

# Efectos de El Niño Southern Oscillation (ENSO) en Precipitación Pluvial (PP) en México Central

Ana Rosa Peralta Hernández \*

## INTRODUCCIÓN

Uno de los más dramáticos, más energéticos y mejor definido patrón de comportamiento interanual es el grupo global de anomalías anuales climáticas conocidas como El Niño Oscilación del Sur, o El Niño Southern Oscillation (ENSO). ENSO es categorizado como El Niño (EN), Cálida Temperatura Superficial del océano (TSO) esto es, agua anormalmente cálida en el Pacífico; La Niña (LN), fría (TSO); agua anormalmente fría en el Pacífico, o Neutro (N) basado en el índice de la temperatura superficial del agua derivado por la Agencia Meteorológica Japonesa (AMJ). Los eventos de EL EN y LN ocurren con alguna regularidad (con un período de retorno de dos a nueve años) y generalmente duran uno o dos años (Rosenberg, *et al*, 1997).

El clima de México está influenciado por la posición y fuerza de los sistemas de alta presión subtropicales de los océanos del Atlántico Norte y Pacífico Norte (cerca de la latitud 30°), así como de la posición de la zona intertropical de convergencia hacia el sur del país (Jáuregui, 1995). Durante el verano boreal (Mayo-Octubre) que representa la estación lluviosa, la precipitación (PP) es más abundante durante los años de LN cuando existe una retracción hacia el norte de la Alta del Atlántico Norte, vientos alisios débiles, y una mínima casi-equatorial desplazada hacia el norte conducen a una aumentada convección sobre el área. Los eventos de EN por la misma razón, traen menos PP debido a un aumento anómalo en los vientos del oeste en la alta tropósfera sobre el Caribe y el Atlántico Equatorial, inhibiendo la actividad ciclónica. Tales variaciones interanuales son reflejadas en cambios en el balance de agua de la superficie terrestre.

Debido a los fuertes efectos de ENSO en la agricultura en la planicie mexicana central, es crítico entender el clima derivado de ENSO y su efecto en regiones cultivadas; esto puede ser logrado estudiando los cambios en PP y Evapotranspiración potencial (ETp). La diferencia entre PP y ETp puede, en gran parte, indicar el exceso o la deficiencia de agua en el contenido del agua del suelo. Sin embargo, debido a lo extenso del área de estudio es importante identificar una aproximación, la cual nos evalúe la variabilidad espacial y temporal de la PP y ETp.

Los datos diarios de PP y temperatura (T) cubriendo el período de 1970 a 1990 de veinte estaciones climatológicas en tres estados de la República Mexicana: Zacatecas, Aguascalientes y Guanajuato, fueron analizados para conocer si los parámetros de PP y T están relacionados con el fenómeno de ENSO en la región central de México. La variación en PP fue calculada como una desviación de la estación lluviosa (Nicholson, 1979), en la cual se obtuvieron valores normalizados de la lluvia estacional. También se compararon los coeficientes de correlación entre diferentes regiones para determinar si había, y en qué grado, algunas relaciones entre ellas.

Los datos diarios de PP y T para 1996, 1997 y 1998, se utilizaron para calcular ETp cuando los datos climáticos son limitados usando la ecuación modificada de FAO Penman-Monteith (Allen, *et al*. 1998). La metodología climática de Thornthwaite (Thornthwaite, 1957; Sellers, 1965) se aplicó para obtener el balance de agua en la magin de estudio para el mismo período de tiempo.

Junto con la ecuación de FAO Penman-Monteith, la Diferencia Normalizada del Índice de Vegetación (NDVI en Inglés) se ha usado muy ampliamente como un indicador del estrés en las plantas (Tucker and Choudhury,

\* Estudiante de Doctorado en la Universidad de Arizona. Profesor-Investigador del Centro de Ciencias Agropecuarias. [aperalta@ag.arizona.edu](mailto:aperalta@ag.arizona.edu)

1987; Moran *et al.* 1994; Roderich *et al.*, 1996; Carlso, 1997; Huete *et al.*, 1997). El NDVI es variable en espacio y tiempo, y se usa comúnmente como un parámetro que indica el grado de 'verdor', ya que está directamente relacionado con la actividad fotosintética de la vegetación sobre la superficie del suelo (Wittich, 1995).

