, y las mazorcas también lo sean, al menos son seguras. El maíz criollo es el que mejores resultados nos ha dado en el poblado de Mariano Matamoros.*

También mencionan que en la población del municipio de Plan de Ayala, cuentan con sumideros naturales en donde el agua de lluvia tarda almacenada hasta 15 días, y, ahí según ellos se podría construir una presa para almacenar la gran cantidad de precipitación que se presenta en unos días o en unas horas. El día en que se destapa el sumidero, en dos horas se pierde el agua que se tenía almacenada, aunque esta humedad se pierde, permite que se mantengan los niveles del río de Santa María Texcalac y Tetla.

Ante esta situación que generalmente se presenta en el Estado, con poca precipitación o con una distribución temporal no homogénea de la misma pero con “intempestivas precipitaciones”, es difícil hacer algo por retener esa gran cantidad de humedad que en la mayoría de los casos arrastra consigo gran parte de la capa arable sin que esta se pueda recuperar.

Comentan los productores: *si la precipitación se pudiera almacenar, se captarían miles o millones de litros de agua de lluvia que precipitan en unas pocas horas o en pocos días, al almacenarla, los excesos se podrían aprovechar para riego, de una manera más racional e integral en actividades secundarias como la acuacultura, por ejemplo.*

*La precipitación almacenada se podría utilizar, cuando la lluvia no se presentara de una manera normal o, cuando hace su aparición la “canícula” (sequía intraestival) que*

*ocurre en los meses en que a los cultivos les hace más falta la humedad para el llenado y maduración del grano.*

*También comentan: una de las maneras o alternativas de solución para ayudar a los cultivos, es el riego, en principio para sembrar a tiempo, y, cuando se presente la sequía y el cultivo se encuentra en pleno desarrollo y madurez, no se “chupe” la semilla (el grano no llena por falta de humedad), y como consecuencia se pierdan los cultivos.*

*El señor Faustino comenta: la inquietud de represar las aguas de precipitación, se propuso desde los años setentas por los productores del municipio al gobierno del Estado, pero siempre argumentaron que era un gasto demasiado excesivo y que no era posible realizar el proyecto.*

*En la actualidad dice: seguimos insistiendo en el mismo proyecto para no ver tanta agua de precipitación desperdiciarse sin que ésta pueda ser canalizada a las tierras de cultivo que es en donde se necesita, ya que sabemos que en la actualidad, la falta de agua es uno de los principales problema a nivel mundial.*

*Todos los productores coinciden al decir: Existiendo agua, aunque el ambiente este frío o caliente se tiene la alternativa de generar vida a través de los cultivos, además de termorregular el clima.*

*Si contáramos con agua no sería necesario sembrar precisamente maíz, que en estos momentos ya no es rentable, pero tendríamos la alternativa de sembrar hortalizas como el betabel, zanahoria, ajo, lechuga etc. además de que el hielo no los afecta directamente. Si se construyeran las represas, el agua se podría utilizar como una alternativa para la siembra del ajolote, acozil carpa etc. generando nuevas fuentes y alternativas de alimento y dinero extra para todos los productores.*

#### 4.8 Indicativos físicos y biológicos para la presencia de eventos climáticos

Dentro de las entrevistas realizadas, los productores también comentaron algunas de las experiencias que han obtenido a lo largo de los años para tratar de entender algunos eventos climatológicos especiales que pueden beneficiar o dañar sus cultivos y sus comentarios fueron los siguientes.

*Cuando observamos a nuestro alrededor y vemos la influencia de los vientos que soplan a través de las montañas cuando inicia el año, y dependiendo de la zona de donde provienen, sabemos si va a ver precipitación o no, y de antemano creemos saber si va ha ser un año bueno con baja o nula productividad. Si esos vientos vienen cargados con humedad y caen buenas precipitaciones en enero y febrero, para marzo ya hay flores o zonas verdes y mencionamos un dicho que dice “marzo florido, año perdido”.*

*Cuando las precipitaciones son buenas en febrero, generalmente en abril o mayo la precipitación es muy baja por lo que si nosotros sembramos maíz, no tendremos la cantidad de precipitación necesaria para que se desarrolle y madure el mismo sin que se vea amenazado por una helada en agosto o septiembre.*

*Comentaron: Recordemos que el maíz requiere de un mínimo de seis meses de lluvia para que sea una buena cosecha y, si le falta humedad no se desarrollara aceptablemente por lo que seria necesario cambiar de cultivo para no perder el ciclo agrícola y, lo único que podemos sembrar es cebada, trigo o avena, ya que estos cultivos requieren de menos humedad y con que llueva cuatro meses el cultivo se logra.*

*Comenta otro productor: lo mismo sucede con la presencia de lluvias en abril, cuando estas se presentan en forma regular a lo largo del mes sabemos casi con certeza que ese será un año muy productivo, y, lo mismo, mencionamos otro dicho que dice lluvias de abril, granos mil.*

*Otro productor mencionó, que existe un indicativo muy peculiar en la zona de la Malintzi o en la sierra de Tlaxco, cuando él ve que se forman los “gigantes de nubes”*

(nubes grandes y profundas), y, si existe humedad en el ambiente y ha estado lloviendo, la precipitación continuará, pero si es poca la humedad existente, aunque estén presentes “los gigantes”, la precipitación ya no se presenta y trae consigo sequía.

Lo mismo ocurre cuando a la Malintzi se le forma una nubosidad en la parte superior, en forma de “sombbrero” y dependiendo de la forma del mismo y, del lado en que se encuentre más cargado dicho “sombbrero” es el lugar en el que se va a depositar la precipitación, si la nube se ve cargada hacia arriba con vientos del este va a llover en el lado norte del Estado.

Un productor muy espontáneo dice: En el pueblo (Capulac), existe un indicativo en los animales de la región, si el pelo del caballo se eriza o se enchina es una señal de que en 2 o 3 días a más tardar, va a helar en la zona.

También menciona Don Ernesto Lozada: En la población de El Rosario, en la zona de Tlaxco, se fijan en el viento de la tarde, tomando como referencia la sierra de Tlaxco y, si se nota, un día antes de que se presente una helada, un color azul muy claro (mucha visibilidad en el monte), es una señal inevitable de la presencia de una helada. Existe otro indicativo biológico en el campo y se trata de un ave que le llaman Lili o Sarnícula, esta ave tan luego empieza a cantar, no tarda en helar.

Un comentario en el que la mayoría de los productores estuvo de acuerdo, fue que cuando las golondrinas vuelan muy alto anuncian la proximidad de las lluvias sin temor a equivocarnos.

Del mismo modo existen unas aves que les llaman Hilamas, y, cuando éstas trinan en las mañanas, anuncian la temporada de lluvias:

Sería bueno realizar un trabajo a nivel de campo para conocer el comportamiento animal, como un indicativo biológico para detectar eventos climatológicos especiales con hormigas, mariposas, golondrinas, topos etc.

## 4.9 Factores que pueden contribuir a un incremento de temperatura en el Estado

A lo largo de la historia de la tierra han existido diversos eventos de cambio climático, aún cuando no habían aparecido los seres humanos, siendo las glaciaciones un ejemplo de ello. Por otro lado, cualquier variación en la posición del planeta con respecto al sol, determinaría un cambio radical en las condiciones climáticas.

Existe una variabilidad natural en el clima, determinada por las fluctuaciones naturales del sistema como las actividades volcánicas, por ejemplo. Esta variabilidad natural se ve reflejada en las diferencias tan marcadas en las series de tiempo de temperatura, precipitación y radiación solar por mencionar algunas.

Las acciones humanas que indujeran a un cambio en el clima podrían quedar enmascaradas por la variabilidad natural, por lo que su identificación no es sencilla. La detección de este cambio implica demostrar que las variaciones observadas son altamente inusuales, en un sentido estadístico.

Para la demostración de que estos cambios son por la acción humana, se deben establecer relaciones de causa - efecto, dentro de un sistema con retroalimentaciones muy complejas en el clima planetario.

El factor central que lleva a deducir un posible cambio climático por acción humana se basa en la evidencia del incremento notable en las concentraciones de los llamados gases de invernadero en la atmósfera. Estos son emitidos por la quema indiscriminada de combustibles fósiles en los procesos industriales para satisfacer las necesidades del hombre en su desmedido crecimiento a nivel mundial, y por los cambios de uso del suelo fundamentalmente.

Estos fenómenos sociales de la quema indiscriminada de combustibles fósiles y de deforestación, que se ven a nivel, mundial se ven reflejados a menor escala en el Estado de Tlaxcala.

De acuerdo a los datos estadísticos de población y vivienda, la población total en el Estado para 1960 era de 346,699 habitantes, en 1970 aumentó a 420,638, en 1980 a 556,597, en 1985 ascendió a 633,111 personas y de acuerdo con el XI Censo de Población y Vivienda de 1990, la entidad contaba con 761,227 habitantes. Se estimaba que para el 2000 la población sería de un millón de personas aproximadamente. La densidad de población media actual es del orden de 242 habitantes por kilómetro cuadrado (INEGI).

En la actualidad se tiene mayor extensión de áreas urbanas, complejos industriales, se ha modificado el uso y vocación del suelo, se talan y desmontan grandes áreas forestales, se introducen cultivos exóticos no aptos a las condiciones climáticas del estado etc. Todas estas acciones pueden ser un indicio o complemento de como las actividades antropogénicas están modificando el clima, al modificar variables climáticas.

