



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA GEOFÍSICA

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LA  
PRECIPITACIÓN EN TAMAULIPAS

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADO EN INGENIERÍA GEOFÍSICA  
P R E S E N T A:  
EDGAR MISAEL URIBE ALCÁNTARA

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. VÍCTOR O. MAGAÑA RUEDA

CIUDAD UNIVERSITARIA

2000

280279



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1470

**SR. EDGAR MISAEL URIBE ALCANTARA**  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**ANALISIS DE LA VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACION EN TAMAULIPAS**

- I INTRODUCCION**
- II DATOS Y METODOLOGIA**
- III CLIMATOLOGIA DEL CICLO ANUAL DE LA PRECIPITACION REGIONAL**
- IV ANALISIS DE VARIABILIDAD Y TENDENCIA DE LA PRECIPITACION REGIONAL**
- V ESQUEMAS DE PRONOSTICO ESTACIONAL DE LA PRECIPITACION REGIONAL**
- VI CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, a 31 de marzo de 2000  
EL DIRECTOR

  
ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB\*RLLR\*gtg

P

*In memoriam*

Lázaro Uribe Quintero

&

María Uribe Alcántara

## *Dedicatoria*

A todos aquellos que me han brindado su fuerza y amor.

En especial a mis padres pues este trabajo representa la madurez de un fruto cultivado durante muchos años por sus cuidadosas manos.

A mi mujer e hija por compartir conmigo espacio y tiempo, tan hermosos gracias a su bondad y dulzura.

A esos dos curiosos e inigualables seres con quienes compartí mi primer hogar como hermano primogénito: José Alfredo y Belem Marisol. Gracias por su compañía en el largo y difícil, pero cautivante, camino de los sueños.

Inolvidables mis abuelos, tíos y primos por regalarme ideas, sentimientos y gestos que me acompañarán hasta el último de mis días.

## Agradecimientos

Al Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda por su excepcional entrega y dedicación para la realización de este trabajo.

Al M.C. José Luis Pérez por su valiosa asesoría.

A la L. Belem Marisol Uribe Alcántara por su ayuda en la redacción.

A mis sinodales: Dr. Carlos Gay, Ing. Alejandro Arrollo e Ing. Andrés Tejero. En especial al Dr. Tomás Morales Acoltzi por las discusiones en torno a este trabajo.

A Rodolfo Meza por su continuo apoyo.

Nota: Esta tesis fue realizada como parte del proyecto PAPIIT-IN100697.

**“El gobierno debería ayudarnos a los indios tepehuanes porque nosotros con nuestros sacrificios hacemos llover en todo el mundo. Si nosotros no ayunáramos, si no aclamáramos a los dioses en el patio, el mundo se secaría.”**

# 1. Introducción

La mayor parte de los cultivos en México son de temporal, razón por la cual, la variación de las lluvias tiene un gran impacto en la producción agrícola. Las condiciones de sequía provocan pérdidas de cultivos y en casos extremos, hambruna y migraciones en vastas regiones del país.

Al parecer, las variaciones climáticas son ahora más intensas. Según investigadores del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) está ocurriendo un Cambio Climático Global, el cual resultará en un ciclo hidrológico más intenso, es decir con extremos (sequías, inundaciones) más frecuentes (IPCC, 1996). Las severas sequías en el norte de México durante la última década y las recientes inundaciones en el sur de nuestro país en 1999, parecen ser parte de tales cambios en el clima.

Los fenómenos hidrometeorológicos adversos nos obligan a replantear las estrategias de desarrollo de manera que consideren las variaciones en el clima, principalmente en las lluvias y eventos extremos. Por ejemplo, el uso de diagnósticos y pronósticos del clima estacional permiten definir programas de adaptación a condiciones extremas. Tal proceso casi es una realidad en el Estado de Tlaxcala (Magaña et al., 1999b).



Los investigadores dedicados a pronosticar el clima utilizan modelos dinámicos y estadísticos para realizar predicciones de lluvia o temperatura media probables. En la mayor parte de los casos, las predicciones estacionales deben incluir implícita o explícitamente las interacciones océano-atmósfera-continente, pues como se sabe hoy en día, tales interacciones son las moduladoras del clima principalmente en regiones tropicales y subtropicales.

Se espera que un mejor entendimiento de estas interacciones se traduzca en mejores pronósticos y, por lo tanto, en mayor espacio de planeación. Los años noventa han visto un avance sin precedente, con importantes resultados de investigaciones sobre variabilidad del clima y los procesos que lo modulan. Para que los beneficios de la ciencia del clima se traduzcan en beneficios a la población, se debe ahondar en el estudio del clima a escala regional, y los impactos que sus cambios tienen en sectores socio-económicos.

El clima en México está modulado en gran medida, por El Niño. Si se conocen las Temperaturas de la Superficie del Mar (TSM) a un cierto tiempo futuro, se puede tener una buena idea de los cambios que las lluvias o temperaturas, en una región determinada experimentarían.

Mediante modelos estadísticos y dinámicos se ha comenzado a pronosticar anomalías de lluvia en diferentes regiones climáticas de nuestro planeta. Para ello fue necesario establecer claramente las relaciones “TSM-lluvias regionales” y proponer mecanismos físicos que expliquen tales relaciones.

Los primeros pasos en la predicción de clima regional en nuestro país se dieron en el *Estudio de País: México* (Gay, 1994) y derivaron en investigaciones más detalladas para el Estado de Tlaxcala, donde el uso de diagnósticos y pronósticos del clima comienza a ser de gran utilidad en la planeación de actividades agrícolas (Orozco, 2000; Magaña et al. 1999c), las cuales son bastante vulnerables a variaciones climáticas.

Desde 1997, como parte del proyecto "Utilización de Pronósticos en Actividades Agrícolas en Tlaxcala" se diagnostican las condiciones y fluctuaciones climáticas dominantes y su relación con El Niño (Conde et al., 1999). Con base en este estudio se realizan pronósticos del inicio y fin de temporada de lluvias, de la lluvia acumulada y de las anomalías de temperaturas máximas, mínimas y medias con relación a los valores medios de estas variables. Los pronósticos para los veranos de 1997, 1998 y 1999 se aproximaron satisfactoriamente a las condiciones observadas (Orozco, 2000).

El éxito de los resultados obtenidos, ha alentado la planeación de proyectos similares en otras partes del país. Tamaulipas, Oaxaca y Zacatecas han mostrado interés en repetir la experiencia de Tlaxcala en el tema de variabilidad y cambio climático.

Dado el grado de detalle con el cual se requiere proporcionar información climática para actividades productivas, en esta tesis se ha decidido considerar sólo una de estas regiones al noreste de México. Realizar una investigación sobre variabilidad climática en Tamaulipas es un reto. El estado ha sufrido en los últimos años, largas temporadas de sequía que sugieren la existencia de cambios de largo plazo en el clima que pueden resultar en desertización. La gravedad de esta situación requiere de cambios en el manejo de recursos que permitan adaptarse a condiciones climáticas extremas. Por

ejemplo, el 80% de la superficie del estado se ocupa en actividades agropecuarias que dependen en gran medida de la lluvia (INEGI, 1995). Los eventos El Niño de 1982–83 y 1986–87 resultaron en sequías intensas y grandes pérdidas en el sector. En estos años los índices de producción de maíz y sorgo, principales cultivos del Estado, tuvieron una caída simultánea con los índices de lluvia (Fig. 1).

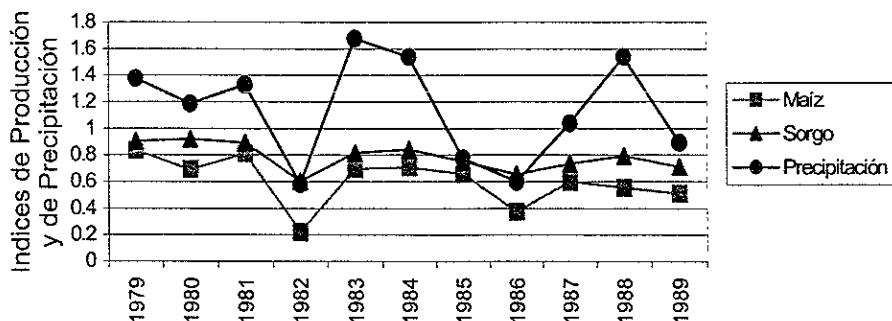
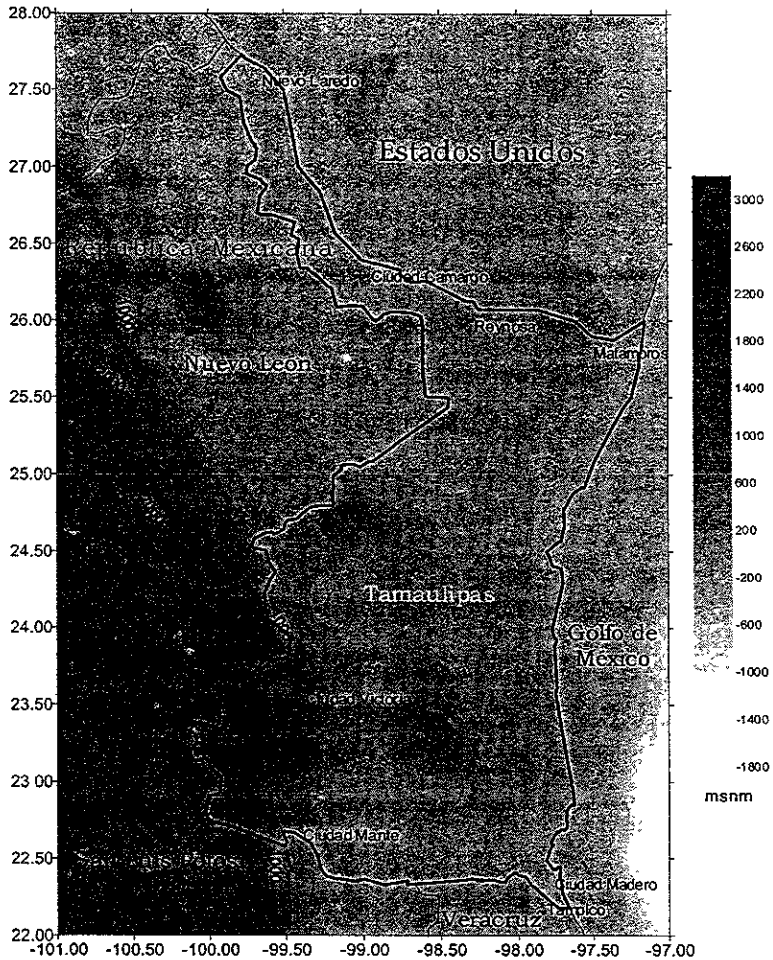


Fig. 1. Índices de Precipitación (valor observado / valor promedio) y de producción de maíz y sorgo (superficie cosechada / superficie sembrada) en Tamaulipas.

### 1.1 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS Y CLIMÁTICAS DEL ESTADO

Las características de la lluvia en Tamaulipas están determinadas por su posición geográfica, cercanía al mar y orografía. Tamaulipas está ubicado en una zona de gran subsidencia atmosférica. Se encuentra al noreste de México, colindando con los Estados de Nuevo León, Veracruz y San Luis Potosí; al este con el Golfo de México y al norte con el estado de Texas en los Estados Unidos. Su superficie es de 79,384km<sup>2</sup> y representa el 4.1% de la superficie nacional. Sus coordenadas geográficas extremas son en latitud, 27°40'N y 22°12'N y en longitud, 97°08'W y 100°08'W (Fig. 2).



*Fig. 2. Ubicación y topografía del Estado de Tamaulipas*

La colindancia del Estado con el Golfo de México lo hace vulnerable al paso de huracanes en el Golfo de México. Como es el caso del huracán Beulah, clasificado en la escala Saffir Simpson con categoría 5, éste aconteció entre el 5 y 22 de septiembre de 1967, y acumuló en un mes el equivalente al 79.63% de la lluvia anual promedio.

La Sierra Madre Oriental en el oeste de Tamaulipas da origen a episodios de lluvia intensa por efectos de forzamiento orográfico por lo que Tamaulipas exhibe una amplia gama de climas regionales.

Considerando los aspectos mencionados, el presente trabajo tiene como objetivos centrales:

- ♦ Conocer las principales características de la lluvia en el Estado
- ♦ Determinar qué fenómenos climatológicos la regulan
- ♦ Desarrollar un esquema de pronóstico que genere información de clima por regiones, que sea de utilidad en la planeación de actividades agrícolas

La investigación aquí presentada, ha consistido en buscar, analizar y relacionar variables de gran escala (principalmente TSM en los Trópicos) a las lluvias en el estado.