Debido a los cambios que provoca el fenómeno de ENSO en PP y ETp, es esperado que los cambios en verdor en la vegetación representen un indicador del cambio de ETp en grandes áreas. Yang *et al.* (1998), encontró que ETp acumulada estaba negativamente correlacionada con NDVI, mientras que la PP estaba positivamente correlacionada. Esta propuesta de investigación presenta una metodología para entender los efectos climáticos de ENSO en las regiones agrícolas de la región central de México, mediante la estimación de la variación en la PP durante los años de EN y LN y después correlacionando la PP y la ETo contra los valores de NDVI.

Los objetivos de este estudio son a) Hacer una evaluación de los patrones de PP y T para los años de ENSO empleando una serie climática de 21 años; b) Identificación a nivel de escala regional, de las anomalías de ETo y evaluación de los cambios en humedad disponible durante un año N 1996, un año en 1997, y un año LN 1998; c) Detección del cambio temporal en la vegetación del suelo mediante el análisis de los valores de NDVI junto con los datos de PP y ETo, para un año seco y un año húmedo, 1997 y 1998, respectivamente.

gión están representados principalmente por Xerosoles, Regosols and Planosols (Siges, 1981). Los suelos de Zacatecas y Aguascalientes están cubiertos principalmente con pastos, arbustos y plantas xerófitas, disminuyendo en densidad del noroeste al sureste siguiendo el gradiente de lluvia. Los suelos de Guanajuato están cubiertos principalmente por pastos, arbustos, pero tienen menos plantas xerófitas.

La temperatura media anual varía dentro del área de estudio. Zacatecas tiene una temperatura media anual de 13.5°C; Aguascalientes tiene una temperatura media anual de 18.3°C, y la temperatura media anual de Guanajuato es 17.9°C. El mes más cálido es Junio para los tres estados en estudio.

La PP está fuertemente influenciada por el ciclo estacional en esta área, ocurriendo principalmente de fines de Mayo a fines de Septiembre y coincidiendo con el período de más alta ETp. Los promedios de PP también varían para esta área: La PP media anual en Aguascalientes es de 456.1 mm, Guanajuato tiene una PP media anual de 597.4 mm y Zacatecas presenta una PP media anual de 520.0 mm, respectivamente (Servicio Meteorológico Nacional SMN), sobre medias anuales de T y PP para el período de 1941-1966). En general, la estación de lluvias en esta región ocurre durante el monzón de verano (80% de la lluvia total) y la estación seca ocurre durante el invierno y primavera (20% del total de lluvia anual). Sin embargo, durante una Niña, la PP está por arriba de la normal debido a la retracción

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de Estudio

El área de estudio está localizada en la altiplanicie Mexicana (Fig. 1) y comprende los estados de Guanajuato (30,589 km<sup>2</sup>), Aguascalientes (5,589 km<sup>2</sup>), y Zacatecas (75,040 km<sup>2</sup>). Las coordenadas geográficas que delimitan la región de estudio son 19-26° latitud Norte y 99-106° Longitud Oeste. El área descansa sobre una planicie de 2000 m de elevación y está rodeada por áreas de más alto relieve. Esta región es notable por la falta permanente de agua e inclusive, cursos de agua estacionales. Los suelos de esta re-

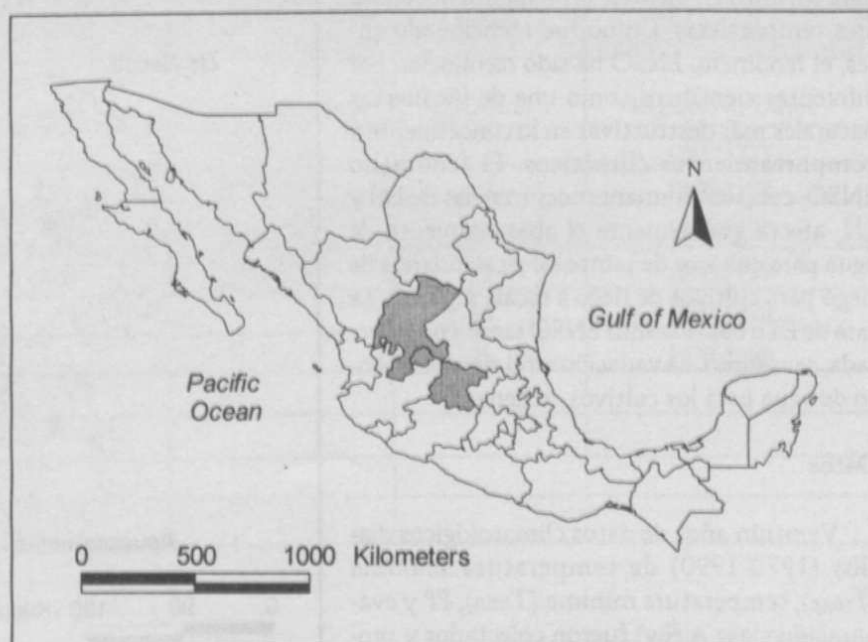


FIGURA 1. Mapa de México y los estados en estudio.