Aunado a los problemas mencionados, más del 90% del suelo Tlaxcalteca presenta problemas de erosión en diferentes niveles que van de una erosión ligera a una erosión muy fuerte debido a los fuertes vientos o a las lluvias torrenciales. La acción de la erosión hídrica, en Tlaxcala puede ocasionar pérdidas de 471 ton. de suelo/ha./año, y la eólica de 113 ton. de suelo/ha./año.

De igual manera existe un manejo inadecuado de agroquímicos (fertilizantes, pesticidas, plaguicidas etc.), los cuales contribuyen en gran medida a la contaminación de los mantos freáticos. Para las descargas de aguas municipales e industriales existen 6 plantas de tratamientos de aguas residuales, 2 pantanos artificiales y 30 sistemas lagunares.

Se producen aproximadamente 1600 ton. de basura diaria, de las cuales están reportadas 85% de origen municipal y 15% de origen industrial y de servicios, el Estado cuenta con 6 rellenos sanitarios, se tiene registradas 2080 fuentes fijas de emisiones contaminantes a la atmósfera por las industrias, de éstas, 20 son hornos tabiqueros y 200 hornos alfareros, existen 44 gasolineras, 6 gaseras y un centro distribuidor que genera

vapores de hidrocarburos no combustionados, además circulan 71,219 unidades vehiculares que emiten sus gases contaminantes a la atmósfera y, por la cercanía con la ciudad de Puebla y la topografía de la zona en el Estado de Tlaxcala, recibimos una aportación considerable de contaminación a la atmósfera (plan estatal de desarrollo 1999).

Todas estas actividades pueden ser un complemento para que se esté presentando un cambio en el clima a escala regional reflejándose en forma de lluvias tardías, lluvias intensas pero poco frecuentes, heladas inesperadas, granizadas, etc. todo esto hace de la actividad agrícola un gran reto para los productores.

#### 4.10 Señales de anomalías climáticas: ¿cambio climático?

Existen eventos climatológicos que se generan en zonas aparentemente fuera de la influencia directa de la República Mexicana y sobre todo del Estado de Tlaxcala y, más sin embargo, los efectos del evento climatológico se manifiestan en la misma, por ejemplo: Cuando se tiene la señal monitoreada del enfriamiento de los océanos que rodean a la República Mexicana, se crean las condiciones propicias para que todo el Estado de Tlaxcala se enfríe y se presenten las primeras heladas.

Los productores comentan que el clima en la actualidad, ya no es el mismo, que ven muchas variaciones climáticas, por ejemplo, *que el periodo de lluvias y el ciclo agrícola ya se recorrieron, que ya no llueve como antes, que, en la actualidad hace más calor que en otros tiempos etc.* y, vuelven a retomar lo siguiente: *1998 fue muy cálido, con baja precipitación y lluvias intensas a fin de año.*

*1999 fue muy frío con muchas granizadas y heladas que se presentaron en diferentes meses del año y en casi todo el Estado.*

*Sabemos que en el Estado existen microclimas que no son afectados por las heladas, sin embargo en 1999, los cultivos fueron seriamente dañados. Creíamos que esos lugares eran las zonas más protegidas del territorio y, no fue así.*

*En la mayor parte del Estado, las heladas inesperadas suelen presentarse en mayo y, las normales de temporada en septiembre y octubre, acompañadas generalmente por*

*granizadas, justo cuando los cultivos y en especial la cebada se encuentra madura. En 1999, sin embargo, las primeras heladas se presentaron en mayo, continuándose en junio y julio, además de las que se presentaron el 19, 20 y 21 de septiembre que en muchas partes del estado acabaron con los cultivos, lo cual implica que casi heló en la mayor parte del ciclo vegetativo de los cultivos.*

*En Cuapiaxtla y Huamantla heló el 14 y 15 de agosto de 1999, cuando el maíz empezaba a jilotear (florear), con esto se retrasaron los cultivos y no maduraron. Al presentarse las heladas de septiembre (19, 20 y 21), perjudicaron los cultivos en aproximadamente un 40% y las heladas de octubre (24, 25 y 26), acabaron los cultivos en un 100%.*

#### **4.11 Alternativas de nuevos cultivos introducidos al Estado**

Con base en los comentarios y sugerencias de los productores, ellos piensan que si es posible tener alternativas de solución en el Estado para hacerle frente a algunos obstáculos climatológicos que se presentan en el agro tlaxcalteca.

*Sugieren: se requiere tener una infraestructura adecuada para la introducción de nuevos cultivos, ya que en el Estado no se cuenta con la maquinaria suficiente y adecuada para sembrar en el momento preciso, en la misma fecha y de una manera masiva en todo el Estado.*

*Recordemos, (continuando con la charla) que el simple hecho de sembrar con 2 o 3 días de diferencia, hace que los cultivos se retrasen y como consecuencia se vuelven susceptibles de ser dañados por las heladas o las granizadas y no se pueden aprovechar los ciclos de vida corto de algunos cultivos en una forma optima.*

En la población de Plan de Ayala, los habitantes han mostrado una gran apertura a la información del pronóstico combinado con su experiencia, por ejemplo: optaron por cambiar la tradicional siembra de maíz, a cebada a través del programa kilo por kilo que les ofrece la dependencia del INIFAP, a los productores del Estado, como resultado de los pronósticos que indicaban que el ciclo húmedo se redujo.

Con relación a la precipitación, los productores han observado que las lluvias en la actualidad son más esporádicas y muy intensas y dicen: *“vemos con mucha tristeza como se va el agua sin que podamos hacer nada para canalizarla a nuestras tierras de cultivo”*. Ante esto la producción es baja o casi nula perdiendo año con año los insumos y las cosechas.

*Ahora nuestra intención, es obtener la mayor cantidad de granos y forraje para impulsar la producción ganadera como una alternativa de apoyo económico en el campo, si sembramos maíz, va a ser únicamente para autoconsumo ya que con una buena cosecha de un año, lo podemos almacenar hasta por 3 para autoconsumo.*

*De esta manera no estamos supeditados a la producción casi nula del campo, ya que nos vamos ayudando con los productos obtenidos de los animales (vacas, chivos y animales de traspatio). Con esta nueva alternativa incluso ahora se puede poner en práctica la conservación del suelo al sembrar cebada y nopal como forraje para alimentar el ganado.*

Comentan también que en la misma población cuentan con un proyecto de 30 hectáreas de nopal tunero, solo que este no produce, ya que dicen: *el nopal esta muy enfermo, tiene chahuixtle, se ve lleno de humo, goma y esta muy plagado y, según un experto dice que el nopal esta sirviendo como captador de la contaminación atmosférica que se genera en el corredor industrial de Ciudad Xicohtencatl.*

*Ante esta situación, la contaminación que generan algunas fábricas, no nos permiten establecer este ni otro tipo de cultivo, por lo que estamos pensando, en que si los nopales están limpiando el ambiente, nosotros podemos establecer un convenio con los empresarios ante la alternativa de limpiar el ambiente de la zona y poder cobrar a las empresas este servicio que están realizando las plantas de una forma involuntaria, a cambio de nuestra producción.*

Existen otras alternativas en convenios que se están realizando con otros países, a través de programas de gobierno por ejemplo, miembros de la embajada China, han venido al

estado de Tlaxcala con la intención de capacitar a los productores e introducir el cultivo del arroz. Están empleando semillas del país mejoradas genéticamente para obtener cultivos precoces con producciones aproximadas de 12 ton/ha. Según los capacitadores, en los países nativos donde se produce el arroz, tienen problemas con la producción del grano, ya que la semilla está saliendo vana y, les está resultando infructuosa la producción del mismo, por lo que están buscando otros lugares para introducir y cultivar el arroz, haciéndose cargo de la producción.

Ante esta alternativa, los productores tlaxcaltecos, están mostrando gran interés ante la alternativa de un cambio de cultivo que sea más redituable y menos riesgoso que el maíz.

En las pruebas experimentales que se han realizado, se han dado cuenta los productores que pueden aprovechar el cultivo del arroz de una manera integral, el grano como alimento y la cascarilla y la paja para forraje de sus animales. De hecho, el arroz tiene más nutrientes que el maíz, lo cual puede complementar la alimentación del productor y sus familias.

Las zonas que potencialmente se han elegido para el cultivo del arroz con base a sus características físicas y edáficas, en las que ya se ha experimentado con el cultivo son: Teacalco, Nativitas, Tepetitla, Tlaxco, Tetla y Huamantla.