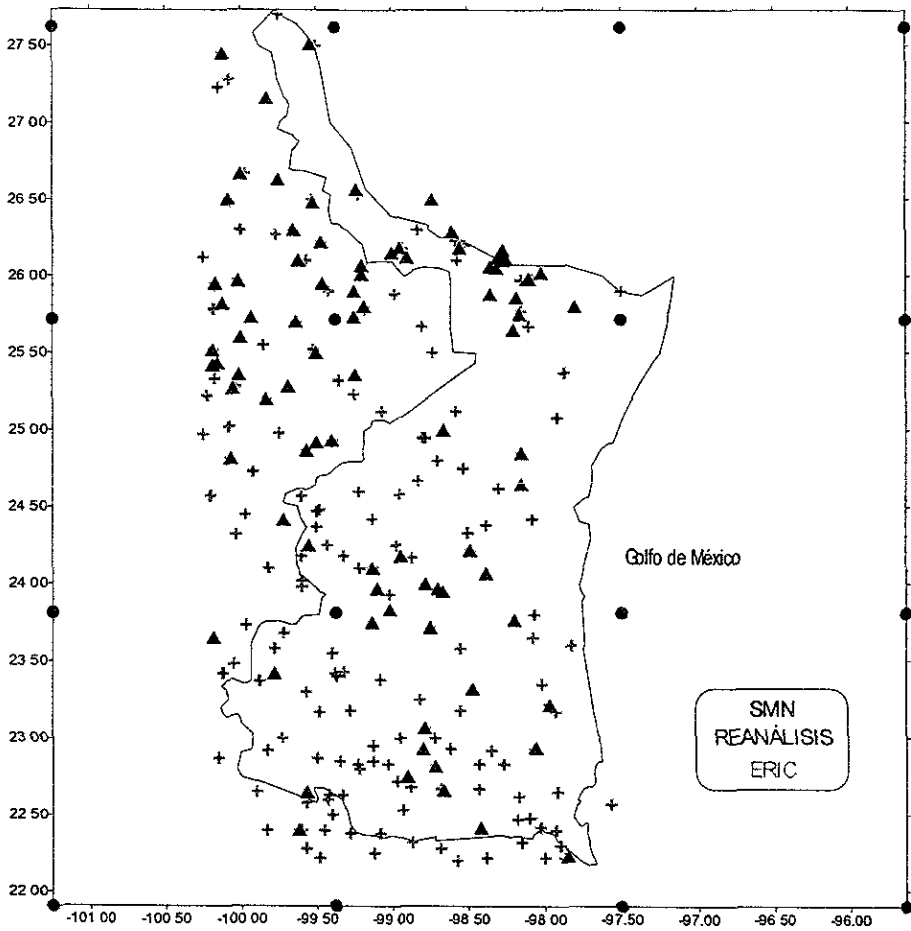
El estudio permite:

- ♦ Clasificar por regiones, regímenes de las lluvias y su variabilidad
- ♦ Describir el ciclo anual regional de la lluvia
- ♦ Analizar la distribución temporal y espacial de las precipitaciones en verano
- ♦ Documentar la variabilidad interanual de las lluvias en Tamaulipas y su relación con El Niño
- ♦ Plantear un esquema simple de pronóstico estacional de lluvia
- ♦ Distinguir la tendencia a largo plazo de la precipitación regional

## 2. Datos y Metodología

### 2.1 REGIONALIZACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL

Para este trabajo se ha utilizado la información de tres bases de datos de lluvia en el Noreste de México durante el periodo comprendido entre 1961 y 1998. La principal fuente de información entre 1961 y 1990 fue el Extractor Rápido de Información Climática (ERIC) editado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua(IMTA). La información que se obtuvo del ERIC fue la correspondiente a las estaciones meteorológicas dentro del rectángulo que abarca el Estado de Tamaulipas (Fig. 3). El ERIC contiene información para el dominio de interés de 349 estaciones meteorológicas de las cuales, 187 fueron elegidas por registrar un mayor número de datos efectivos. Además, las estaciones cubren uniformemente de información al estado, lo que es importante para obtener la climatología de la precipitación de cada mes del año, con alta resolución espacial.



*Fig. 3. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis (los triángulos representan estaciones del SMN; las cruces, estaciones del ERIC; y los círculos, datos de Reanálisis).*

El ERIC tiene datos diarios, a partir de los cuáles se obtuvieron los promedios de precipitación (mm/día) de cada estación para cada mes del periodo considerado (1961–1990). En esta obtención de promedios, se determinó que una estación carecía de información completa si para un mes faltaba más del 30% de los datos diarios. Estas series de datos mensuales fueron promediados para obtener el ciclo anual de lluvia de cada estación. Con estos valores en puntos esparcidos aleatoriamente, se crearon análisis en malla mediante interpolaciones por el método Kriging. De esta manera se

dispuso de información de lluvia en arreglos regulares de  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  para el dominio. La información en arreglos regulares permite un manejo de la información como arreglos de matrices. Por ejemplo, se puede obtener la climatología mensual. La interpolación a mallas regulares incluyó datos de Reanálisis (Kalnay et al., 1996) que fueron utilizados con el objetivo de controlar las extrapolaciones en las fronteras del dominio.

Las series de tiempo de precipitación en mallas basadas en información de ERIC abarcan el periodo de 1961 a 1990. Para determinar la precipitación en el periodo 1991–1998, se obtuvo la serie de tiempo de cada región con datos reportados únicamente por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que comprende menos estaciones que ERIC. Los campos generados sin embargo, mantienen los patrones característicos de la lluvia regional. Con estas series de tiempo se determinó el ciclo anual y las anomalías de precipitación mensuales y estacionales, para el noreste de México.

Las mallas corresponden a arreglos matriciales que facilitan el procesamiento computacional de la información, principalmente para graficar. Analizar la variabilidad de la lluvia en cada estación sería una tarea excesivamente laboriosa y redundante si se considera que una estación presenta fluctuaciones en las lluvias mensuales acumuladas similares a las de estaciones cercanas a ella. Dicha similitud puede aprovecharse para agrupar la información de estaciones por regiones, en donde las estaciones presentan fluctuaciones de baja frecuencia coherentes. El coeficiente de correlación se utilizó como índice de la similitud entre las fluctuaciones de dos estaciones. Una alta



correlación entre estaciones permite agruparlas en una misma región. Así, el procedimiento para determinar las regiones fue el siguiente:

- Se calcula la matriz de correlación cruzada a partir de los datos de la malla.
- Se realiza un Análisis de Componentes Principales a los campos de correlación.
- Con base en la primera componente principal, se determina la extensión de cada región, a partir de los patrones de variabilidad. Todas las estaciones dentro de una región deberán tener entre sí un coeficiente de correlación con valor absoluto mayor a 0.8. Esto con el fin de asegurar que las estaciones dentro de una región tienen fluctuaciones similares.
- Se obtiene una serie de tiempo representativa de cada región mediante el promedio de las series de tiempo de las estaciones que contiene dicha región.
- De esta forma, en lugar de generar cerca de 200 esquemas de pronóstico (uno por cada estación), sólo se pronostica para las regiones obtenidas, sabiendo que la anomalía climática predicha se puede aplicar a cada estación de la región correspondiente.

Una anomalía climática se define como

$$\text{Anomalía} = (\text{Valor a un tiempo dado} - \text{Valor Promedio}) / \text{Valor Promedio} \quad (1)$$

Las anomalías reflejan de mejor forma las regiones más afectadas por cambios en el clima. En el transcurso del trabajo, se utilizará esta terminología.

## 2.2 PRONÓSTICO Y MODELOS DE REGRESIÓN

El Niño determina un alto porcentaje de las variaciones del clima en México (Magaña y Quintanar, 1997). Por esta razón se analiza la relación que existe entre este fenómeno y las anomalías estacionales de la lluvia en Tamaulipas. Dicho análisis relaciona las anomalías en el clima con El Niño, cambios en la actividad de huracanes, actividad

convectiva, ondas del este, y otros sistemas atmosféricos responsables de las precipitaciones en la región.

El Niño corresponde a una anomalía en la Temperatura de la Superficie del Mar (TSM) en el Océano Pacífico Tropical del Este (Fig. 4). La amplitud de ésta anomalía parece estar relacionada a los cambios globales del clima. Sin embargo, otras anomalías en el Océano Atlántico y en el Océano Pacífico parecen también estar relacionadas con cambios en el clima. La Oscilación del Atlántico (Enfield y Alfaro, 1999) parece ser fundamental en el clima del Caribe y el Golfo de México. Para establecer relaciones de la lluvia regional con la TSM de los océanos mencionados, se trabajó con correlaciones mes a mes y con un mes de retraso en los datos de TSM globales. Por ejemplo, se correlacionaron todos los datos de lluvia en julio con todos los datos de TSM de julio y se obtuvieron patrones con las zonas de mayor correlación. Cuando las correlaciones se realizaron con un mes de retraso, se correlacionaron por ejemplo, todos los datos de lluvia en agosto con los datos en TSM de julio, para disponer de otra forma de pronóstico. Así, con correlaciones simultáneas se requiere de un pronóstico de TSM (dinámico o estadístico) para diagnosticar las lluvias a ese mes, convirtiendo el diagnóstico en pronóstico. Cuando se utilizan correlaciones con un mes de retraso, se pueden utilizar condiciones observadas para pronosticar el mes siguiente.

Los puntos en la superficie del mar, con una correlación estadísticamente significativa (magnitud mayor a 0.3) entre su temperatura y la precipitación regional, se seleccionaron para elaborar modelos de regresión. Es importante señalar, que para definir una correlación como significativa, no desde el punto de vista estadístico sino dinámico, se consideró además el mecanismo físico (teleconexiones) que relaciona las

anomalías de la TSM con la lluvia de una determinada región en Tamaulipas. Los modelos de regresión se utilizaron para pronosticar la lluvia entre julio y octubre de 1997 y 1998, considerando que durante estos meses se registran los mayores montos de lluvia. Los pronósticos de las TSM se realizan a 2, 3, 4, ..., meses a partir de abril. Hoy en día se cuenta con pronósticos confiables a largo plazo de la TSM que pueden ser utilizados para pronosticar (diagnosticando) anomalías de las lluvias regionales.

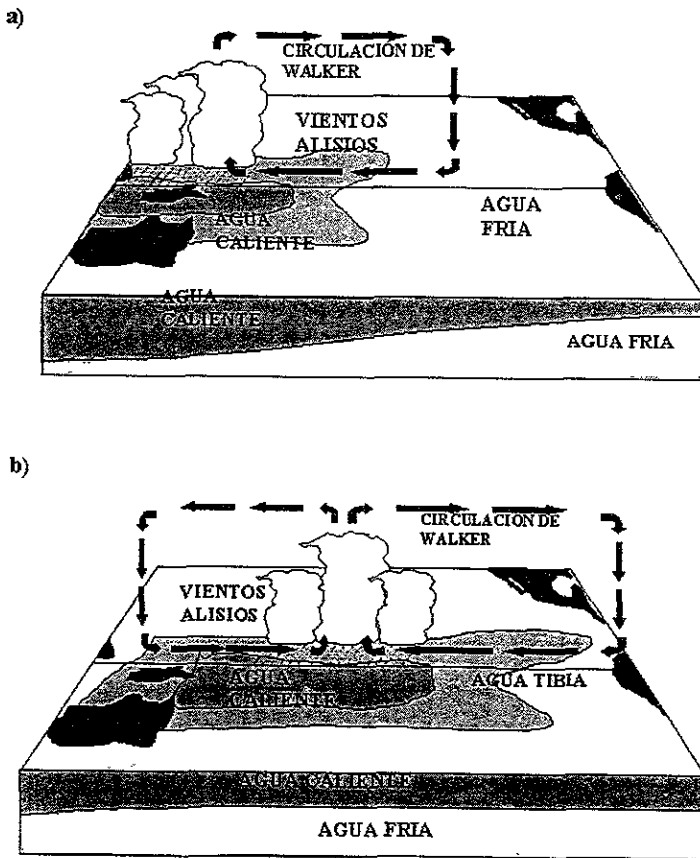


Fig. 4. Anomalías de TSM en el Océano Pacífico Tropical del Este durante un evento (a) El Niño y (b) La Niña.