hacia el norte de la Alta del Atlántico Norte, vientos alisios débiles, y una mínima casi-equatorial desplazada hacia el norte, todo lo cual conduce a una mayor convección sobre el área, y por lo tanto, a una actividad de huracanes bastante incrementada (Cavazos, 1990). Durante un Niño, la PP está por debajo de la normal debido a un aumento anómalo en los vientos del oeste en la alta tropósfera sobre el Caribe y el Atlántico ecuatorial lo cual inhibe la formación y estabilidad de huracanes (Gray, 1984). Estos efectos circulatorios de la alta atmósfera traen menos PP principalmente en el Noreste, pero no son tan pronunciados en la parte central y Noroeste del país. EN parece no tener efecto sobre la actividad ciclónica (número de ciclones) en el Pacífico oriental pero afecta la intensidad ciclónica debido a la alta energía disponible de los océanos durante la estación cálida del año (Cortez, 2001). El área de estudio representa una de las áreas más sensitivas al fenómeno ENSO (Tiscareño *et al.*, 1998), así como una de las áreas de mayor producción agrícola en México para granos básicos tales como maíz y frijol para áreas de riego y temporal. La producción de temporal es altamente dependiente del patrón de lluvia durante la estación lluviosa. En esta región el área de temporal es de 1,530,000 ha (88%), con una producción promedio de 953,000 ton (41%). El área total de riego es de 209,000 ha (12%) con una producción promedio de 1,367,000 ton (59%) (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, SAGAR), sobre producción promedio en 1995, 1996 y 1997). Es muy importante saber cómo la variación de la demanda de agua debido a las diferentes láminas de PP en la región afectará los calendarios de riego para los años siguientes, principalmente en las áreas temporales. Como fue mencionado antes, el fenómeno ENSO ha sido reconocido por diferentes científicos como una de las fuerzas naturales más destructivas en lo concerniente a comportamientos climáticos. El fenómeno ENSO, con sus alternantes ocurrencias de EN y LN, afecta grandemente el abastecimiento de agua para cultivos de temporal y calendarios de riego para cultivos de riego a escala regional. La tasa de ETo bajo los años ENSO también es afectada, causando una variación en el abastecimiento de agua para los cultivos en general.

**Datos**

Veintiún años de datos climatológicos diarios (1970-1990) de temperatura máxima (T<sub>max</sub>), temperatura mínima (T<sub>min</sub>), PP y evaporación clase A (E<sub>v</sub>) fueron colectados y pro-

cesados utilizando el programa SAS para obtener valores mensuales de PP total, T<sub>media</sub>, E<sub>v</sub> media y E<sub>v</sub> total. También fueron colectados y procesados utilizando el mismo programa SAS, tres años de datos diarios (1996, 1997 y 1998) para obtener valores diarios, decenales y mensuales de PP total, T<sub>media</sub>, E<sub>v</sub> media y E<sub>v</sub> total.

Los datos diarios de PP en los veintiún años de registro, se analizaron con el objeto de obtener los patrones de PP asociados con los años ENSO para un período de seis meses (Mayo a Octubre), cubriendo el ciclo de lluvias en la región central de México. Para evaluar los cambios en el balance de agua en el suelo en tres años, 1996 (N) 1997 (EN) y 1998 (LN), se hicieron análisis de datos de PP y T<sub>media</sub>. Cada año incluyó el análisis de los 12 meses. Para evaluar el cambio temporal en la cubierta vegetal, se analizaron datos de PP y ETo a nivel decenal, estos datos a su vez fueron comparados con las imágenes satelitales decenales del AVHRR NDVI. Tanto la información climatológica terrestre como la información satelital se analizaron únicamente para el ciclo de lluvias (Mayo a Octubre).