#### 4.12 Señales de cambio climático en el Estado

Ante la gran cantidad de comentarios que surgieron en las entrevistas, algunos de los productores de mayor edad y con la vasta experiencia que han tenido a lo largo de su vida en el campo, nos comentaron que en sus tiempos escuchaban pláticas de personas de mayor edad, y por ejemplo, el señor Onésimo Pérez de la población de Tlaxco comentó: *Existen ciertas enseñanzas que se aprenden a través de generaciones, mi abuelo, por ejemplo, decía al ver la luna, mira hijo la luna trae consigo lluvia, y, para mi sorpresa en efecto precipitaba, ahora en la actualidad yo creo ver lo mismo y, aunque la luna tenga las mismas características que decía mi abuelo, no llueve.*

*El clima en la actualidad es muy engañoso ahora, hay que estarle atinando, ¿por qué?, muchos de nosotros, según sembramos a tiempo de acuerdo a nuestros calendarios y tradiciones y no logramos cosechar nada. Pero hay productores que por cualquier circunstancia se atrasan en las siembras y, sin embargo, le pegan a un año bueno obteniendo abundantes cosechas.*

*Según evidencias de los productores, el clima se va degradando y cambiando, los climas que existían hace 40 o 50 años ya no se van a tener jamás, ya no llueve como llovía antes, no hiela como helaba antes. Antes helaba bastante fuerte, incluso se cristalizaba el agua, pero eran heladas que se presentaban en su mera época de invierno,*

*En 1999 solo logramos ver una helada muy parecida a las que ocurrían hace 40 años, lo mismo sucede con las precipitaciones, antes, llovía bastante, más frecuente pero a tiempo, en marzo, muchos de nosotros ya estábamos sembrando. Yo recuerdo (dice Don Onésimo), en la zona del Rosario en Tlaxco, preparábamos las tierras de tal manera que cuando la canícula se presentaba, todas las labores de las milpas estaban realizadas, para no tener que estar moviendo los cultivos y perjudicar las flores*

*Ahora en esta época, en pleno mayo apenas estamos sembrando o todavía no lo hacemos, por falta de las primeras lluvias. También recuerdo, que cuando se presentaba una helada hace 40 años, todavía no se derretía el hielo de la helada anterior, cuando ya se estaba presentando la otra. Esto para nosotros los productores es un indicativo de que el clima se a modificado y sigue cambiando, Terminó diciendo.*

*Existen otras evidencias que dicen, son muy claras por ejemplo, la temperatura ambiente era distinta y tolerable, antes el sol no nos quemaba, podía uno trabajar en el campo expuesto a los rayos directos del sol por períodos prolongados sin sufrir quemadura alguna, solo teníamos la piel bronceada, ahora en estos tiempos si uno se expone a los rayos solares por un tiempo prolongado, levanta vejigas y nos produce enfermedades en la piel.*

Si me permiten, quiero mencionar algo dice un producto: *no tengo mucha experiencia en campo pero recuerdo, que entre los años de 1975 y 1983, las épocas de lluvia y el clima eran diferentes, pero de 1985 a la fecha, entre 1990 y 92, se ha ido transformando, fueron ciclos agrícolas en los que no obtuvimos cosechas. Anteriormente obteníamos 2 o 3 buenas cosechas en una década, lo cual era suficiente para poder sobrevivir y alimentar a nuestras familias y el ganado, pero de 1985 1994 casi no hemos logrado obtener absolutamente nada. Por eso hemos optado en cambiar la agricultura tradicional por la ganadería, para aprovechar los ciclos cortos de lluvias y sembrar cultivos de ciclo corto para cosechar forraje, cortarlo, empacarlo y almacenarlo para los animales.*

*El clima de hace 25 años era totalmente distinto el ciclo de lluvias era más largo, antes sembrábamos el maíz los primeros días de mayo del 1 al 5, y, como máximo al 17, ahora, estamos sembrando entre el 15 y 20 de junio, la cebada incluso, no se podía dejar de sembrar el 15 de junio, por cuestiones del seguro agrícola ya que era la fecha límite que nos daban pero, sin embargo, lo sembramos el 29 de junio por tradición y enseñanza de los productores más ancianos.*

En el ciclo agrícola (primavera – verano 1999), según muchos productores, sembraron del 8 al 17 de julio, ya que dicen ellos, *se está reduciendo la época de lluvias, anteriormente, en octubre y a principios de noviembre en “todos santos”, ya se tenía la cebada amogotada, y, todavía se presentaba gran cantidad de precipitación y granizadas. Ahora, hay pocas lluvias, y por si fuera poco en septiembre ya está helando.*

*Con la presencia de la “canícula” (sequía intraestival), que es entre julio y agosto, en ocasiones ya no vuelve a llover, lo cual acorta el período de lluvias, y, cuando llueve lo hace de una forma torrencial ya que llueve a “cantaradas” pero solo son pocos días así como se presenta la lluvia se va y no beneficia en nada a nuestros cultivos. Por lo tanto nosotros consideramos que de acuerdo a todas las evidencias antes mencionadas, el clima esta cambiando, terminaron diciendo.*

# *Resultados y Conclusiones*

---

## Escenarios de cambio climático regional

### *Escenarios de anomalías de precipitación*

Con base a los análisis realizados en los mapas de mayor isocorrelación (Fig. 3.19), se observa que para la presencia de la precipitación de invierno, hay una isocorrelación vertical por la zona del Atlántico, y que a su vez esta superconectado el océano con la atmósfera, para los campos de precipitación, su evolución para el verano generalmente tiende a ser más compleja que para los campos de temperatura. Las ecuaciones de regresión múltiple, nos muestran como el Océano Pacífico y los mares interamericanos, controlan el clima de la República Mexicana, las variables de gran escala significativamente correlacionadas con la precipitación del invierno (Fig. 3.5), nos demuestran que la vorticidad a 500 mb. es la variables más altamente correlacionada en la presencia de la precipitación del Estado (12 estaciones de 12), esto implica que la vorticidad está altamente correlacionada y afecta directamente en la presencia o ausencia de la precipitación de invierno, con la precipitación de verano la variable de gran escala más altamente correlacionada, es la temperatura de la superficie del mar (8 estaciones de 12), aunque estaciones climatológicas como Españita (número 10), Apizaco (1) y Huamantla (3), se encuentra como zonas semiaisladas, que no tienen la influencia o correlación de la temperatura de la superficie del mar, se puede decir que para la presencia o ausencia de la precipitación en ambos casos, el número de correlaciones nos muestran que es altamente complejo conocer con exactitud a que variables está asociada la precipitación, para el caso de las temperaturas (Fig. 3.6), la variable de gran escala asociada a la temperatura de invierno, es la temperatura a 700 mb. se observa que hay menos complejidad con esta variable ya que al menos para cada estación esta correlacionada con una variable, para el caso de la temperatura de verano, al menos el 50% de las estaciones esta controlado por la SST y el resto por otras variables. Con el fin de examinar las regiones donde se producirían los mayores cambios en precipitación bajo la suposición de la duplicación de la concentración de dióxido de carbono se presentan, más que los valores absolutos, las anomalías en

precipitación y temperatura, esto es, la diferencia de los campos asociados al experimento anómalo menos los de la corrida de control. El escenario de anomalías de precipitación para invierno generado por el modelo estadístico (Fig. 3.1.1), muestra que la parte este y suroeste, presentarán un decremento, mientras que en regiones del sureste, en la zona de Huamantla, y el oeste en Calpulalpan, así como la zona centro del Estado tendrán mayor precipitación, comparado con la climatología la precipitación aumentará, en el mapa, se observa que para las regiones situadas al noreste, se registran poca precipitación, en el centro del estado se observa una precipitación más homogénea y el oeste, en donde se localiza la población de Españita, es un microclima, presenta la mayor precipitación del Estado. Para los escenarios de invierno, a pesar de ser sólo un pequeño porcentaje de la precipitación anual de la región, ésta es importante por la humedad residual que queda en el suelo desde el punto de vista agrícola, ya que representa para el productor una alternativa para preparar sus tierras de cultivo sin que la semilla sufra un estrés hídrico, sin embargo, durante el verano de acuerdo a la climatología y al escenario generado por el modelo estadístico (Fig. 3.1.2), se registraría la mayor cantidad de precipitación en el Estado. Por ejemplo, los años de sequías corresponden a anomalías negativas en la precipitación durante esta estación. El escenario de verano asociado con el modelo indica que la precipitación disminuirá o lloverá por debajo de lo normal en la mayor parte del Estado, excepto en la zona suroeste donde habría un incremento, comparado con la climatología en la que se observa que casi todo el Estado presenta una precipitación generalizada y homogénea, por lo que de darse un cambio, la zona más lluviosa sería el suroeste, la menos lluviosa todo el centro del Estado y por último la zona que tendría una lluvia dentro de lo normal, sería la franja de la zona noroeste, norte y este.

Los escenarios de anomalías de precipitación obtenidos por el modelo estadístico y la similitud principalmente para el verano, parecen tener una explicación dinámica. Bajo condiciones de El NIÑO que se mantienen hasta el verano, la precipitación estacional disminuye en casi toda la República Mexicana (Fig. 3), aunque existen ciertas regiones de la República Mexicana, como Baja California, que el evento no parece afectar el régimen o la cantidad de precipitación que se presenta en forma natural, esta precipitación es la misma con o sin el evento, esta información queda registrada a nivel

regional, en el Estado de Tlaxcala, manifestándose por lo general como un año muy caluroso y con precipitación por abajo de lo normal (Fíg. 4), cabe destacar que de igual manera así como se manifiesta en la República Mexicana, con zonas muy marcadas en la disminución de la precipitación, también existen regiones en el Estado de Tlaxcala que parece ser que no le afecta dicho evento climatológico, y así lo demuestran las estaciones climatológicas de Huamantla y Españita, esta variabilidad en el cambio o disminución de la precipitación, redundan drásticamente en la economía de los productores y, en la población. De manera similar, cuando las temperaturas superficiales en el Pacífico ecuatorial del Este están por debajo de la media de verano (LA NIÑA), la precipitación en la mayor parte de la República Mexicana (Fíg. 5) está por encima de la media climatológica, quedando registrada dicha tendencia en el Estado de Tlaxcala, (Fíg. 6) ya que generalmente se ve acompañada la precipitación con la presencia de un huracán lo cual establece el período de lluvias en el verano y en gran parte del altiplano mexicano. Cuando se examina el patrón de anomalías de temperatura de la superficie del mar dado por el modelo NCAR, así como la circulación a 500 mb, se encuentra que éste corresponde a una condición de EL NIÑO. En otras palabras, se podría esperar que, bajo un cambio climático, los eventos de EL NIÑO fuesen mas frecuentes y tal vez de mayor intensidad, lo cual implicaría que las situaciones de sequía se presentarían de manera más frecuente en la República Mexicana, afectando a todos los estados, con grandes implicaciones para el régimen anual de lluvias de acuerdo a la distribución de precipitación ya mencionada.