### 3. Climatología del Ciclo Anual de la precipitación regional

#### 3.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN EN EL NORESTE DE MÉXICO

La Climatología de la Precipitación (Fig. 5) muestra que la temporada de lluvias comienza en mayo y termina en octubre. En esta temporada de verano, las mayores precipitaciones se concentran en el sur del Estado sobre la ladera este de la Sierra Madre Oriental. Este hecho destaca la importancia de la orografía como forzante de la precipitación, es decir, de la componente orográfica de la lluvia.

Durante invierno, las lluvias disminuyen notablemente y las mayores precipitaciones se concentran en el Norte del Estado. Esta distribución de las lluvias está relacionada a los Nortes, ciclones de gran escala en latitudes medias que afectan la costa del Golfo de México. Las regiones frontales asociadas a estos ciclones, producen descensos drásticos en la temperatura, e inestabilidad convectiva que con frecuencia se traduce en precipitación (Bluestain, 1985).

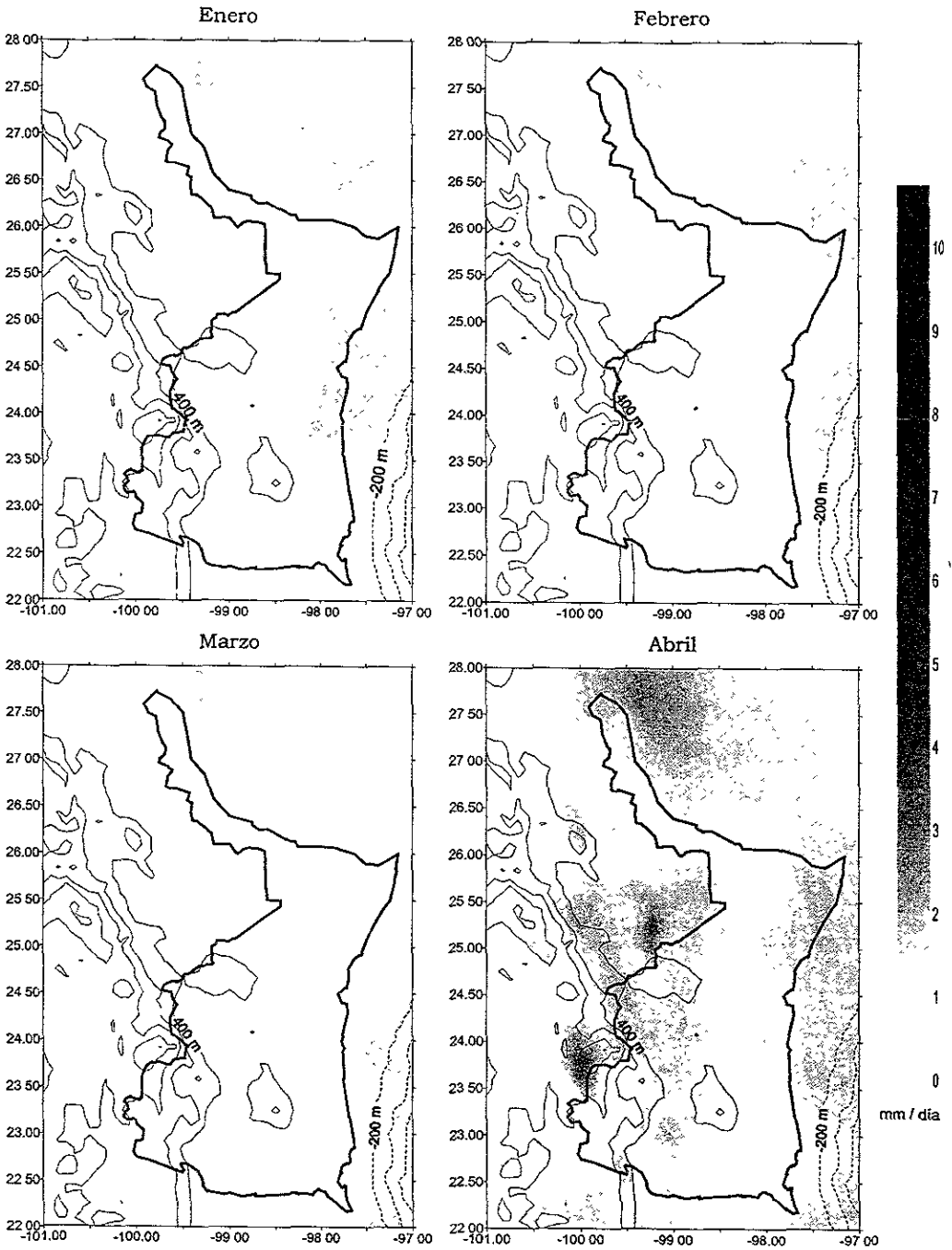


Fig. 5. Climatología de la Precipitación en el noreste de México.

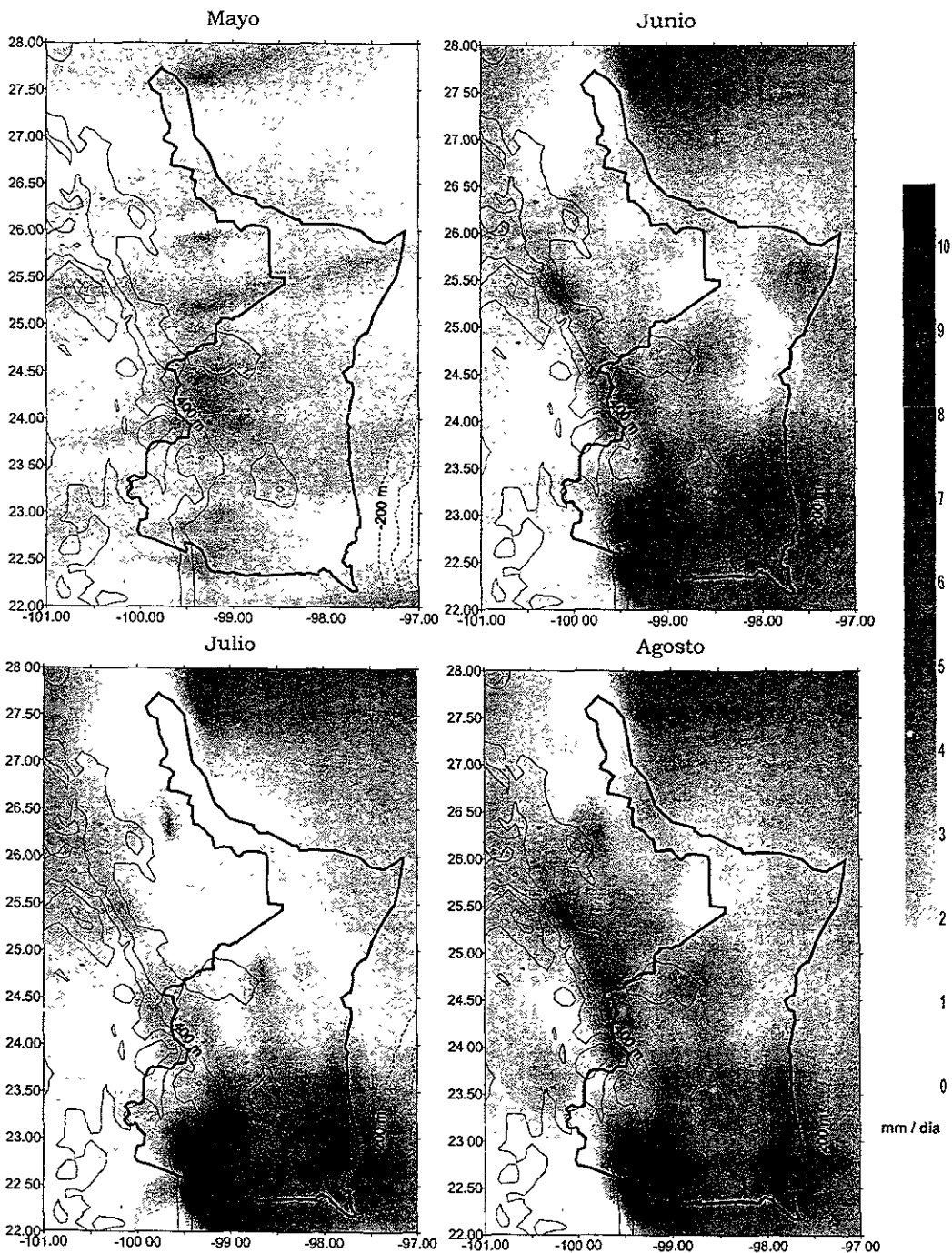


Fig. 5. Continuación.

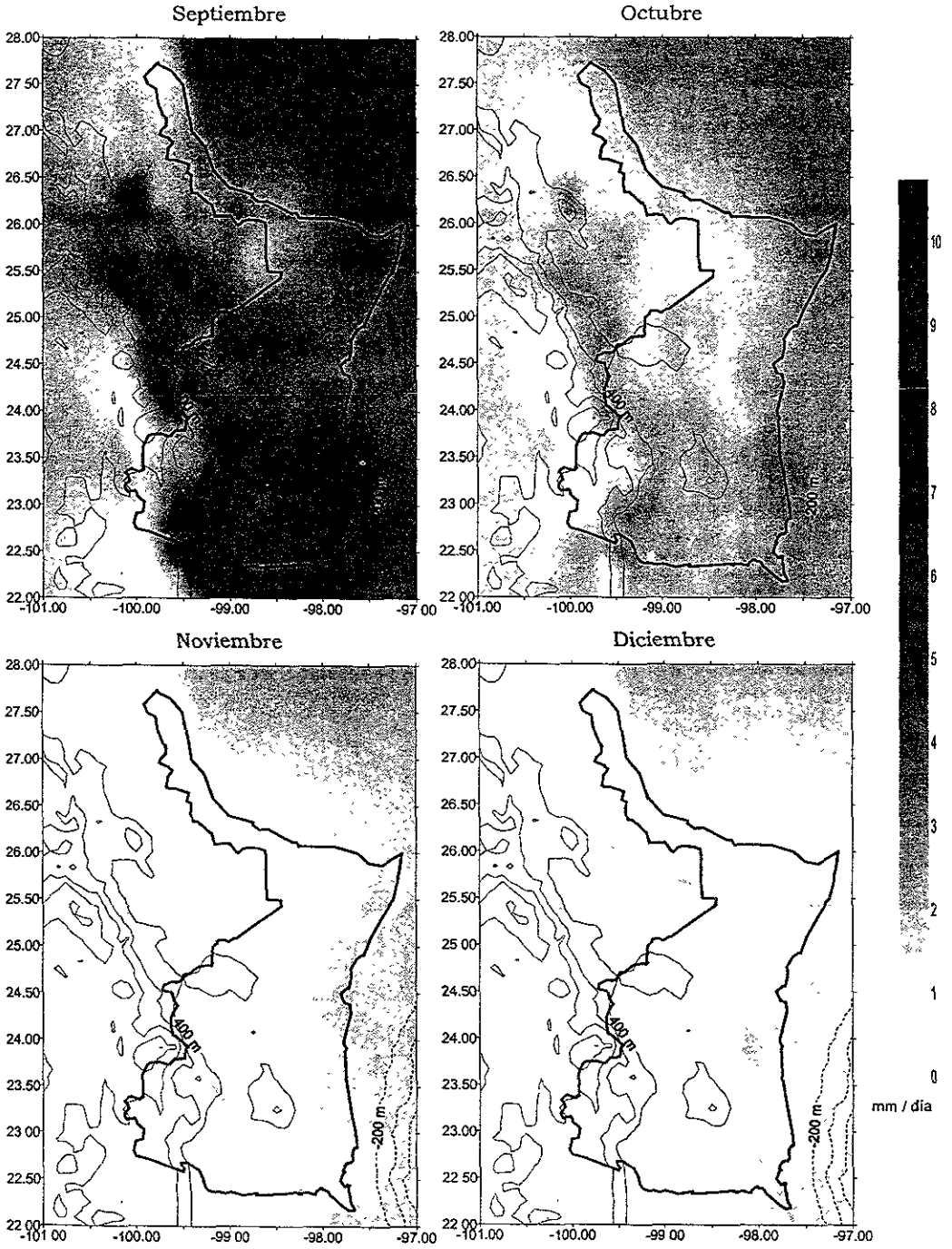


Fig. 5. Continuación.

### 3.2 CLASIFICACIÓN DE REGIONES POR SU RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN

Para definir regiones climáticas (lluvia), se aplicó el Análisis de Componentes Principales (Barry et al., 1973) a las series de tiempo de la precipitación mensual regional. La primera Componente (Fig. 6), explica el 89.21% de la varianza, y permite definir cinco regiones (Fig. 7) en términos de la variabilidad. Estas regiones se enumeraron de norte a sur como 1, 2, 3 y 4; la región 5 se ubica en la ladera Este de la Sierra Madre Oriental. En adelante, se hará referencia a ellas mediante estos números.