Los datos climatológicos diarios provinieron de 20 estaciones climatológicas en la región central de México (Fig. 2) y (Cuadros 1 y 2), e incluyeron los estados de Zacatecas con diez estaciones (Nos. 3, 6, 210, 12,16, 18, 22, 32, 33 y 39); Aguascalientes con cuatro estaciones (Nos. 11, 17, 19 y 29), y Guanajuato, con seis estaciones (Nos. 1, 9, 41, 71, 94 y 95). La colección climatológica de datos para los tres estados fue proporcionada

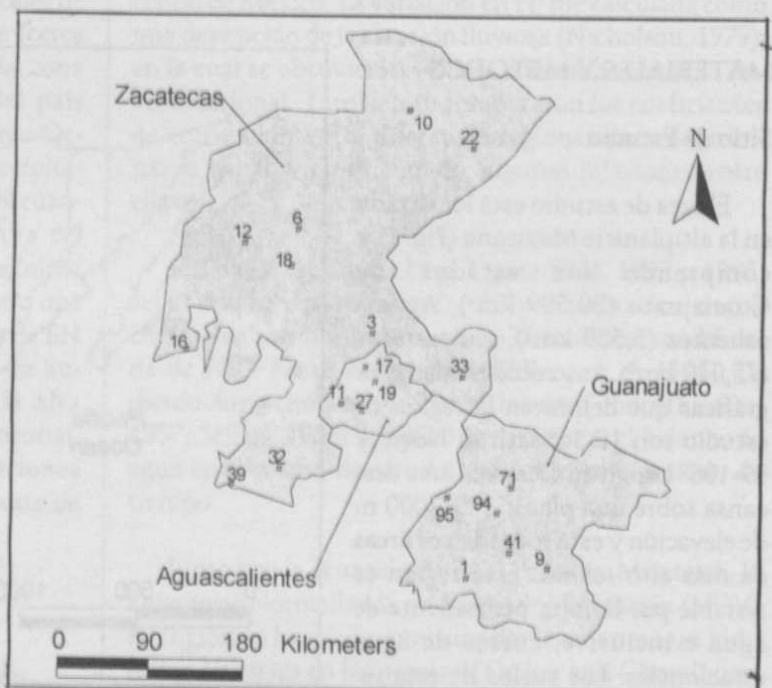


FIGURA 2. Red de estaciones climatológicas dentro de los estados bajo estudio.



por las oficinas del SMN en cada estado y fue la red de estaciones que cubrió mejor el criterio para el uso de datos climatológicos tales como continuidad y fiabilidad.

Dos años de datos de compuestos de NDVI de 10 días provenientes del avanzado radiómetro con alta resolución (AVHRR) montado en el satélite de la Administra-

ción Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA-14) se utilizaron para evaluar la variación en la cubierta vegetal. Los datos consisten de compuestos de imágenes de 1.1 km de resolución, y cubren el período de Mayo a Octubre para 1997 (un año húmedo), y 1998 (un año seco).

CUADRO 1. COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS BAJO ESTUDIO

Zacatecas		Coordenadas Geográficas (grados)		Aguascalientes		Coordenadas Geográficas (grados)		Guanajuato		Coordenadas Geográficas (grados)	
Estación No.	LN	LW	Estación No.	LN	LW	Estación No.	LN	LW			
3	22.54	102.39	11	21.92	102.66	1	20.45	101.53			
6	23.42	103.06	17	22.23	102.44	9	20.53	100.81			
10	24.47	102.10	19	22.12	102.36	41	20.67	101.15			
12	23.29	103.53	27	21.86	102.45	71	21.22	101.13			
16	22.37	104.03				94	21.00	101.26			
18	23.11	103.12				95	21.13	101.70			
22	24.15	101.53									
32	21.37	103.19									
33	22.16	101.59									
39	21.22	102.51									

CUADRO 2. ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS ANALIZADAS EN EL PERÍODO DE 1970 A 1990 Y 1996, 1997 Y 1998.