En caso a esto se puede deducir que un gran porcentaje de la variabilidad climática a nivel regional, está representada por el evento climatológico de EL NIÑO y LA NIÑA en el Pacífico.

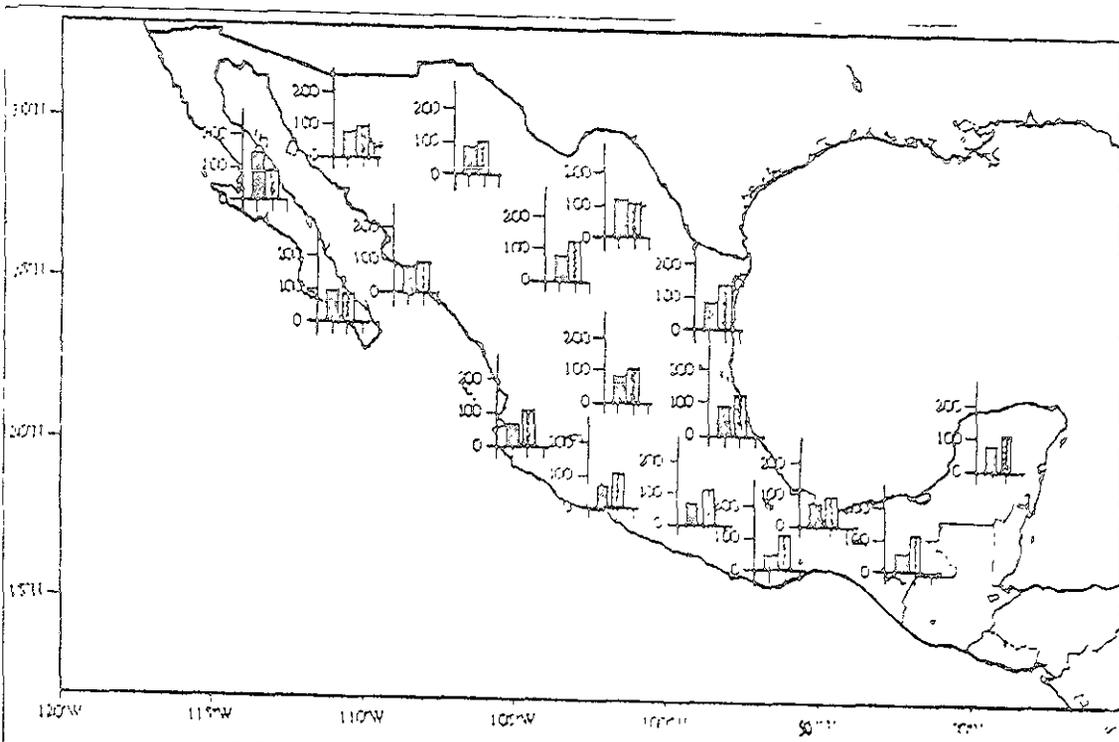


Fig: 3 Climatología de precipitación de verano durante años de NIÑO  NIÑA

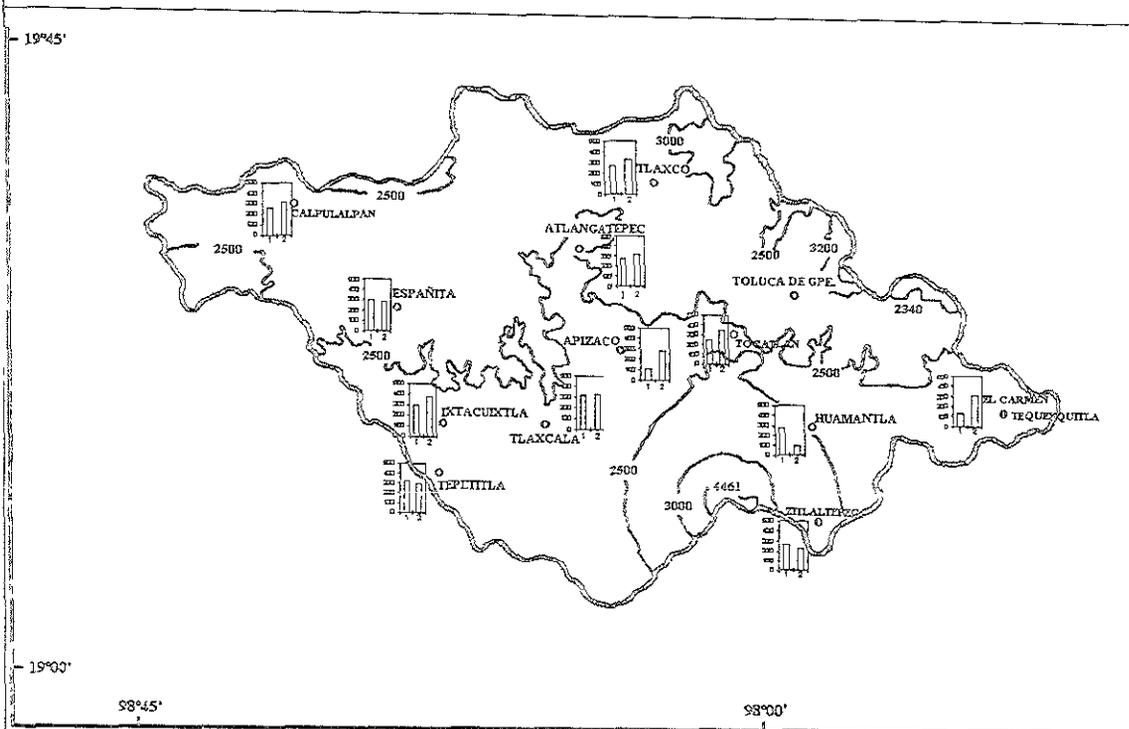


Fig: 4 Climatología de precipitación de verano durante años de NIÑO 1 y NIÑA 2

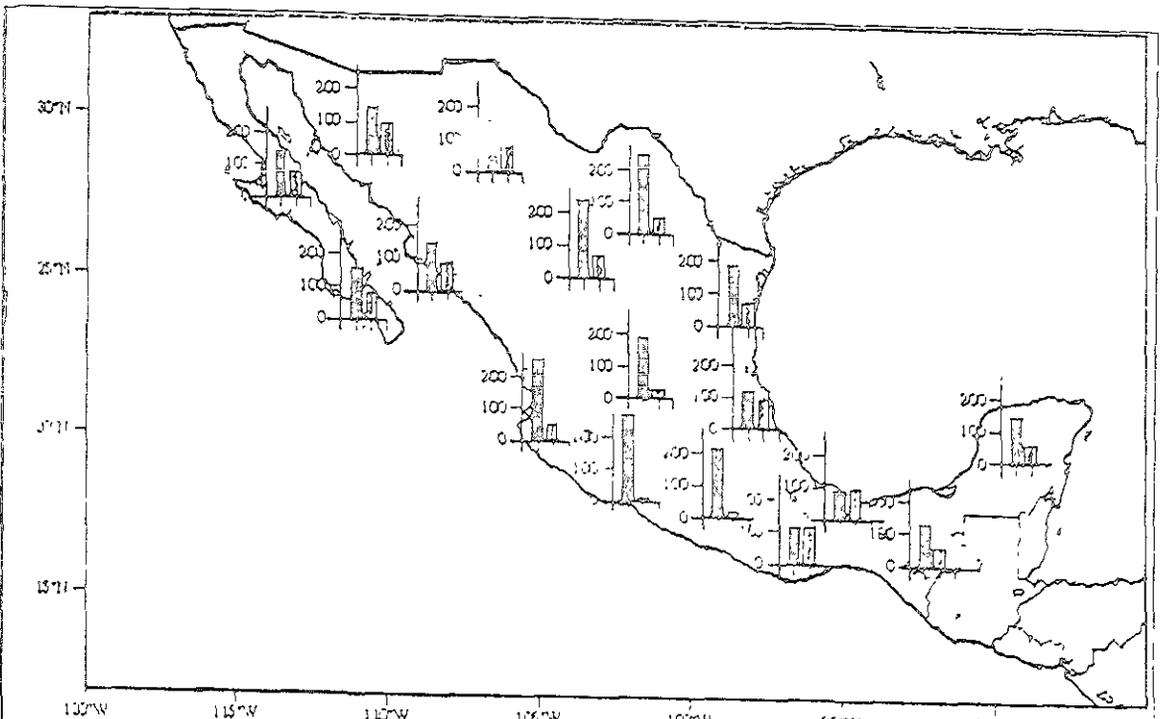


Fig: 5 Climatología de precipitación de invierno durante años de NIÑO ☐ y NIÑA □

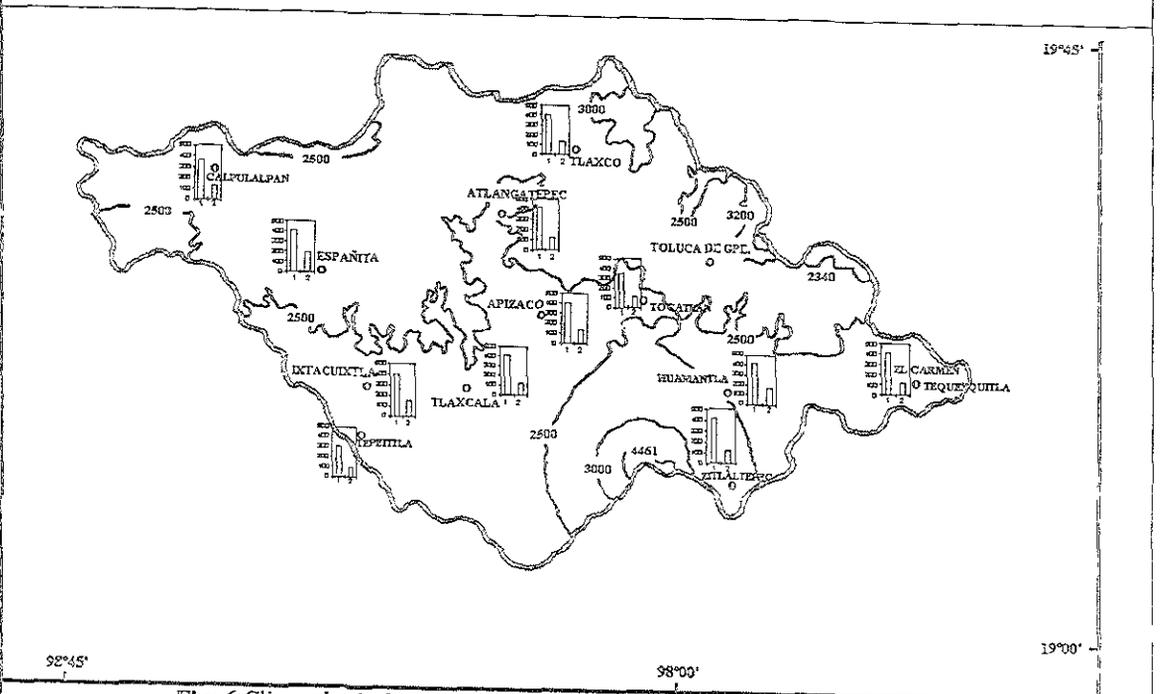
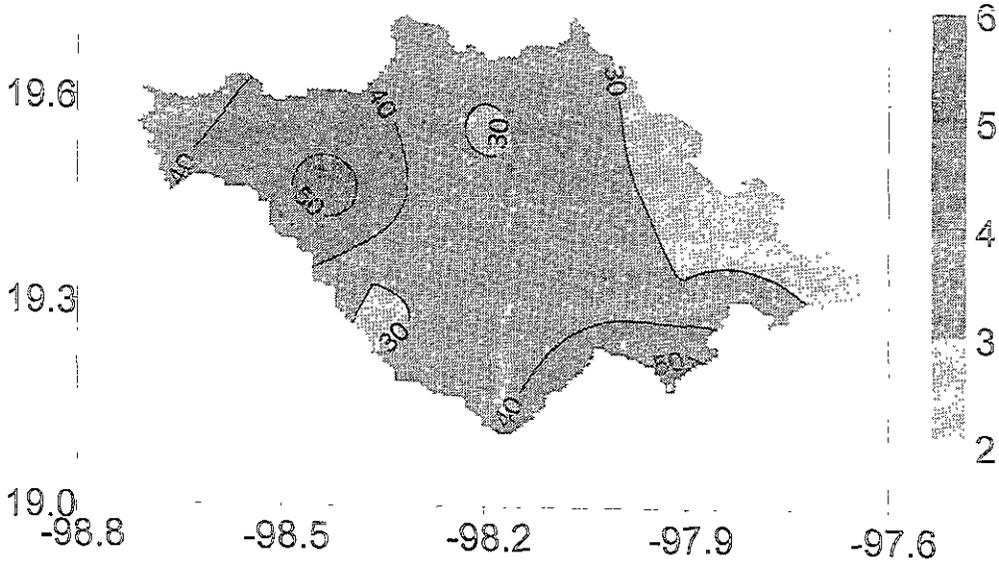


Fig: 6 Climatología de precipitación de invierno durante años de NIÑO 1 y NIÑA 2

Por otro lado, las pocas áreas que podrían ser aparentemente beneficiadas por el aumento de las lluvias, debe considerarse climatológicamente que estas zonas son las más impactadas por la incursión de huracanes que costean o atraviesan el país. De acuerdo a Emmanuel (1991), la intensidad de los huracanes está altamente relacionada al contraste térmico entre superficie del mar y de la tropopausa y estratosfera baja. Los pronósticos de cambio global indican que la superficie se calentará y la estratosfera se enfriará (radiativamente al aumentar la concentración de  $\text{CO}_2$ ), de tal forma que la eficiencia de los huracanes como máquinas térmicas aumentará y la conversión de energía potencial disponible a energía cinética también se incrementará. Tal resultado lleva a pensar que los huracanes que impacten las costas mexicanas serán de mayor intensidad, causando la pérdida de cultivos agrícolas y posiblemente pérdidas humanas entre otros impactos, que también pueden ser positivos desde el punto de vista del establecimiento del período de lluvias, en las zonas que se encuentran relativamente alejadas de la influencia directa de los huracanes, beneficiando a los productores, cuando estos tengan alternativas de solución para la programación de sus cultivos, que pueden ser variedades resistentes al exceso de humedad, de ciclos cortos (variedades precoces), o resistentes a las heladas o plagas.

### CLIMATOLOGÍA DE PRECIPITACIÓN DE INVIERNO



### MODELO ESTADÍSTICO PRECIPITACIÓN DE INVIERNO

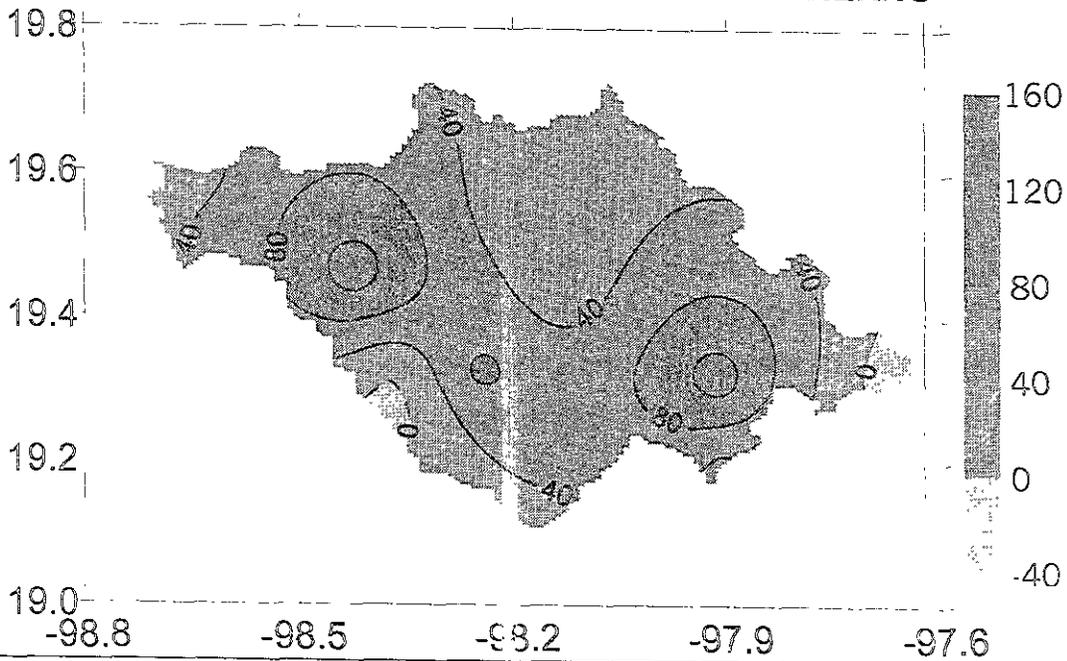


Figura 3.1.1: Patrones de precipitación acumulada de invierno (mm) observada y obtenida del modelo estadístico evaluado con observaciones de gran escala, del modelo NCAR. ESCALA APROX. 1 70000