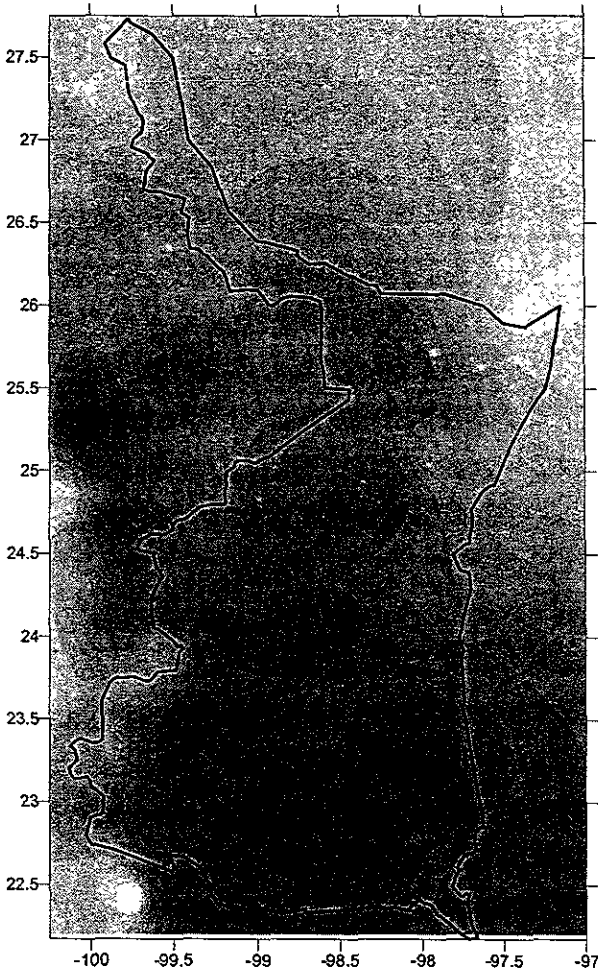
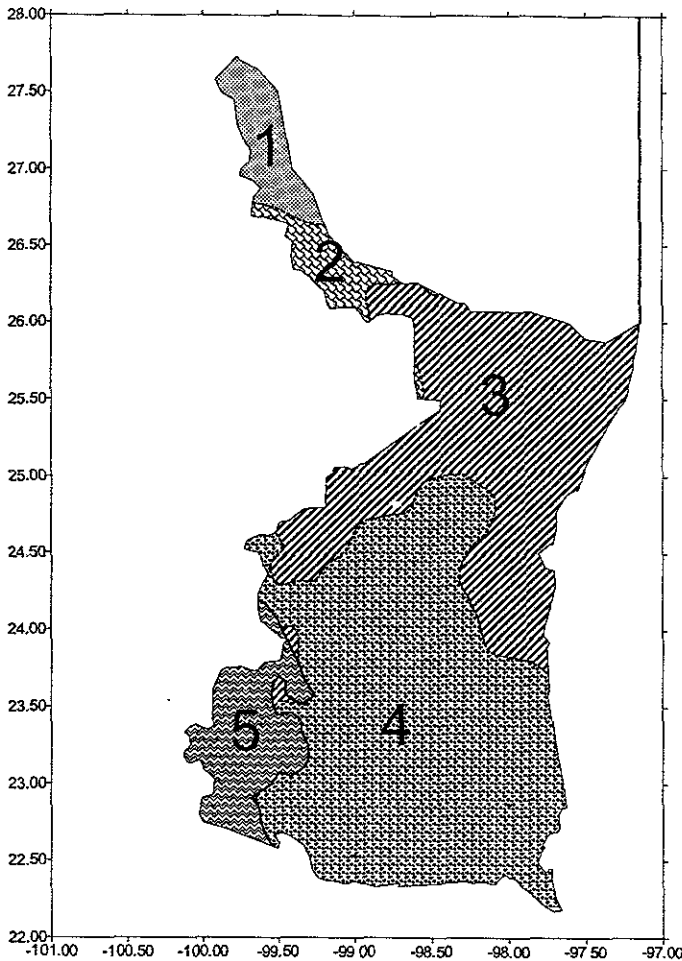


Fig. 6. Primera Componente Principal de los campos de correlación (varianza = 89.21%).





*Fig. 7. Regiones en Tamaulipas distinguidas entre sí por su régimen de precipitación.*

En cuanto a la relación entre las series de tiempo de precipitación mensual de cada región, la matriz de correlación (Tabla 1) muestra la coherencia en las fluctuaciones entre regiones. Sin embargo, los coeficientes de correlación no alcanzan valores tan altos como los de correlaciones entre estaciones (mayores o iguales a 0.8) en una región, razón por la cual se consideran regiones independientes.

*Tabla 1. Matriz de correlación entre las precipitaciones mensuales subdominios o regiones.*

Región	1	2	3	4	5
1	1.00				
2	0.59	1.00			
3	0.59	0.71	1.00		
4	0.44	0.57	0.65	1.00	
5	0.41	0.49	0.52	0.64	1.00

Se debe mencionar que no existe un método único para regionalizar la lluvia. Sin embargo, el Análisis de Componentes Principales ha dado resultados satisfactorios con anterioridad. Gower (1966), por ejemplo, hace uso de medidas de distancia en lugar de coeficientes de correlación o covarianzas. Este método ha sido aplicado por Rusell y Moore (1970) en la determinación de homoclimas en Brigalow, en la región este de Australia. Iakovleva y Gurleva (1969) usan eigenvectores como base para la regionalización climática de la URSS con base en los dos primeros eigenvectores que cuentan con más del 60% de la varianza de dieciocho parámetros climáticos.

### 3.3 CICLO ANUAL REGIONAL

El ciclo anual de las cinco regiones en las que se dividió el Estado de Tamaulipas (Fig.8) muestra que entre mayo y octubre llueve aproximadamente el 75% del total anual en todas las regiones. La región 4 presenta las lluvias más intensas durante esta temporada, duplicando en algunos casos el total mensual de las demás regiones. Sin embargo, durante invierno (principalmente en diciembre, enero y febrero) los montos son mucho menores y los máximos se presentan en el noreste del Estado (región 3), a causa de los Frentes (Cavazos, 1999). Con respecto a las regiones 1,2 y 5, cada una presenta durante todo el año las menores precipitaciones (Fig. 8).

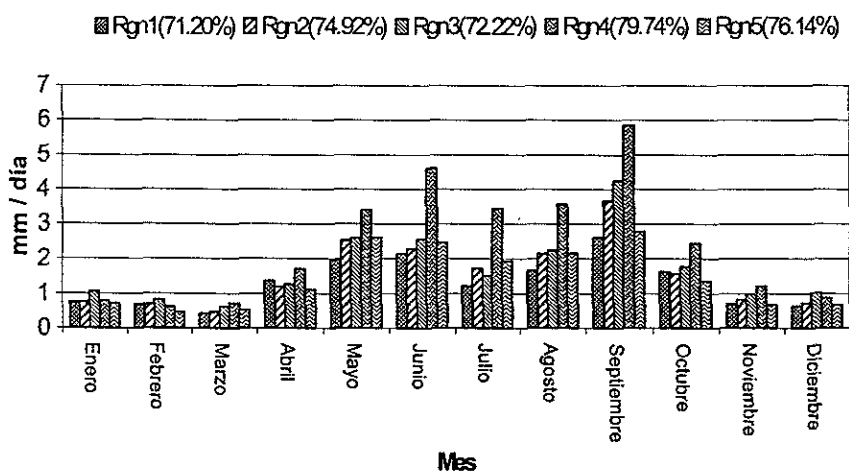


Fig.8. Ciclo anual regional de la precipitación (el porcentaje indicado en el encabezado se refiere al porcentaje de la lluvia total anual acumulada entre mayo y octubre).

Las precipitaciones entre julio y agosto muestran también una disminución relativa con respecto de junio y septiembre. Éste fenómeno se conoce como Sequía Intraestival o Canícula (Magaña et al., 1999a), y se extiende desde Centroamérica hasta Tamaulipas y al parecer, se debe a interacciones océano-atmósfera en el Pacífico Mexicano aunque en el caso de Tamaulipas podría estar relacionada con la intensidad de los alisios y la disponibilidad regional de vapor de agua.

## 4. Análisis de Variabilidad y Tendencia de la precipitación regional

### 4.1 VARIABILIDAD MENSUAL EN VERANO

El estudio de la precipitación y su variabilidad, se ha realizado tradicionalmente usando medias mensuales a partir de un periodo de 30 años o más. Tal aproximación sin embargo, limita nuestro entendimiento de la variabilidad interanual, las tendencias decadales del clima o del cambio climático mismo. Es por ello que un análisis mes a mes para varios años se desarrolla para así determinar la variabilidad interanual de la precipitación media mensual en el mes de setiembre, cuando afectan los huracanes, y de la variabilidad interanual de la precipitación durante todo el verano, pues es entre mayo y octubre cuando se presentan las mayores precipitaciones.

El análisis de las anomalías de la precipitación en setiembre (Fig. 9) permite observar la estrecha relación entre las anomalías positivas de precipitación en Tamaulipas y la ocurrencia de huracanes en el Golfo de México, cerca del noreste del país. Por esta razón, las lluvias en Tamaulipas y su variabilidad interanual están ligadas a eventos hidrometeorológicos extremos. La Tabla 2 muestra las características más importantes

■ Región 1   ■ Región 2   ■ Región 3   ■ Región 4   ■ Región 5

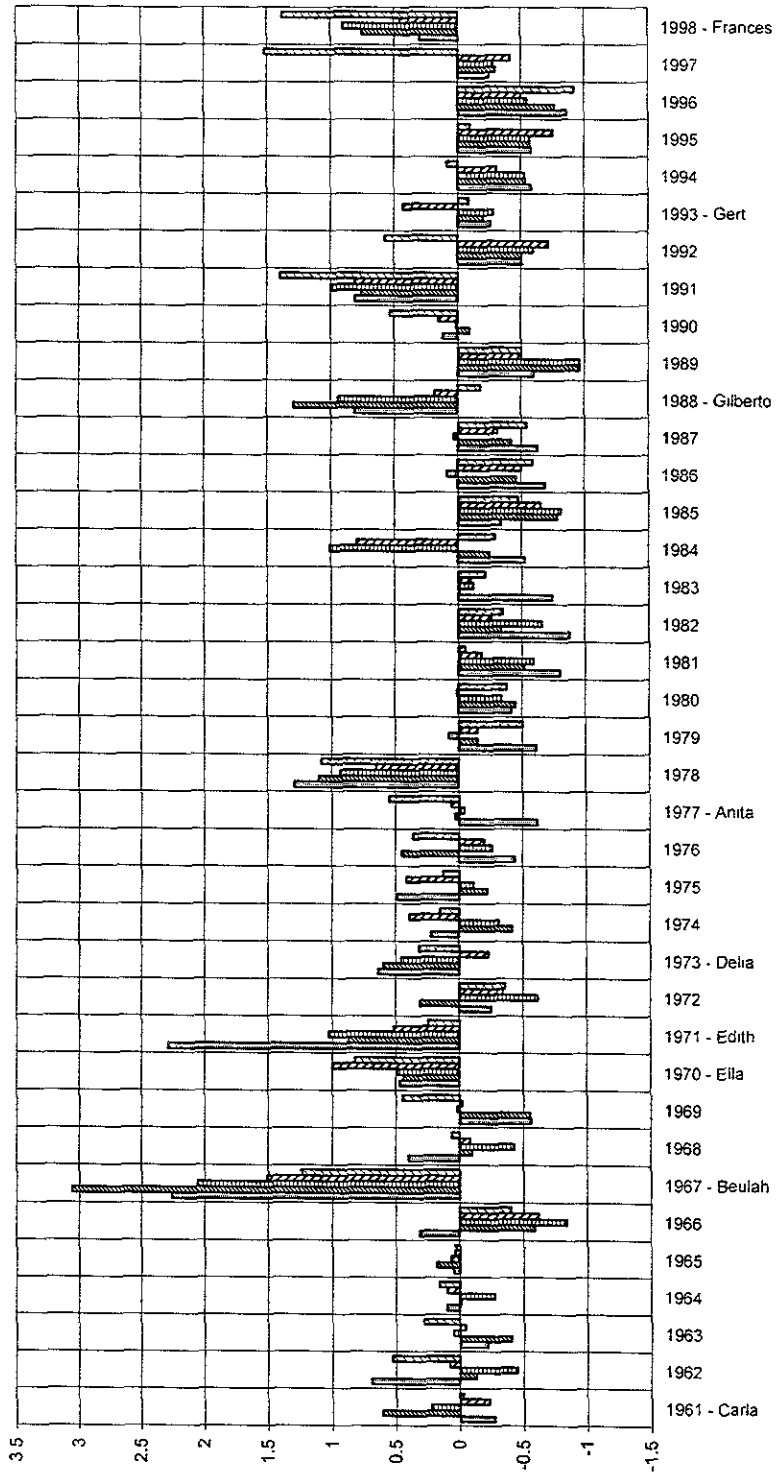


Fig. 9. Anomalías regionales de precipitación en septiembre y huracanes asociados.

de los huracanes que afectaron el Estado. En 1967, el huracán Beulah (categoría 5) determinó las mayores anomalías positivas entre 1961 y 1998. Durante septiembre de ese año, la lluvia acumulada en la región 2 fue de 445.5mm, cantidad equivalente al 79.63% de la lluvia acumulada normalmente en un año. Un sólo evento de este tipo puede hacer aparecer a la temporada como de grandes precipitaciones, aunque el número de días con lluvias sea reducido. Tal condición no beneficia a la agricultura de temporal, pero si a la disponibilidad de agua, ya que los niveles de agua de las presas en estos periodos se recuperan substancialmente.