Zacatecas		Aguascalientes		Guanajuato	
Estación No.	Registro de Datos	Estación No.	Registro de Datos	Estación No.	Registro de Datos
3	1973-1999	11	1970-1999	1	1970-1999
6	1970-1998	17	1970-1999	9	1970-1998
10	1971-1998	19	1970-1999	41	1970-1999
12	1970-1989	27	1970-1999	71	1970-1999
16	1971-1998			94	1970-1999
18	1970-1998			95	1970-1999
22	1970-1998				
32	1970-1998				
33	1971-1998				
39	1970-1998				

Los datos de NDVI contenidos en el CD para 1997 y 1998 fueron procesados en el Laboratorio de Observación de la Tierra en el Instituto de Geografía de la Universidad Autónoma de México. Los datos consisten de compuestos de imágenes de 1.1 km de resolución. El valor de NDVI es una proporción ente las bandas del infrarrojo y rojo:

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}$$

donde

- NDVI = Normalized Difference Vegetation Index (Diferencia normalizada del índice de vegetación)
- NIR = Infrarrojo cercano del espectro electromagnético
- RED = Banda roja de espectro electromagnético

Los valores de las bandas del infrarrojo y del rojo del espectro electromagnético son recibidas del satélite NOAA14-AVHRR. Los valores originales de la base de datos del NDVI se registraron geoméricamente a una proyección Lambert de área cónica con un meridiano central de 102° Oeste y 23.5° Norte. El área local de cubierta tiene un instantáneo campo de vista de 1.1 km x 1.1 km con dimensiones de archivo de 600 líneas y 500 columnas. La descripción completa de los datos está contenida en un archivo 'readme' contenido en el disco compacto antes mencionado. El análisis completo de las imágenes incluye las 20 estaciones climatológicas (Fig. 2 y Cuadro 2), también ya mencionado anteriormente.

Los datos del NDVI provenientes de la imagen de satélite se fijaron a una área con proyección de 5 km de radio (Fig. 3), rodeando las estaciones climatológicas consideradas en este estudio, y después se realizó un análisis estadístico de los valores del NDVI.



FIGURA 3. Imagen satelital de un compuesto de 10 días de AVHRR-NDVI, en la segunda decena en Octubre de 1998. La imagen muestra la red de estaciones climatológicas dentro de los tres estados en estudio. El área circular (5 km de radio) alrededor de las estaciones, es el área a analizar estadísticamente.

**Metodología**

Una vez que se obtuvieron las medias mensuales de las variables bajo estudio, se corrió un modelo lineal de análisis de varianza (ANOVA) para saber si las variables bajo estudio (ej. PP, Tmedia, Ev) presentaron diferencias estadísticas significantes durante los diferentes años ENSO durante el período de tiempo bajo análisis (Cuadro 3).

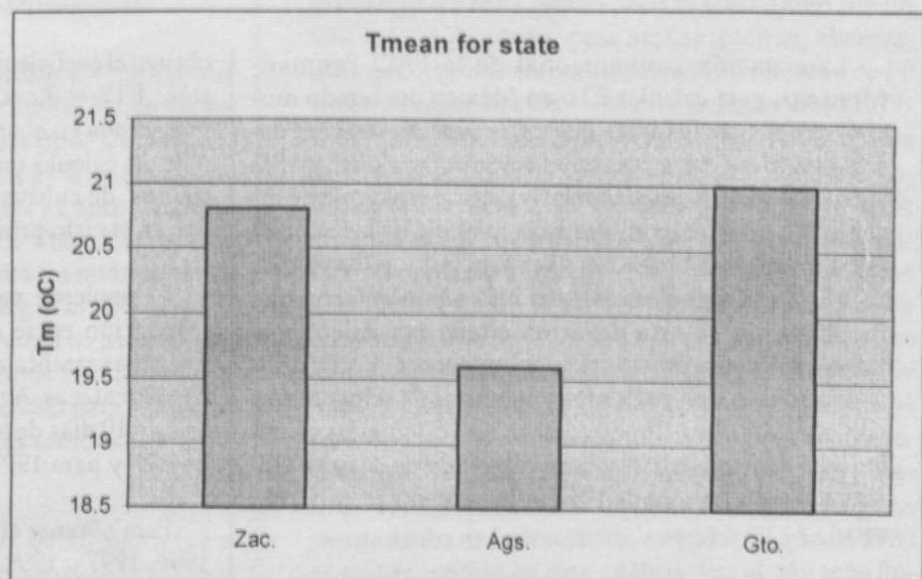
El análisis de varianza para Tm, y para los tres estados bajo estudio no mostró ninguna diferencia estadística para valores de  $\alpha = 0.01$  y  $0.001$  entre los años ENSO, tampoco hubo diferencia estadística para la interacción ENSO-mes, la única diferencia altamente estadística se encontró entre los meses en estudio, lo cual no es sorprendente, la temperatura mensual varía mes con mes debido al ciclo térmico anual.