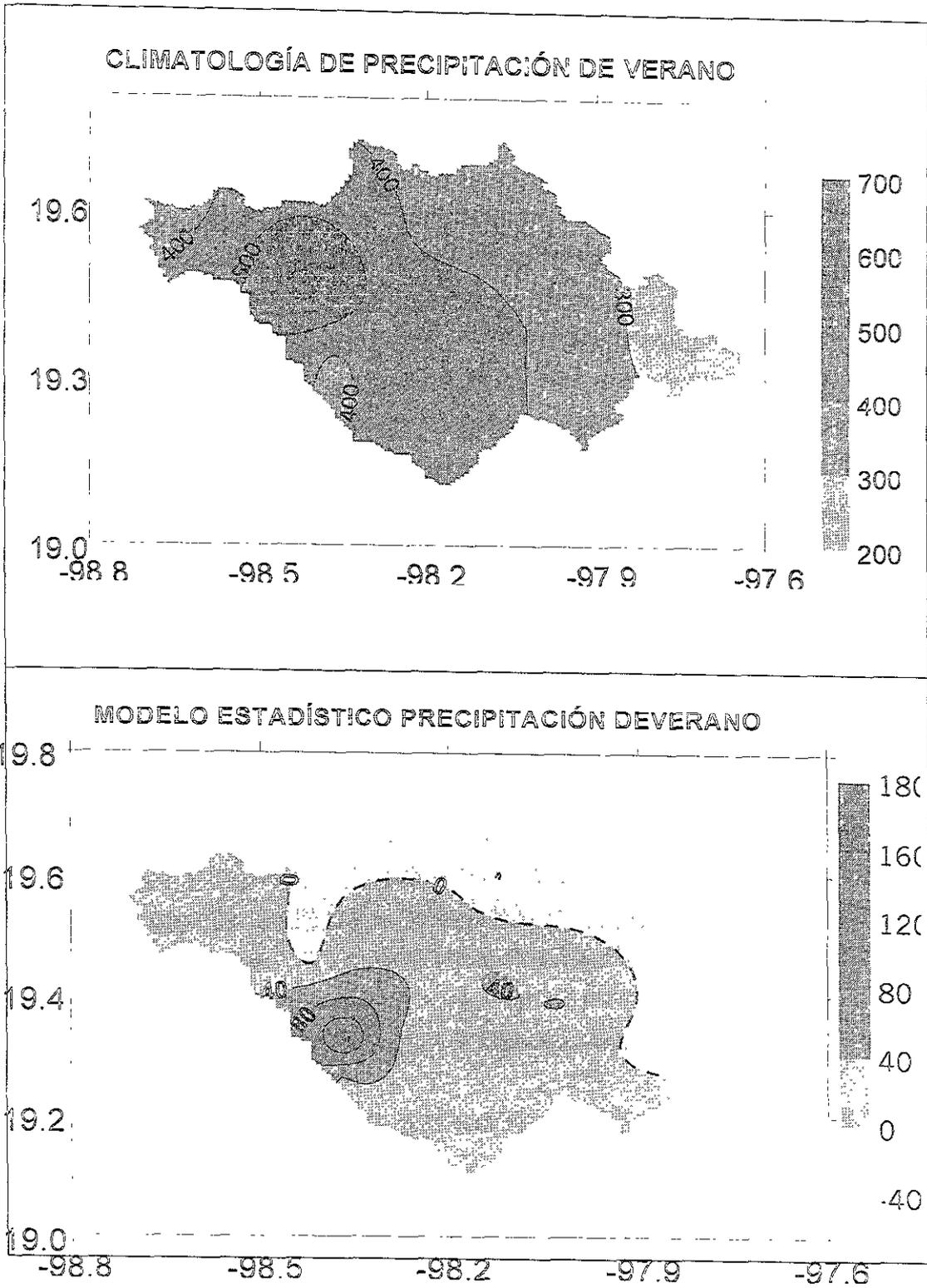
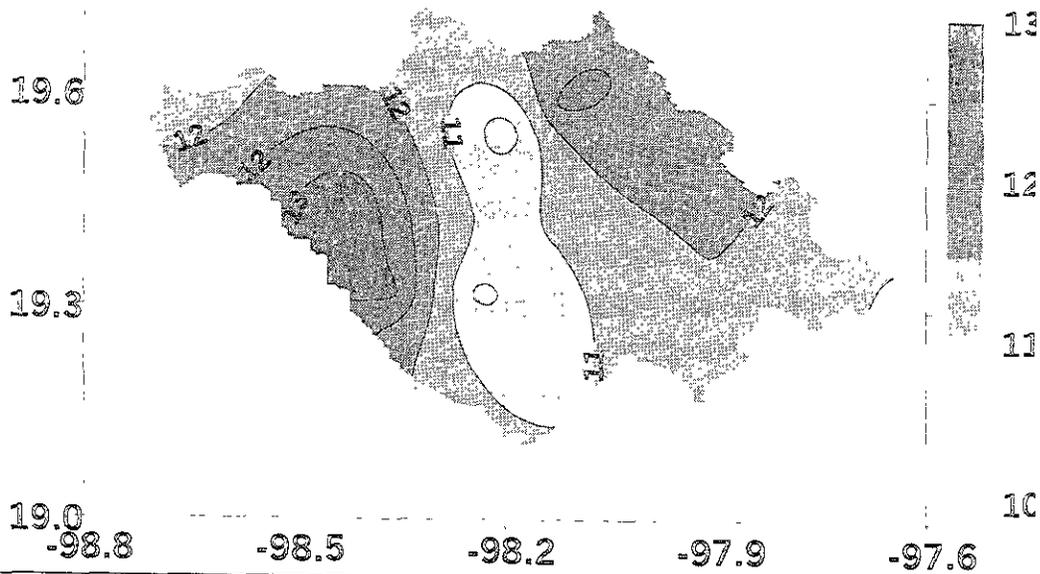


Figura 3.1.2: Patrones de precipitación acumulada de verano en (mm) observada y obtenida del modelo estadístico evaluado con observaciones de gran escala del modelo NCAR. ESCALA APROX 1 70000

### CLIMATOLOGÍA DE TEMPERATURA DE INVIERNO



### MODELO ESTADÍSTICO TEMPERATURA DE INVIERNO

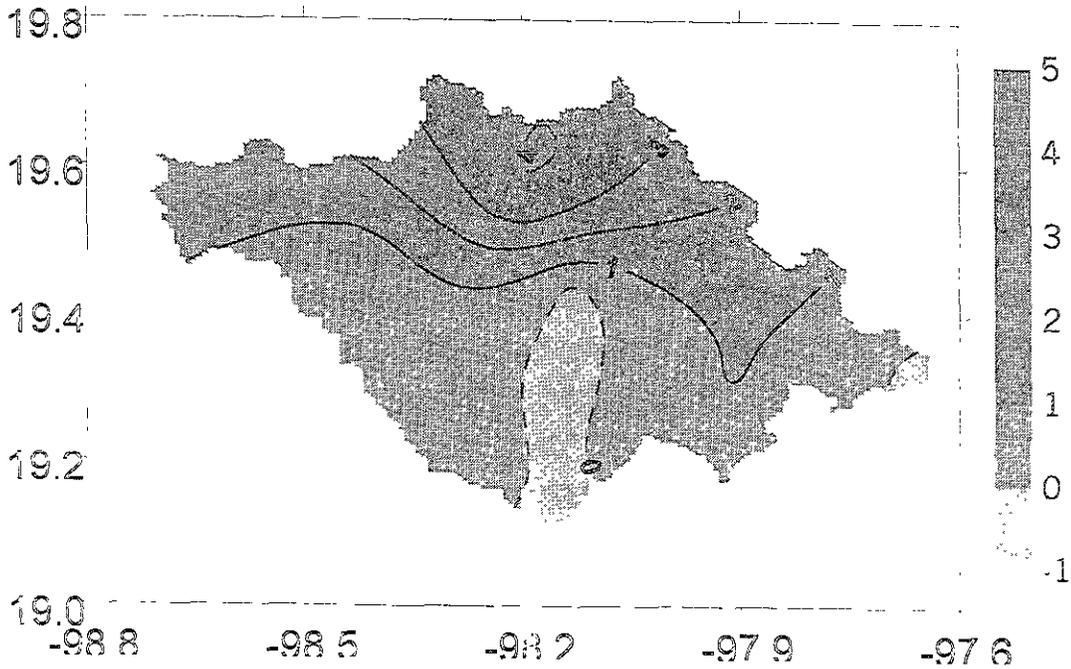


Figura 3.1.3: Patrones de temperatura de invierno observada y obtenida del modelo estadístico evaluado con observaciones de gran escala del modelo NCAR.  
ESCALA APROX: 1 70000