En promedio, los huracanes pueden acumular en un mes, lluvias similares al 41.13% del promedio total anual. Resulta conveniente, analizar cuáles son las condiciones que favorecen la ocurrencia de estos eventos hidrometeorológicos extremos.

*Tabla 2. Características de los principales sistemas tropicales (huracanes y tormentas) que han afectado el Estado de Tamaulipas y que resultan en anomalías positivas en la precipitación mensual.*

Año	Días	Nombre	Categoría	Región más afectada	Lluvia mensual acumulada	Porcentaje del total anual promedio
1961	3-16	Carla	4	2	177.30	31.69
1967	5-22	Beulah	5	2	445.50	79.63
1970	8-13	Ella	3	4	352.20	41.18
1971	5-18	Edith	5	1	258.90	54.81
1973	1-7	Delia	TorTrpl	1	128.70	27.24
1977	1-3	Anita	5	5	129.30	24.17
1988	8-20	Gilberto	5	2	251.70	44.99
1993	14-21	Gert	2	4	250.80	29.32
1998	8-13	Frances	TorTrpl	5	198.60	37.12
					% promedio =	41.13

#### 4.2 VARIABILIDAD ESTACIONAL EN VERANO

Los huracanes en los Mares Intra Americanos guardan una relación con El Niño. En el Golfo de México y en el Mar Caribe, el número de huracanes disminuye durante los años en que El Niño aparece durante los meses de verano. Por el contrario, en años de llamados La Niña, es mayor la ocurrencia de huracanes en el Caribe y Golfo de México (Magaña et al., 1999b). De esta manera, se espera que en verano, El Niño se convierta en un factor modulador de las lluvias en Tamaulipas aunque no sea el único. La señal El Niño (Fig. 10) es más clara durante las últimas dos décadas. Los años 1982–83, 1986–87, 1992–93, 1995–96 y 1997–98 llamados de El Niño, coinciden con una importante disminución en la lluvia regional del Estado. Sólo en aquellos periodos en que El Niño se debilitó o desapareció, como en 1992, las lluvias se recuperaron en algunas regiones.

Por otro lado, la intensa subsidencia durante años El Niño inhibe el desarrollo de actividad convectiva, resultando en un factor adicional que produce una disminución de las lluvias. La ocurrencia de La Niña no necesariamente se traduce en grandes precipitaciones. Otros factores, tales como actividad de Ondas del Este, deberán ser tomadas en cuenta para poder explicar más de la variabilidad de la lluvia en el Estado. Es por ello que se considerarán más adelante, las condiciones en el Golfo de México. Algunos autores sugieren que incluso las condiciones en el suelo (humedad) pueden influir en la estación lluviosa.

ER1 ER2 ER3 ER4 ER5

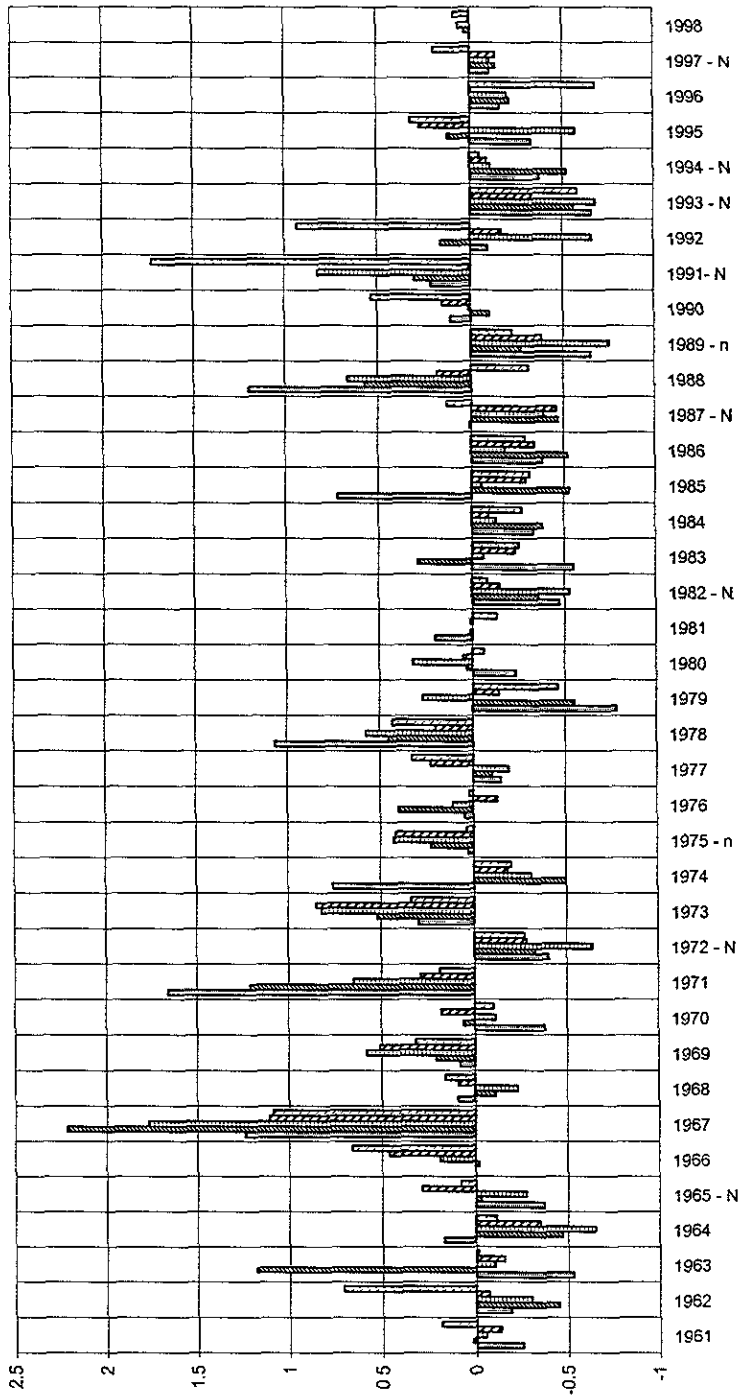


Fig. 10. Anomalías regionales de precipitación en verano (la letra "N" indica la presencia de un fenómeno El Niño, y la letra "n", la de un fenómeno La Niña).



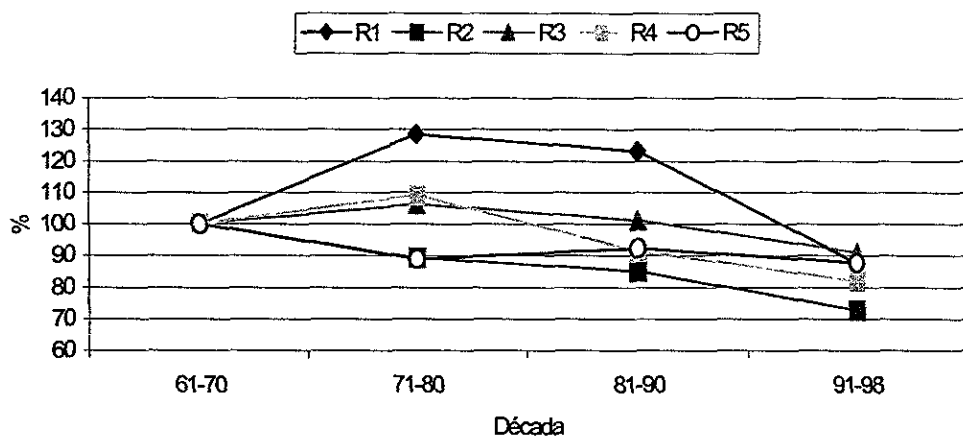
Hoy en día es común escuchar que la sequía ha durado ya casi diez años. Aún con fluctuaciones asociadas a El Niño, debe existir otro elemento que ha resultado en esta sequía. Las fluctuaciones interanuales de la lluvia están moduladas por variaciones de frecuencia más baja. Factores como las oscilaciones del Océano Atlántico o de las características del suelo pueden generar cambios en el clima con escalas decadales o incluso de siglos.

#### **4.3 VARIABILIDAD DECADAL**

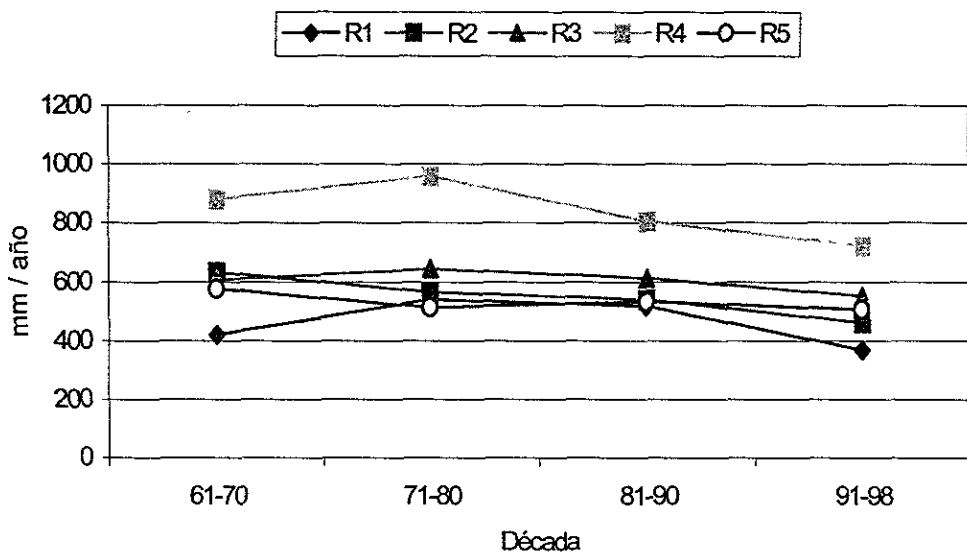
La figura 11a muestra que en Tamaulipas en la última década llovió sólo entre el 70 y el 90% del promedio de la década de los sesenta. En general, durante las dos últimas décadas existe una tendencia a la disminución de la lluvia. Tal condición implica que la disponibilidad de agua en la región es menor, al aumentar la demanda y disminuir la oferta. Los conflictos recientes por uso del agua podrían ser parte de esta tendencia decadal a menores precipitaciones. Las lluvias promedio de las cuatro últimas décadas a nivel regional muestran una tendencia negativa en la Figura 11b. Por ejemplo, en la región 4, durante las dos últimas décadas el monto anual promedio disminuyó aproximadamente 100mm, aunque en el resto de las regiones ésta disminución es menor. Tal condición, aunada a una mayor demanda de agua para la población, la agricultura y otras actividades económicas plantea grandes retos para la región.

Algunos estudios sugieren que fenómenos como los cambios en el uso de suelo han resultado en el gran déficit de lluvia de la última década (IPCC, 1997). La deforestación en la mayor parte del país, y el aumento de actividades como la ganadera y la agrícola producen alteraciones en el paisaje que con frecuencia resultan en climas más secos. Aumentos en evaporación, albedo y disminución de turbulencia que aumenta la estabilidad atmosférica en la región, son algunos de los elementos que pueden cambiar

el clima antropogénicamente. Sin embargo, el debate para distinguir entre variabilidad climática natural o antropogénica continúa.



a)



b)

Fig. 11. Variabilidad decadal de la precipitación regional, (a) expresada en porcentaje de la lluvia anual promedio de la década de los sesenta y (b) expresada en mm anuales.