**CUADRO 3. AÑOS ENSO DURANTE EL PERÍODO DE 21 AÑOS BAJO ESTUDIO (DESPUES DE ENSO INDEX JMMA SSTA 1868-PRESENT).**

Year	ENSO	Year	ENSO
1970	LN	1981	N
1971	LN	1982	EN
1972	EN	1983	N
1973	LN	1984	N
1974	N	1985	N
1975	LN	1986	EN
1976	EN	1987	EN
1977	N	1988	LN
1978	N	1989	N
1979	N	1990	N
1980	N		

Debido a los resultados del análisis de varianza para temperatura, ya no se procedió a seguir evaluándola estadísticamente. Sin embargo, para saber cómo se comporta en los diferentes estados durante el tiempo de estudio, se muestra una gráfica de los valores de T media (Fig. 4).

El análisis de varianza para PP fue altamente significativo entre los diferentes años ENSO así como entre la interacción ENSO-mes, esto permitió hacer un análisis detallado de la PP para la región y para los diferentes años ENSO.



**FIGURA 4. Comportamiento de la Tmedia en cada estado bajo estudio durante el período de Mayo-Octubre para el registro de 1970-1990.**



Para evaluar la variación de la PP en los tres estados en estudio y poder comparar estaciones con diferentes medias y desviaciones estándar, se aplicó un procedimiento utilizado por Krauss (1977) y Nicholson (1979), el procedimiento es definido de la siguiente manera:

- $r_{ij}$  lluvia estacional  $i$  en el año  $j$
- $n_i$  número de años de registro por estación  $i$
- $\bar{r}_i$  lluvia estacional media por estación  $i = \Sigma r_{ij}/n_i$
- $N_j$  número de estaciones disponibles en el año  $j$ .

La siguiente serie es derivada para cada estación  $i$

$$X_{ij} = (r_{ij} - \bar{r}_i)/\rho_i$$

donde  $X_{ij}$  es la desviación transformada de la lluvia estacional  $i$  en el año  $j$ , y  $\rho_i$  es la desviación estándar de los totales de lluvia. Para una región o zona en particular, la PP integrada es  $R$  y es calculada como

$$R_j = \Sigma X_{ij} / N$$

donde  $N$  es el número de estaciones climáticas y la sumatoria se hace sobre todas la  $N_j$  estaciones, esto facilita la comparación entre estaciones climáticas con diferente precipitación dentro del área de estudio. El cuadro 4 presenta las series de PP que cubren el período 1970-1990. Las estaciones son asignadas subjetivamente a cada una de estas regiones con base a la PP media estacional.

**CUADRO 4. CRITERIO DE ASIGNACIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMÁTICAS EN LAS CUATRO DIFERENTES REGIONES DE PP.**

Región	Estación No.	PP media anual (mm)	Coefficiente variación (por ciento)*
Región I	6, 10 y 22	250-350	43
Región II	3, 12, 18, 33 y 19	351-450	35
Región III	16, 11, 17 y 27	451-550	28
Región IV	32, 39, 1, 9, 41, 71, 94 y 95	551-700	29

\* Desviación estándar de los totales estacionales/media estacional.

La ecuación convencional de la FAO Penman-Monteith para calcular  $E_{To}$  en México, ha tenido muchos problemas debido a que esta ecuación requiere datos climáticos tales como radiación solar global, radiación solar neta, humedad relativa, etc., la mayoría de los cuales no están disponibles en la mayoría de las estaciones climáticas del país. Así que, para evaluar los valores de  $E_{To}$  en la región central del país, se trabajó con una modificación de esta ecuación citada por Allen et al (1998), la cual permitió calcular los valores de  $E_{To}$  utilizando sólo valores máximos y mínimos de temperatura como parámetros climatológicos. Se hicieron los cálculos de  $E_{To}$  para 10 días y para el período de Mayo a Octubre, y para los años de 1997 (año húmedo) y 1998 (año seco).

Debido a que la evapotranspiración de cultivo ( $E_{Tc}$ ) es un mejor estimador de la evapotranspiración real, se

obtuvo el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) requerido en la ecuación:  $E_{Tc} = K_c \times E_{To}$ . Utilizando una aproximación presentada en el artículo 56 de la FAO Irrigación y Drenaje, se calculó un  $K_c$  de 0.7, el cual incluye los coeficientes de cultivo para maíz y frijol, que son producidos en el ciclo primavera-verano del centro del país.