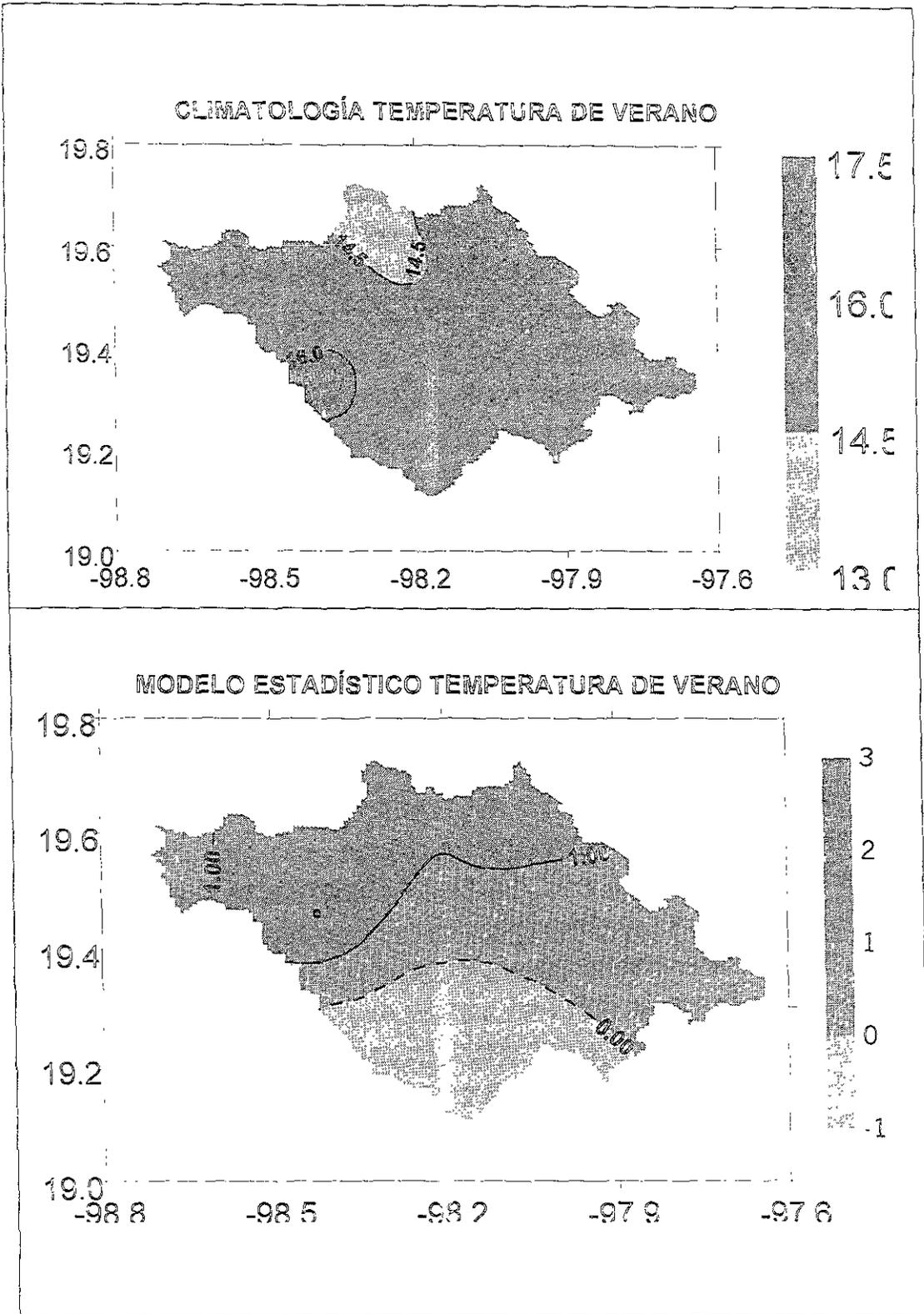


Figura 3.1.4: Patrones de temperatura de verano observada y obtenida del modelo estadístico evaluado con observaciones de gran escala del modelo NCAR.

ESCALA APROX 1:70000

De acuerdo al Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) “se ha alcanzado un avance considerable en el entendimiento del cambio climático desde 1990, y nuevos datos y análisis están disponibles”. Así mismo, “se ha concluido que el clima ha cambiado en el último siglo” y aunque se reconoce que “existe cierta incertidumbre”, se puede decir que “el saldo de las evidencias sugiere una influencia humana discernible en el cambio climático global”.

Finalmente, según el IPCC, “se espera que el clima continúe cambiando en el futuro” (*Climate Change 1995*). El IPCC sugiere que mucho del trabajo que se debe hacer de ahora en adelante consiste en entender los impactos del cambio climático a nivel regional -como fue el objetivo de este estudio- de esta manera, una de las metas principales fué el de conocer la posible señal del cambio climático sobre el Estado de Tlaxcala, como puede ser alterado el clima, la agricultura, su entorno y las actividades que se desarrollarán en el Estado ante estos cambios.

En la primera parte se mostraron evidencias de que los cambios climáticos globales, con tendencias de aumento en la temperatura media global de superficie de  $0.5^{\circ}\text{C}/\text{siglo}$  en promedio, modulan los cambios de temperatura a nivel regional (Fig. 3.1.4). Tal condición llevaría a que el sistema climático global se reajuste a un nuevo balance de energía, por lo que es de esperar cambios importantes en los regímenes interanuales en la precipitación y en los incrementos de temperatura.

Los datos de temperatura para la región del Estado de Tlaxcala muestran una tendencia de calentamiento de la superficie, con el análisis de las medias anuales de temperatura reportadas por las estaciones sugiere que existe una modulación de los cambios regionales relacionada a los cambios globales. Aunque las anomalías globales son de diferente magnitud que las regionales, la fase de las fluctuaciones de la temperatura en México coincide con la de los cambios globales.

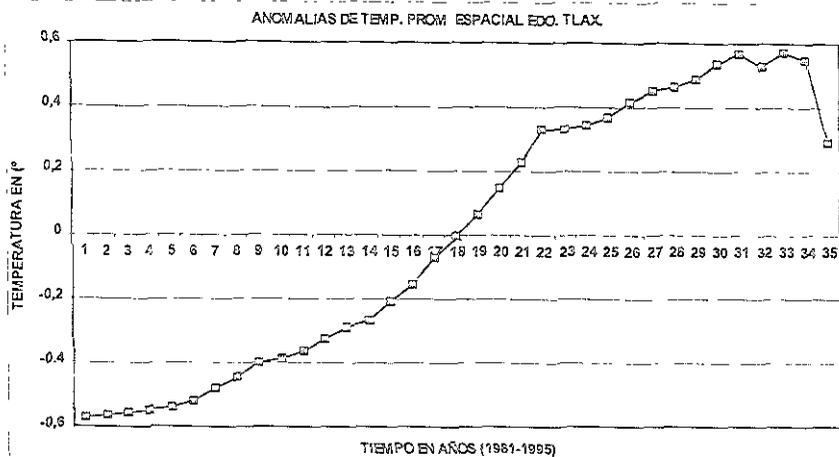


Figura 3.1.5 Anomalías de temperatura media anual (promedio espacial para el Estado de Tlaxcala).

HECHO POR S OROZCO

Aunque los pronósticos de temperatura son importantes, la variable considerada de mayor interés para el Estado de Tlaxcala, es la precipitación. Por este motivo, esta investigación se concentró en la generación de escenarios de cambio en la lluvia estacional.

El GCM incluye diferentes mecanismos de retroalimentación e interacción entre los componentes del sistema climático a gran escala. Sin embargo, aún los más complejos no son capaces de determinar las características regionales de la precipitación, por lo que este campo se determinó a partir de variables de gran escala.

La precipitación regional de invierno está altamente correlacionada con la circulación atmosférica de latitudes medias y la temperatura de la superficie del mar. En el verano, sin embargo, la precipitación depende en mayor medida de la presión a nivel del mar, de la temperatura de la superficie del océano, así como de circulaciones de mesoescala. En ambas estaciones del año las anomalías de SST se presentan como un factor clave en la variabilidad interanual del clima mexicano, por lo que la precipitación en la mayoría de las regiones es dependiente de la ocurrencia de El Niño. También hay correlaciones significativas con circulaciones y SST del Pacífico nororiental, Golfo de México y el Caribe. En base a lo anterior, se puede inferir la existencia de interacciones entre la circulación atmosférica regional de la

República Mexicana y la dinámica del océano, resaltando el papel que juega esta componente del sistema climático en el diagnóstico o pronóstico a mediano o a largo plazo de la precipitación. En consecuencia, El GCM que se use para calcular patrones de precipitación a escala de país o regional debe ser del tipo atmósfera-océano acoplados.

Para probar que la técnica de reducción de escala es viable como herramienta de predicción, el modelo estadístico (modificado) y su aplicación se tienen que poner en práctica para pronósticos de precipitación regional a largo plazo. Para ello, en el Centro de Ciencias de la Atmósfera y la Universidad Autónoma de Tlaxcala por medio del Centro de Investigaciones en Ciencias Biológicas y en el Laboratorio de Teoría del Clima y Predicción se ha iniciado en 1996 el proyecto "*Aplicación de pronósticos climáticos en actividades agrícolas en Tlaxcala*", donde se están realizando pronósticos climáticos operativamente para los ciclos de cultivo de verano y se han canalizados directamente a los productores del Estado de Tlaxcala.

Aunque los modelos estadísticos son los más comunes para pronóstico estacional operacional, es necesario entender la dinámica atmosférica que hay detrás de las correlaciones estadísticas encontradas con los datos. El modelo estadístico tiene la ventaja de ser computacionalmente económico, pero no es capaz por sí mismo de explicar las interacciones entre la circulación de gran escala y las circulaciones de mesoescala que, junto con los procesos de superficie, determinan las condiciones de clima regional. Una posible opción para el estudio de las relaciones encontradas en este trabajo consiste en realizar simulaciones con modelos dinámicos de gran escala bajo condiciones anómalas, como las sugeridas por las correlaciones.

Las simulaciones con modelos globales pueden ser muy útiles si se utilizan como condiciones de frontera para modelos de área limitada de alta resolución espacial. Los modelos de mesoescala anidados en GCM's, que corran interactivamente, prometen ser la herramienta de simulación dinámica del clima regional más poderosa de que se disponga. Con este sistema sería posible hacer simulaciones dinámicas del clima regional con resoluciones de hasta 30 km en la horizontal y por lo menos 10

niveles en la vertical, para reproducir interacciones entre diferentes partes del sistema.

En el caso del cambio climático regional, se observa que si existe una tendencia a este cambio, ya que se observa, un incremento tanto en temperatura como en precipitación en los escenarios presentados, en caso de que se siga incrementando el CO<sub>2</sub> atmosférico o cualquier otro gas de invernadero.

En base a lo anterior se sugiere explicar, desde el punto de vista dinámico, las correlaciones obtenidas, siguiendo algunas de las técnicas propuestas. Sólo bajo este marco de trabajo se podrán mejorar los esquemas de predicción, pero principalmente nuestro entendimiento de la dinámica de la atmósfera que gobierna el clima y su variabilidad sobre la República Mexicana y en esta caso en especial del Estado de Tlaxcala.