## 5. Esquemas de pronóstico estacional de la precipitación regional

### 5.1 EL NIÑO Y SU IMPACTO EN LA PRECIPITACIÓN REGIONAL

La relación que guardan El Niño y las lluvias no es lineal. Un fuerte evento El Niño puede provocar intensas sequías en verano pero también un aumento de las lluvias en invierno (Magaña y Quintanar, 1997). La no linealidad del sistema se refleja en que la intensidad de la sequía, por ejemplo, no es directamente proporcional a la intensidad de El Niño. Sin embargo, en una primera aproximación al análisis de esta relación, se analiza a continuación el coeficiente de correlación entre las lluvias regionales y la TSM en el océano Pacífico Ecuatorial del este.

En Tamaulipas, la precipitación y la señal El Niño (Tabla 3) tienen una correlación negativa entre agosto y octubre. Sin embargo, la correlación se vuelve positiva entre los meses de noviembre y febrero. Lo anterior indica que durante verano las lluvias tienden a disminuir cuando hay un evento El Niño, y a aumentar en el Invierno. Es importante mencionar que el mes de julio no presenta el patrón de correlación característico del resto del verano, pues sus coeficientes de correlación indican que en las regiones 3 y 4 El Niño favorece las lluvias disminuyendo así los efectos de la Sequía Intraestival

(Canícula). Este resultado coincide con el de otros estudios (Magaña et al., 1999a). Al parecer sin embargo, no existe una relación directa entre El Niño y la Canícula (ver 4.2).

En invierno, también existe una relación positiva entre El Niño y las lluvias (Magaña y Quintanar, 1997). Lo anterior se debe a que durante años afectados por El Niño, se presenta una mayor incidencia de frentes fríos (Magaña et al., 1999b), los cuáles generan lluvias (Bluestein, 1985).

*Tabla 3. Coeficientes de correlación entre la precipitación regional y la TSM en la región Niño 3.*

Región	ene.	feb.	mar.	abril	mayo	jun.	jul.	agos.	sept.	oct.	nov.	dic.
1	-0.06	<b>0.61</b>	-0.24	-0.15	0.17	-0.06	-0.01	-0.26	<b>-0.51</b>	-0.13	0.29	<b>0.43</b>
2	0.10	<b>0.59</b>	-0.10	-0.23	-0.09	-0.02	0.01	<b>-0.38</b>	<b>-0.30</b>	0.09	0.14	<b>0.40</b>
3	0.14	<b>0.63</b>	-0.04	-0.12	0.23	-0.07	0.23	<b>-0.34</b>	<b>-0.37</b>	-0.05	0.17	0.27
4	0.08	<b>0.45</b>	-0.22	-0.21	0.25	-0.24	0.28	<b>-0.30</b>	<b>-0.30</b>	-0.07	-0.01	0.15
5	0.23	0.13	-0.19	<b>-0.35</b>	0.21	<b>-0.30</b>	-0.06	-0.07	<b>-0.30</b>	0.14	<b>0.36</b>	<b>0.33</b>

Con el objetivo de conocer la confiabilidad de asegurar a partir de los coeficientes de correlación (Tabla 3) que la precipitación regional y El Niño son dependientes, se realiza una prueba estadística (Mendenhall et al., 1986). Se trata de probar que ambas variables son dependientes entre sí, lo que implica que la correlación verdadera es diferente a cero. La hipótesis (HH) correspondiente es:

$$H_0: \rho \neq 0.$$

Suponiendo que el coeficiente de correlación tiene una distribución normal, es posible realizar la prueba estadística mediante una transformación Z, tal que:

$$Z = \frac{\frac{1}{2} \left[ \ln \left( \frac{1+r}{1-r} \right) - \ln \left( \frac{1+\rho}{1-\rho} \right) \right]}{\frac{1}{\sqrt{N-3}}} \quad (2).$$

Entonces, si  $(1 - \alpha)$  es la probabilidad deseada para que la hipótesis sea verdadera, la región en que debe encontrarse el valor de  $Z$  para que esto se cumpla es:

$$RR : |z| > Z_{\alpha/2} \quad (3).$$

Los valores de  $N$ ,  $\rho_0$  son:

$$N = (1996 - 1961) + 1 = 36, \quad \rho_0 = 0$$

y el valor de  $\alpha$  que permite un 95% de confiabilidad es:  $\alpha = (1 - 0.95) = 0.05 = 5\%$ .

De la ecuación 2 y la desigualdad 3, la hipótesis será verdadera si se cumple que

$$Z_{\alpha/2} < |Z| = \left| \frac{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+r}{1-r} \right)}{\frac{1}{\sqrt{N-3}}} \right| \quad (4)$$

El valor de  $Z_{\alpha/2}$  se obtiene de tablas estadísticas:  $Z_{\alpha/2} = Z_{0.025} = 1.96$ .

Resolviendo la ecuación 4 para  $r$ , se puede asegurar con un 95% de confiabilidad que la lluvia regional depende de El Niño si se cumple que:

$$|r| > \frac{e^c - 1}{e^c + 1} \cong 0.39 \quad (5)$$

donde 
$$C = \frac{Z_{\alpha/2}}{\sqrt{N-3}} \quad (6).$$

De manera similar, si  $|r| > 0.3$ , se tiene un 86.16% de confiabilidad en que las variables sean dependientes.

En la Tabla 3 se han señalado en letra más gruesa aquellos coeficientes de correlación que cumplen con el criterio establecido ( $|r| > 0.39$ ) y se han subrayado también los coeficientes con valor absoluto mayor a 0.3. Por lo que podemos asegurar confiablemente que El Niño favorece la lluvia regional en invierno pero la disminuirá en verano, especialmente en diciembre y febrero para el primer caso; y en septiembre, para el segundo.

Los coeficientes de correlación iguales en valor absoluto a 0.39, explican el  $|r|^2 = 0.39^2 = 15.21\%$  de la varianza. Y entonces la variabilidad de la lluvia está determinada por El Niño en aproximadamente sólo 15 de cada 100 casos. De manera similar, si el coeficiente de correlación es igual a 0.3 la variabilidad explicada es de sólo el 9%.

## 5.2 PRONÓSTICOS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN

Es importante considerar que sólo una parte de la variabilidad de la lluvia en Tamaulipas se explica considerando El Niño. En otras regiones del Océano Pacífico y Atlántico, la TSM es un factor importante para explicar variabilidad de las lluvias, como lo muestran los mapas de correlación de la Figura 12.

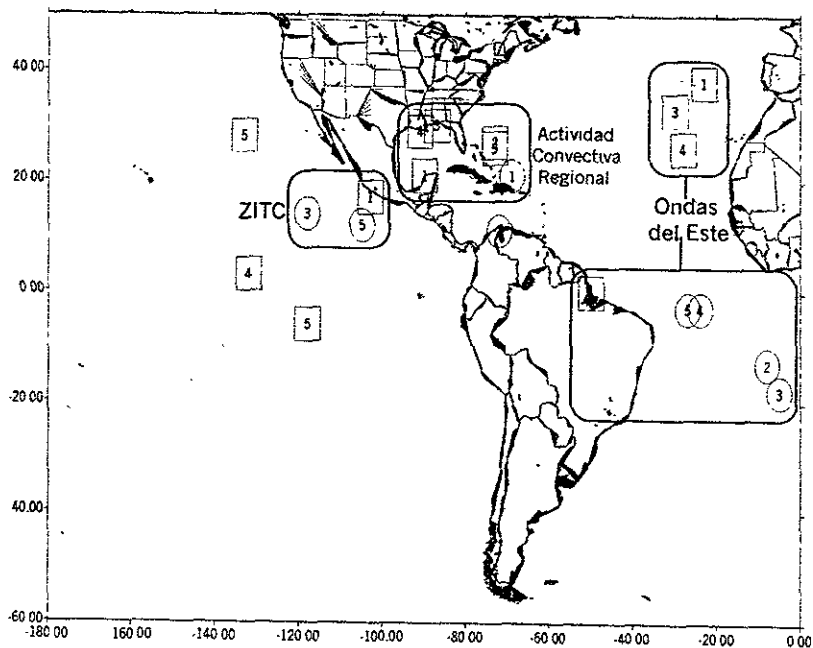
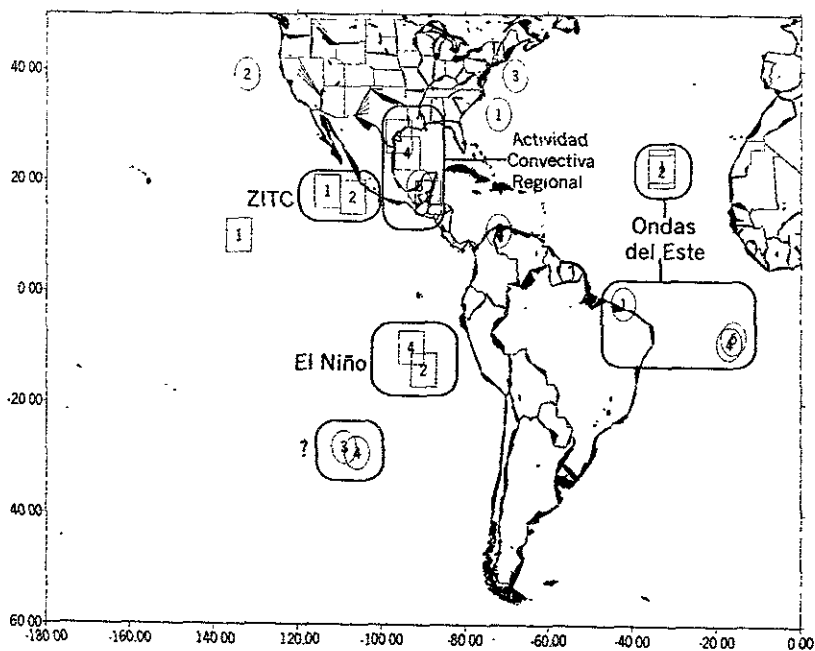


Fig. 11(a). Puntos donde el  $r$  entre la TSM y la precipitación regional tiene un valor absoluto mayor a 0.3. El círculo indica  $r > 0$ ; el cuadro,  $r < 0$ . El número corresponde a la región. A) Correlación mes a mes y B) con un mes de retraso en la TSM. Mes de junio.

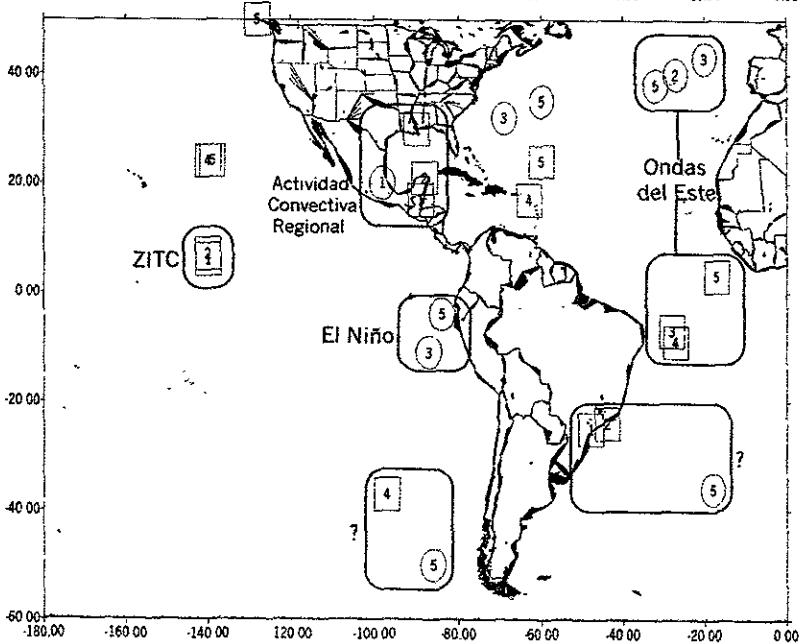
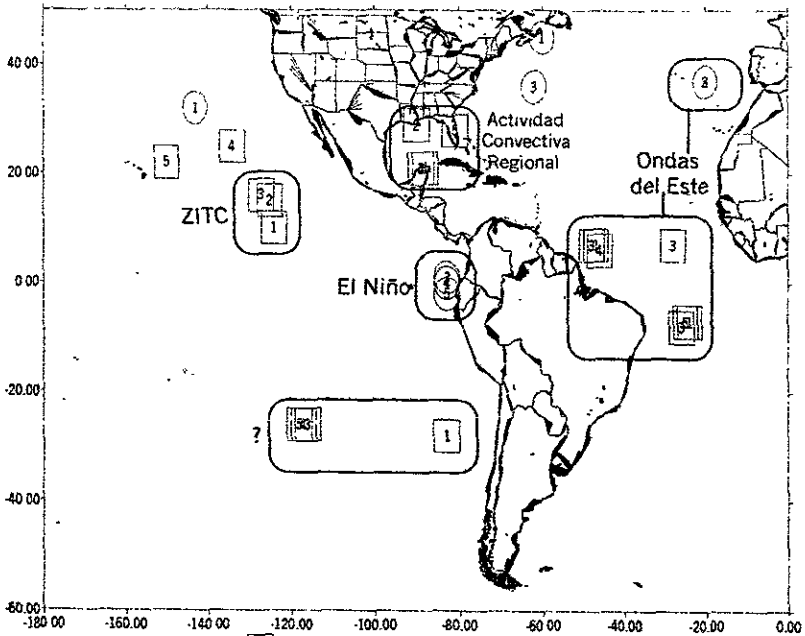


Fig. 11(b). Puntos donde el  $r$  entre la TSM y la precipitación regional tiene un valor absoluto mayor a 0.3. El círculo indica  $r > 0$ ; el cuadro,  $r < 0$ . El número corresponde a la región.