El siguiente paso para lograr este objetivo, será la correlación entre el análisis de los compuestos de las imágenes satelitales de NDVI de 10 días de los tres estados (Zacatecas, Aguascalientes y Guanajuato) y los análisis de 10 días de los valores de  $E_{Tc}$  y PP para el ciclo de lluvias y para 1997 y 1998.

Para obtener el balance de agua para los años ENSO 1996, 1997 y 1998, se trabajará con la metodología propuesta por Thornthwaite (Sellers, 1995). Esta metodología está basada en medias mensuales de  $T$  y  $PP$ .

Los resultados obtenidos en este estudio permitirán conocer la relación entre las deficiencias y excesos de agua y la PP. También, permitirá hacer modelos de predicción correlacionando los valores de NDVI junto con los valores de ETc en la región central del país durante los años ENSO.

Las conclusiones de este trabajo hasta este momento, son las siguientes:

- La temperatura del aire no presenta ninguna diferencia estadística significativa durante el ciclo de lluvias en el tiempo de estudio (1970-1990) para los años ENSO ni para la interacción ENSO-mes, pero sí hay diferencia estadística significativa entre meses, como es esperado.
- La PP media durante el ciclo de lluvias para los tres estados y para los diferentes años ENSO (Cuadros 5 y 6) muestra lo siguiente: En el estado de Zacatecas, durante los años de LN llueve más que durante los años de EN y N. LN es el evento más húmedo con 504.7 mm de lluvia y el año N es el más seco con 394.3 mm de lluvia. Durante EN llueven 417.6 mm. Esto significa que durante LN podemos esperar hasta un 28% y un 19% de más lluvia comparado a un año N y a la media de PP de los 21 años, respectivamente.

En el estado de Aguascalientes también llueve durante los años de la LN y EN. LN con 564.5 mm y EN con 461.0 mm traen más lluvia que un año N con 443.5 mm. Esto significa que durante LN y EN podemos esperar hasta un 27% y 4% más lluvia que en un año N y en la media de PP de los 21 años, respectivamente.

En el estado de Guanajuato también LN fue el evento más lluvioso con 730.3 mm de lluvia. Sin embargo, EN fue el evento más seco con 550.3 mm. Durante LN podemos esperar hasta un 28% y un 21% de más lluvia que en un año N y en la media de los 21 años, respectivamente. EN puede traer menos de 4% y 9% para los mismos periodos. Estos previos resultados están de acuerdo con los encontrados por Rosenberg *et al* (1997), quien señaló en general que en la región central de México llueve más durante LN y EN que en años N. El cuadro 5, muestra la PP media para los años ENSO para el registro de datos de 1970-1990 y para los tres estados bajo estudio.

De los tres estados bajo estudio, Guanajuato fue el más húmedo y Zacatecas fue el más seco con 605.7 mm y 422.0 mm de lluvia, respectivamente. Aguascalientes tiene una PP media de 472.6 mm (Cuadro 6).

Julio y Agosto fueron los meses más húmedos en los tres estados con medias de 149.4 mm y 124.6 mm, respectivamente (Cuadro 7). Esto significa que llueve el 55% del total de lluvia en la estación lluviosa en esos dos meses, el cual es de 500.1 mm para los tres estados (Ver Cuadro 6).