## DISCUSIÓN

Analizando los datos climatológicos que generaron Legates y Wilmott para la República Mexicana, a nivel de región, (Estado de Tlaxcala), determinan un patrón climatológico bien definido para los campos de temperatura y precipitación, y al tratar de ser generados por los escenarios ante un doblamiento del CO<sub>2</sub>, los incrementos o decrementos en temperatura y precipitación son casi imperceptibles, por lo que se requiere de tener una mayor definición a nivel regional, por lo que se procedió buscar una metodología que permitiera reducir la escala de un nivel nacional a uno regional.

Al comparar los campos generados por Legates y Wilmott la climatología de temperatura y precipitación para invierno y verano, se observa que los datos conservan la magnitud de la precipitación estacional, pero no conserva los gradientes.

Con la reducción de escala, se tiene una mayor apreciación de lo que sucederá en una zona más pequeña, ya que de acuerdo al análisis realizado en la creación de

escenarios con el modelo estadístico, se ve que la precipitación, para el invierno como para el verano, se incrementará en casi todo el Estado, por lo que el beneficio para el mismo sería grande, ya que existen muchos lugares que generalmente tienen el problema de tener una precipitación muy escasa como lo es la zona este del Estado. (El Carmen Tequesquiltla, Alzayanca, Terrenate etc.).

En base a este análisis podemos deducir que la precipitación está controlada por la interacción del flujo de gran escala y el forzamiento orográfico del Estado, el cual juega un papel muy importante para la creación o formación de pequeños microclimas los cuales, si uno conoce más a detalle sus condiciones geográficas pueden ser explotados más potencialmente con la introducción de algún cultivo alternativo que se adapte a las características climáticas de dichas zonas o en su defecto introducir otro tipo de vegetación que permita restaurar las zonas deterioradas por el hombre, o poder introducir alguna especie animal que pueda ser explotado con fines alimenticios sin alterar nuestro medio.

En los escenarios de anomalías de temperatura de superficie, con un doblamiento del CO<sub>2</sub> para el invierno, se puede observar que la temperatura tiende ligeramente a incrementarse, en todo el Estado, con un gradiente en la dirección sureste-noroeste lo cual haría que se tuviesen inviernos menos fríos, lo cual a su vez sería benéfico para todos aquellos productores que con la ayuda del riego, pudiesen practicar dos cultivos por año, o por lo menos, sembrar hortalizas y de esta manera tener un apoyo económico extra sin poner en riesgo sus cultivos, por la presencia de las temperaturas mínimas extremas que afectarían los mismos.

Para la temperatura media ambiente en el verano, el incremento de la misma sería mayor, con un valor igual a 1°C, lo cual implicaría mayor temperatura, más evaporación y producción de humedad disponible en el ambiente para la generación de precipitación, la zona norte ya no tendría temperaturas bajas tan severas y a la vez se tendría una temperatura térmica más estable.

## SUGERENCIAS:

En el caso de la variabilidad climática y de cambio climático, se sugiere que se deben continuar con este tipo de estudios pero considerando también la influencia de los océanos Atlántico y Pacífico.

En el caso particular de la variabilidad climática a nivel regional, se deben investigar otros factores que estén implicados en la misma, como la influencia de los nortes, huracanes, ondas del este etc. Aparte de los eventos extremos conocidos como EL NIÑO y LA NIÑA.

Como trabajo a futuro se propone estudiar las consecuencias dinámico-climáticas que se presentarían ante los cambios de uso del suelo en una región. Pues la deforestación, la urbanización de grandes extensiones de tierra, etc., parecen llevar a cambios en el medio ambiente, cuyo efecto puede tener consecuencias a más corto plazo en el clima regional.

Se sugiere conocer más a fondo, cuales serían los efectos de estos cambios climatológicos, que pueden ser negativos para el agro Tlaxcalteca, ya que en la actualidad con el conocimiento que se tiene sobre la climatología del Estado es posible apoyar al productor con la creación de pronósticos climáticos que le ayuden a planificar su ciclo agrícola y evitar hasta donde sea posible la realización de gastos infructuosos por parte del productor o la pérdida total de sus cultivos por no tener un conocimiento de lo que va a suceder en un futuro no muy lejano.

# Referencias

---

- Arteaga , R. R. y Castro, Z. R. 1993, "*Introducción a la meteorología.* Universidad Autónoma de Chapingo Primera Edición ISBN 968-884-227-3
- Bruce, J.P. 1990, *La atmósfera de la tierra, planeta viviente*, Organización Meteorológica Mundial.
- Conde C. Ferrer R.M. Gay C.1998, "*Variabilidad climática y agricultura*" GEO. UNAM Vol. 5 Num. 1
- Climate Change 1995, *The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Assessment Report of the IPCC*, (Cambridge: University Press), 572 pp.
- Cuaderno de Información para la Planeación del Estado de Tlaxcala.*1985 INEGI – CONAPO. VIII, IX X Censos de población y Vivienda. Dirección General de Estadística. S.I.C. e INEGI; S.P.P.
- D. Kousoyiannis and Demetris Pachaquis,1996, "*Deterministic chaos versus stochasticity in analysis and modeling of point rainfall series*" Journal of Geophysical research, vol. 101, No. D21, 26 441 - 26441 - 26451.
- Emanuel, K. A., 1991,; *The theory of hurricanes*, Annual Rev. Fluid Mech., 23, 179-96.
- FAO 1990, 1991, *Notas de investigación y varia: Documentos: Los cambios climáticos y las actividades agrícolas, forestales y pesqueras. Geografía y Desarrollo. Vol.II, Núm. 6/65-67*
- Gill, A. E., 1980,; *Some simple solutions for heat induced tropical circulations.* Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 106, 447-462.

- Glahn, H. R., and D. A. Lowry, 1972,: *The use of Model Output Statistics (MOS) in objective weather forecast*. J. Appl. Meteor., 11, 1203-1211.
- Hoskins and Wallis 1997, and D. J. Karoli, 1982,: *Statistical weather forecasting on different time scales*, Bull. Amer. Meteor. Soc., 63, 170-177.
- Kiladis, G. N., and H. F. Diaz, 1989,: *Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation*, J. Climate, 2, 1069-1090.
- Klein, W. H., 1982,: *Statistical weather forecasting on different time scales*, Bull. Am. Meteorol. Soc., 63, 170-177.
- La Jornada 1997, *Pérdidas: más de 2 millones de toneladas de granos básicos, noviembre 4:20*.
- Legates, D. R. and C.J. Willmott, 1990,: *Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation*. Inter. J. Climatology, 10, 11-127.
- Macera C. Omar. 1991, "México y el cambio climático global: un balance crítico" *Revista Ciencia y Desarrollo*.
- Magaña V. Y Pérez J.L. 1998, "Usos de un modelo de mesoescala en el estudio de la dinámica atmosférica regional de México". *GEO UNAM. Vol.5 Núm. 1*
- Magaña, V. O., and A. I. Quintanar, 1997,: *On the use of General Circulation Models to study regional climate*. 2a. Conferencia UNAM - CRAY on Supercomputing., Cambridge University Press. en prensa.
- Magaña, V. O., Morales, A. T. Pérez J.L, Conde C. Orozco F.S, Lezama G, Vázquez J.A. y Hernández V. 1999, "Experiencias para el pronóstico climatológico para actividades agrícolas en el estado de Tlaxcala". *Notas revista de información y análisis. INEGI No. 7 30-38*.
- Meehl, G. A. 1992,: *Global coupled model: atmosphere, ocean, sea ice*, Climate System Modeling, edited by Kevin E. Trenberth, 17, 555-582.
- Mundo m. Martín D. Y Martínez A. Polioptro. 1993, "Cambio climático: posibles consecuencias y algunas sugerencias para disminuir su efecto en México". *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. CNA Ingeniería Hidráulica en México*.

- Orozco F.S. 1989, "*Origen y probabilidades de heladas para el Estado de Tlaxcala*" Tesis de licenciatura en Biología Agropecuaria. Universidad Autónoma de Tlaxcala.
- Pérez J. L. 1997, "*Estudio de variabilidad climática regional en México*" Tesis de licenciatura en Física. UNAM. Facultad de Ciencias.
- Plan Estatal de Desarrollo, 1999-2005. Gobierno del Estado de Tlaxcala. Coordinación General de Ecología. Programa de Ecología y Medio Ambiente Págs. 1-7.
- Smith, J. B., and D. A. Tirpak (Eds.), 1989,: *The Potential Effects of Global Climate Change on the United States*, voi. 1, chap. 4, U.S. EPA, Washington, D. C. 345pp.
- Sud, y C.G.K. Walker, J.H. Kim, G.E. Liston, P. J. Sellers, and W. K. Lau, 1996, Biogeophysical Consequences of a tropical Deforestation Scenario: A GCM Simulation Study, *J. Climate*, 9, 3225-3247.
- Torrence C., and P. J. Webster, 1995,: *The predictability barrier in interannual variability*. In Proceedings of 19th Annual Climate Diagnostics Workshop, College Park, MD, 14-18, 454 pp.
- Vázquez J.A. 1998 *Simulación matemática del estudio de las heladas para el Estado de Tlaxcala*. Tesis de licenciatura en la enseñanza de las matemáticas. BUAP.
- Washington, W. M., and G. A. Meehl, 1989,: *Climate sensitivity due to increased CO<sub>2</sub>: Experiments with a coupled atmosphere and ocean general circulation model*. *Climate Dynamics*, 4, 1-38.
- Wilks, D. S., 1995,: *Statistical Methods in the Atmospheric Science* Academic Press, 200-202, 357 pp.