A) Correlación mes a mes y B) con un mes de retraso en la TSM. Mes de julio.



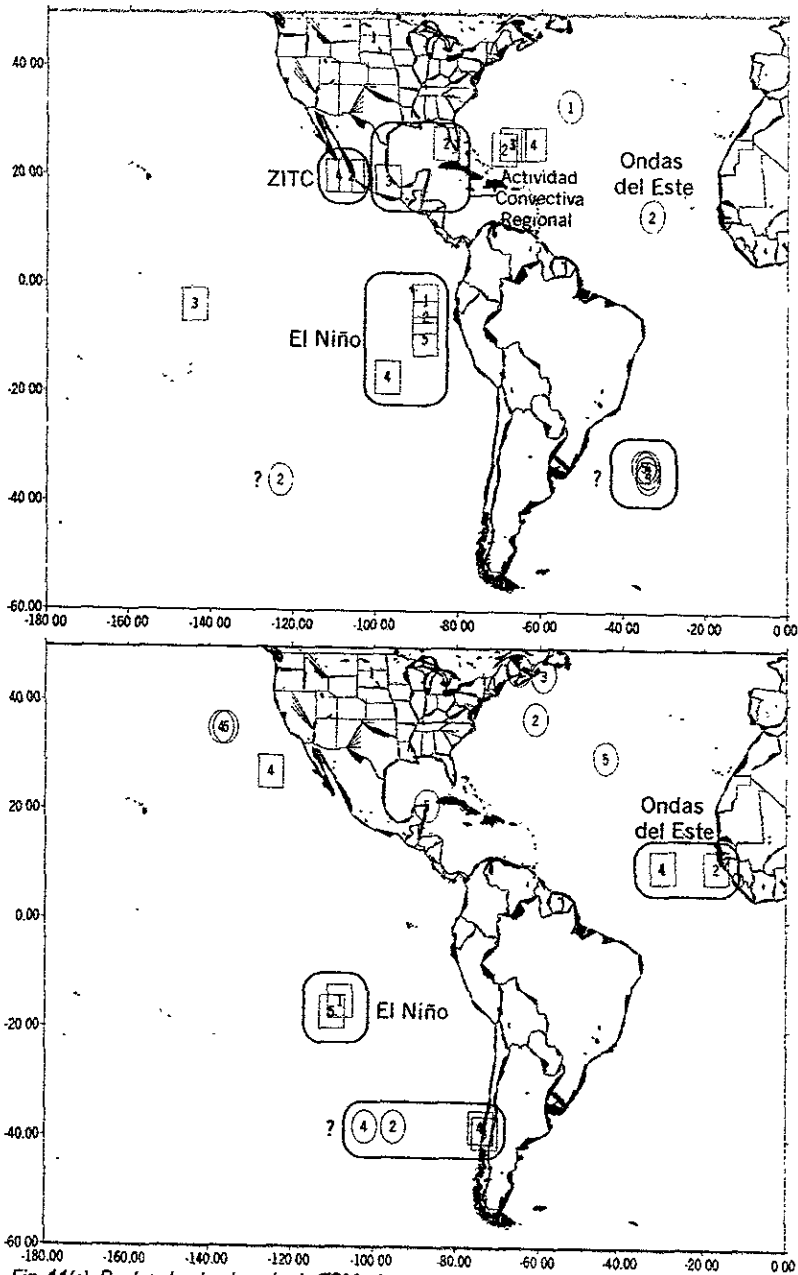


Fig. 11(c). Puntos donde el  $r$  entre la TSM y la precipitación regional tiene un valor absoluto mayor a 0.3. El círculo indica  $r > 0$ ; el cuadro,  $r < 0$ . El número corresponde a la región.  
 A) Correlación mes a mes y B) con un mes de retraso en la TSM. Mes de agosto.

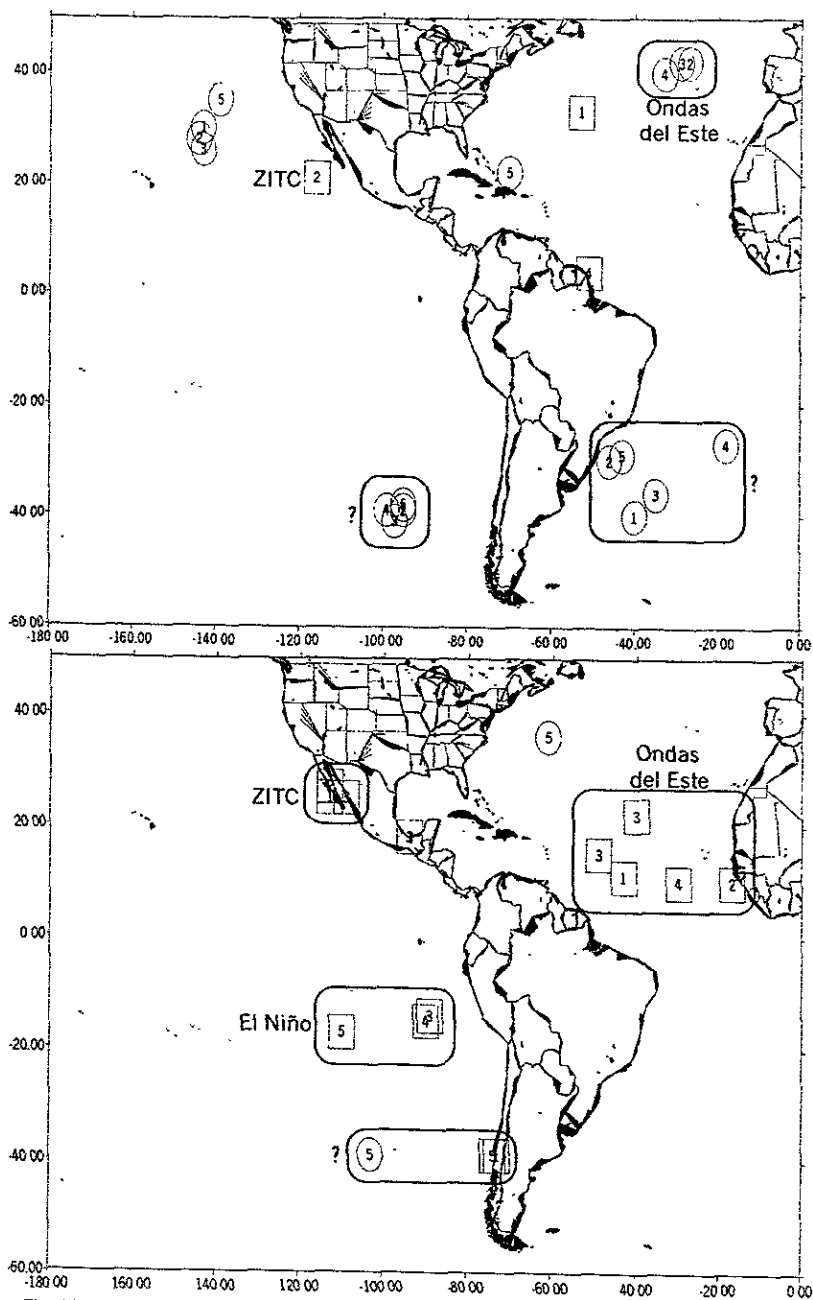


Fig. 11(d). Puntos donde el  $r$  entre la TSM y la precipitación regional tiene un valor absoluto mayor a 0.3. El círculo indica  $r > 0$ ; el cuadro,  $r < 0$ . El número corresponde a la región.  
 A) Correlación mes a mes y B) con un mes de retraso en la TSM. Mes de septiembre.

Se observa que en el Océano Atlántico, varias regiones están correlacionadas. Las correlaciones en el Atlántico ecuatorial tienen un signo opuesto a las del Atlántico norte. Tal contraste significa que las anomalías de TSM generan una intensificación o debilitamiento del flujo medio zonal. Mediante la relación de viento térmico, el contraste meridional en estas dos regiones podría mantener un flujo intenso de bajos niveles que diera más energía a las ondas del este provenientes de África. Estas ondas son parte importante en la temporada de lluvias en Tamaulipas. Con frecuencia estas ondas dan origen a huracanes en el Golfo de México y Mar Caribe (Enfield y Alfaro, 1999).

En el Pacífico Mexicano, las correlaciones están ubicadas en la llamada alberca de agua caliente donde se forma la Zona Inter-Tropical de Convergencia (ZITC), Magaña et al. (1999b) han propuesto que la actividad convectiva en esta región es crucial para el clima mexicano. Por ejemplo, las interacciones Océano-Atmósfera que generan la canícula (Magaña et al., 1999a).

En el Golfo de México, las anomalías de TSM pueden afectar la actividad convectiva regional. Las lluvias en Tamaulipas son afectadas por cambios en el Golfo de México debido a la cercanía del Estado y a que la mayor cantidad de la humedad que llega al noreste del país proviene de esta región.

Al sur de los océanos Pacífico y Atlántico hay otras regiones con correlaciones importantes. Esto se manifiesta principalmente en el mes de julio (correlación con un mes de retraso en TSM). El papel que pueden desempeñar estas regiones en la regulación de las lluvias aún no es claro, aunque podría estar relacionado con El Niño.

Con base en las series de tiempo de los puntos determinados anteriormente, se obtuvieron ecuaciones de regresión para pronosticar la lluvia entre junio y septiembre a partir de los datos de 1961–1996. Estas ecuaciones se probaron realizando diagnósticos para los años de 1997 y 1998 (Fig. 13). De un pronóstico de este tipo no se espera determinar el monto exacto de la precipitación, sino conocer cómo será la lluvia con respecto a la normal es decir, el tipo de anomalía de la precipitación. Por ejemplo, el pronóstico de la región 4 en los meses de junio de 1997 y 1998, muestra que el signo de la anomalía pronosticada coincide con el de la precipitación observada. Un ejemplo de un pronóstico en el que no coinciden las anomalías pronosticada y observada es el de la región 5 para el mes de junio. De esta manera, aproximadamente un 65% de los pronósticos realizados mediante correlaciones con un mes de retraso en la TSM se consideran acertados. Mientras que los pronósticos con correlaciones mes a mes, son acertados en aproximadamente un 70%.

En el mes de septiembre de 1998, las precipitaciones fueron muy superiores al pronóstico. Esto se debió al paso de la Tormenta Tropical Frances (Tabla 2), lo que significa que los pronósticos pueden fallar en caso de presentarse un evento extremo como un huracán. Aún bajo tal situación, es posible pronosticar probabilidad de ocurrencia de huracanes.

Por otra parte, es importante notar la intensificación de la Sequía Intraestival en Tamaulipas en 1997 y 1998, años afectados por El Niño. Los análisis obtenidos

1997

1998

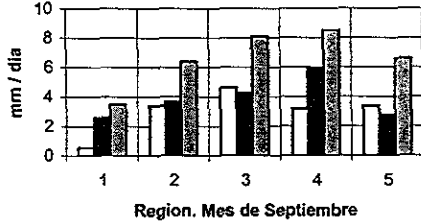
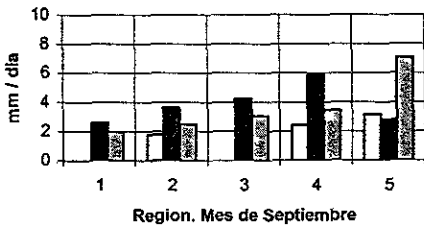
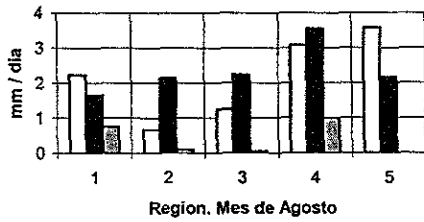
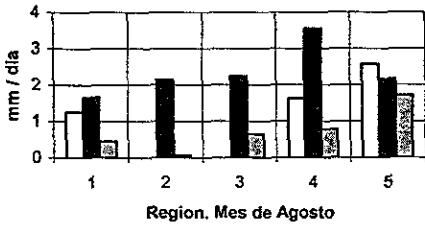
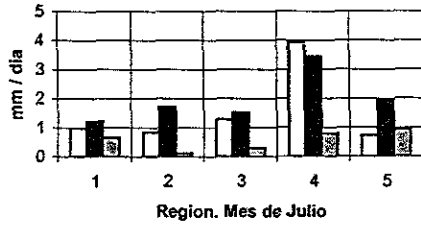
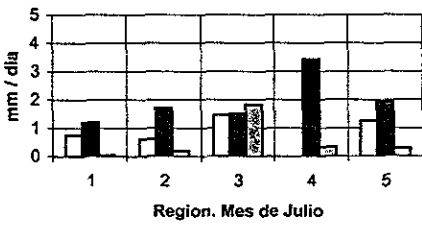
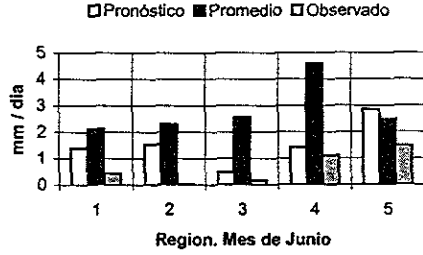
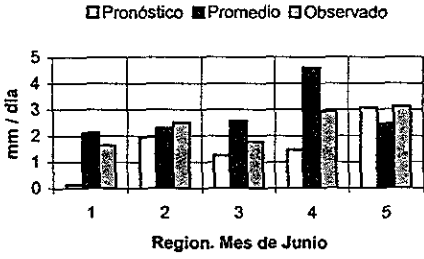


Fig. 12(a). Pronóstico de lluvia (correlaciones con un mes de retraso en las series de TSM) y su comparación con el valor climático y el observado.

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

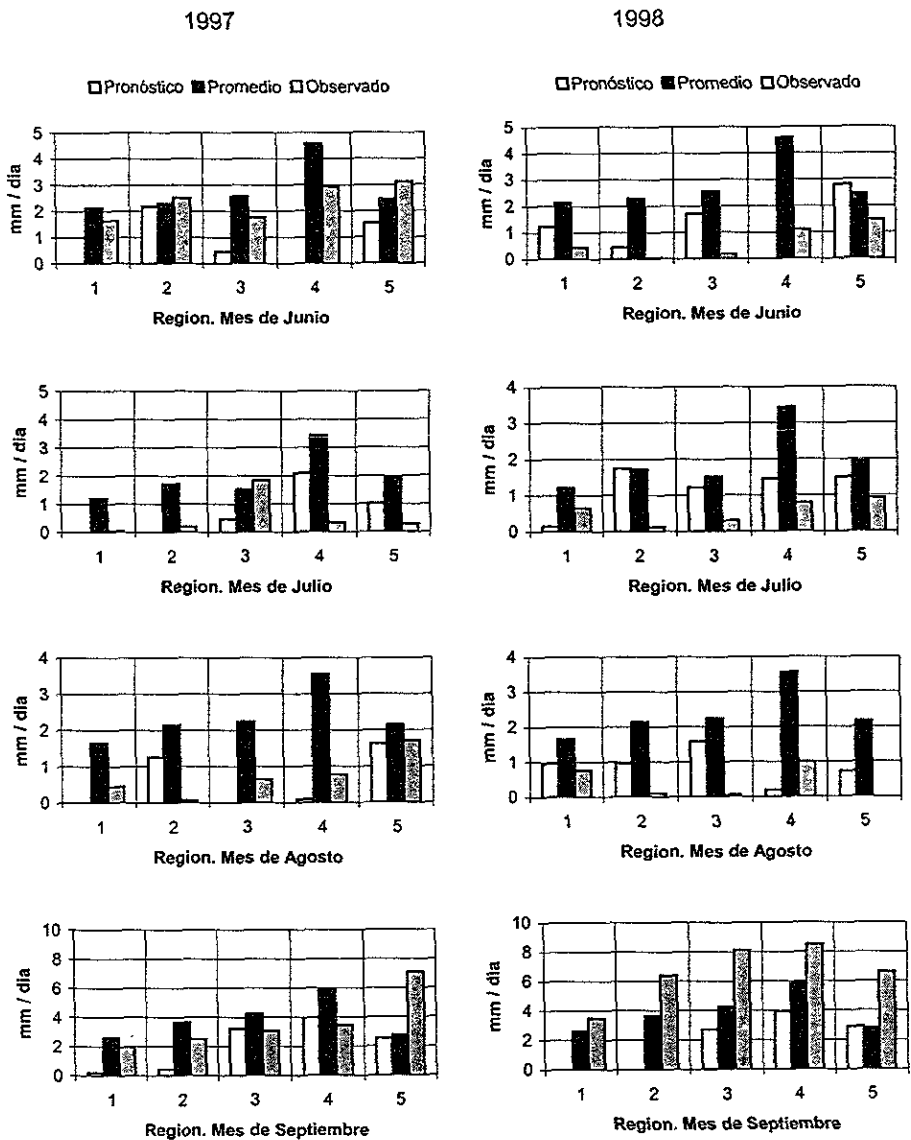


Fig. 12(b). Pronóstico de lluvia (correlaciones mes a mes) y su comparación con el valor climático y el observado.

## 6. Conclusiones

La presente investigación muestra que las regiones climáticas en Tamaulipas deben sus características a la presencia de la Sierra Madre Oriental, el Golfo de México y la extensión meridional del Estado. Esto es evidente en verano, cuando las mayores precipitaciones se presentan al sur del Estado y sobre la ladera oriente de la sierra. En invierno, las lluvias más significativas se concentran en el Norte debido a la incidencia de Frentes Fríos en latitudes medias ( $\sim 40^{\circ}\text{N}$ ) que alcanzan esta parte del Estado.

Es importante destacar la concentración de aproximadamente el 75% de la precipitación anual entre mayo y octubre, a pesar de una disminución relativa de las lluvias entre julio y agosto, correspondiente a la Sequía Intraestival. Tal relación indica que el Estado vive en un clima monzónico con lluvias en verano. Por lo tanto, un modelo de pronóstico debe considerar fenómenos tropicales, que con frecuencia son el resultado de interacciones océano-atmósfera.

Con respecto a estas interacciones, se determinó una importante relación entre las mayores anomalías positivas de precipitación y la incidencia de huracanes. Además, se

encontraron posibles indicios de Cambio Climático Global al presentarse una disminución en las lluvias anuales de las dos últimas décadas.

El análisis de la relación entre la lluvia regional y El Niño, mostró que éste disminuye las lluvias en verano, pero las favorece en invierno. Sin embargo, el mes de julio no presenta el patrón característico del verano, pues en este mes El Niño favorece las lluvias disminuyendo así la Sequía Intraestival.

Las correlaciones realizadas entre las series de precipitación regional y las TSM de los océanos Pacífico y Atlántico indican una modulación de las lluvias por El Niño y la actividad de las Ondas del Este en el Océano Atlántico del Norte. También parece existir una modulación de este tipo en la alberca de agua caliente del Pacífico Mexicano, la cual probablemente está asociada a la Sequía Intraestival. Tomando en cuenta lo anterior, se construyeron modelos de pronóstico basados en regresiones lineales de TSM y anomalías de lluvia. En general, los modelos pronostican el signo de las anomalías adecuadamente, pero el esquema de regresiones con un mes de retraso en la TSM se mostró más deficiente que el esquema mes a mes.

En algunos casos, como en septiembre de 1998 los pronósticos de la precipitación son mucho menores a los montos de lluvia observados. Esto se debió a la incidencia de eventos hidrometeorológicos extremos, como la Tormenta Tropical Frances, por lo cual es recomendable considerar otros parámetros físicos que permitan estimar las condiciones propicias a estos eventos extremos. Así se podrán generar modelos de regresión en conjunto con las TSM que permitan alcanzar mejores resultados.



## 7. Bibliografía

- Arntz, W.E., Fahrbach, Eberhard, 1996: *El Niño: Experimento Climático de la Naturaleza*. Fondo de Cultura Económica, 312pp.
- Barry R.G., A.H. Perry, 1973: *Synoptic Climatology. Methods and applications*. Methuen & Co. Ltd. United Kingdom, 555 pp.
- Bluestein, H.B., 1992: *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes, V. I, Principles of Kinematics and Dynamics*. Oxford University Press, 431 pp.
- Cavazos, T., 1999: Large-scale circulation anomalies conducive to extreme precipitation events and derivation of daily rainfall in northeastern Mexico and southeastern Texas. *J.Climate*, 12, 1506–1523.
- Conde, C., V. Magaña R., M. Ferrer, 1999: On the Use of a Climate Forecast in the Planning of Agricultural Activities in the State of Tlaxcala, México. *Preprints 11th Conference on Applied Climatology*. 10–15 January, 1999, Dallas, Texas. American Meteorological Society, 101–102.
- Douglas, A.V., 1994: Base de datos climatológicos para la República Mexicana (disponible en internet).
- Enfield, D.B., E.J. Alfaro, 1999: The dependence of Caribbean Rainfall on the Interaction of the Tropical Atlantic and Pacific Oceans. *American Meteorological Society*, 12, 2093–2104.
- Gay, G.C., 1994: México ante el cambio climático. Propuesta de programa nacional sobre cambio climático global. *Memorias sobre el Primer Taller de Estudio de País: México*. 18–22 Abril, 1994, Cuernavaca, Mor., 5–12.
- Glantz, M.H., 1996: *Currents of Change: El Niño's impact on climate and society*. Cambridge University Press, 194pp.
- Gower, J.C., 1966: Some distance properties of latent root and vector methods used in multivariate analysis. *Biometrika*, 53, 254–269.
- Griffiths, J.F., 1994: *Handbook of agricultural meteorology*. Oxford University Press Inc., 320pp.
- INEGI, 1995. *Atlas Agropecuario del Estado de Tamaulipas. VII Censo Agropecuario 1991*. México, 105pp.

- IPCC, 1996: *Climate Change 1995, the Science of Climate Change*. (Ed. by J.T. Houghton et al.) IPCC, Cambridge University Press. Cambridge, UK. 572 pp.
- Kalnay et al., 1996: The NCEP/NCAR 40 Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 437–471.
- Magaña V., A. Quintanar, 1997: On the use of a general circulation model to study regional climate. *2nd. UNAM–CRAY Supercomputing Conference on Earth Sciences*. México City. June 1997. Ed. Cambridge University Press. 39–48.
- Magaña, V., J.A. Amador, S. Medina, 1999a: The mid–summer drought over México and Central América. *J.Climate*, **12**, 1577–1588.
- Magaña, R.V., T. Morales Acoltzi, J.L. Pérez, C. Conde, S.F. Orozco, G.J. Lezama, J.Vázquez, V. Hernández, 1999c: *Experiencia para el pronóstico climatológico para actividades agrícolas en el Estado de Tlaxcala*. Notas, INEGI, **7**, 30–38.
- Magaña, R., 1999b: *Los impactos de El Niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Con apoyo de la Secretaría de Gobernación, México, D.F. 229pp.
- Mendenhall, W., R.L. Scheaffer, D.D. Wackerly, 1986: *Mathematical Statistics with Applications*, Duxbury Press, Boston, 750 pp.
- Orozco, S.F., 2000: *Cambio climático regional en Tlaxcala*, Tesis de Maestría en Geografía, UNAM, 113 pp.
- Parry, M.L., T.R. Carter, N.T. Konijn, 1988: *The impact of climatic variations on agriculture, Vol. 2: Assesments in semi–arid regions*. Kluwer Academic Publisher, 764pp.
- Philander, S.G., 1990: *El Niño, La Niña and the Southern Oscillation*. Academic Press Inc., 320pp.
- Rusell, J.S., A.W. Moore, 1970: Detection of homoclimate by numerical analysis with reference to the Brigalow region (eastern Australia). *Agri. Met.*, **7**, 455–479.