- En Julio y Agosto para los años de LN, llovieron 156.1 mm y 170.3 mm, respectivamente, representando aproximadamente 65% del total de lluvia durante la estación lluviosa.
- El cuadro 8 muestra la PP media por regiones para los años ENSO. Durante LN en general, llueve más por región que durante EN y un evento N.
- Estos estudios preliminares de PP para los años ENSO son muy importantes en las decisiones a tomar en el manejo de granjas agrícolas o de sitios de producción agropecuaria en general, tanto en la producción de riego como en la de temporal. Del conocimiento de la cantidad de agua disponible y su distribución en años secos y años lluviosos, dependerá en gran medida el calendario de riego y manejo de la producción agrícola tal como, fechas de siembra más cercanas o alejadas al ciclo lluvioso, densidad de siembra, fecha de cosecha, manejo de pesticidas, etcétera.
- Las figuras 5 y 6 muestran la lluvia estacional normalizada para los tres estados y para las cuatro regiones, respectivamente; para los 21 años de estudio, los resultados son los siguientes: a) En ambas gráficas, por estados y por regiones, podemos notar un período remarcable de cuatro años secos -1979, 1980, 1981 y 1982-. Estos cuatro años presentan desviaciones estándar de hasta 1.5 con respecto de la media; los primeros tres años fueron años N y el último fue un año EN. b) También, para ambas gráficas, observamos que hay dos comportamientos diferentes de PP antes y después de los 4 años del período seco (1979-1982). El primer comportamiento observado es que durante el período de 1970 a 1980, hay años alternados en la cantidad de PP recibida, pero la mayoría de los años están por encima de la desviación estándar con respecto de la media. Esto indica que para los años ENSO llovió al menos igual para ese período de tiempo. El segundo comportamiento observado después de 1982, muestra una PP más elevada que durante el período seco, sin embargo, durante este comportamiento llovió menos que en el período anterior al período seco, manteniendo algunos años igual o ligeramente arriba de la desviación estándar. El año de 1990 es una excepción en este análisis; fue el año más lluvioso desde 1973.



**CUADRO 5. PP MEDIA (MAYO A OCTUBRE) POR ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA Y POR ESTADO Y PARA LOS AÑOS ENSO (1970-1990).**

Zacatecas Estación No.	PP media	N	EN	LN
3	361.1	340.0	414.9	366.5
6	330.0	314.9	303.2	388.1
10	327.1	261.9	450.2	383.6
12	382.9	364.5	325.9	465.3
16	486.9	444.4	484.3	603.1
18	367.6	315.8	357.4	491.7
22	283.9	249.4	344.6	316.3
32	701.3	702.3	678.0	722.3
33	360.1	347.2	295.0	555.1
39	619.5	602.1	522.3	754.9
Promedio	422.0	394.3	417.6	504.7
Aguascalientes				
11	521.4	498.1	486.1	608.0
17	454.5	400.9	456.2	570.4
19	428.1	409.7	409.5	486.9
27	486.2	465.1	492.2	592.7
Promedio	472.6	443.5	461.0	564.5
Guanajuato				
1	621.6	580.8	611.2	721.7
9	555.6	506.9	524.1	694.0
41	625.5	597.8	603.0	699.1
71	605.3	580.9	513.1	741.5
94	598.6	591.4	474.5	769.8
95	627.3	579.3	575.5	755.7
Promedio	605.7	572.9	550.2	730.3

**CUADRO 6. PP MEDIA ESTACIONAL (MM) POR ESTADO POR AÑOS ENSO (1970-1990)**

Estados	PP media estacional	N	EN	LN
Zacatecas	422.0	394.3	417.6	504.7
Aguascalientes	472.6	443.5	461.0	564.5
Guanajuato	605.7	572.9	550.2	730.3

CUADRO 7. PP MEDIA MENSUAL (MM) PARA LOS AÑOS ENSO (1970-1990) PARA LOS TRES ESTADOS BAJO ESTUDIO.

	N	Sd	Sd error	EN	SD	Sd error	LN	Sd	Sd error
Mayo	21.7	29.8	2.1	30.3	25.0	2.7	24.4	28.6	3.0
Junio	78.8	72.7	5.1	84.6	70.0	7.5	119.6	58.5	6.1
Julio	123.9	64.2	4.5	168.3	92.7	9.8	156.1	76.4	8.0
Agosto	126.1	58.3	4.2	77.6	44.1	4.6	170.3	78.8	8.2
Septiembre	81.8	52.9	3.8	94.7	55.9	5.8	104.1	76.7	8.1
Octubre	34.1	32.4	2.3	39.6	33.8	3.6	27.4	29.0	3.1

CUADRO 8. PP MEDIA REGIONAL (MM) PARA LOS AÑOS ENSO (1970-1990)

	Mean PP	N	EN	LN
Región I	313.7	275.4	366.0	362.6
Región II	383.1	355.4	360.5	473.1
Región III	487.1	452.2	479.5	593.6
Región IV	619.1	592.6	562.8	732.4

Se derivaron cuatro regiones para las 20 estaciones climáticas, esta división está basada en la PP media estacional en los tres estados (ver Cuadro 4). La Fig. 7 muestra las estaciones y las regiones para diferentes medias de PP. La región I, con una PP media de 250-350 mm incluye las estaciones climáticas de Zacatecas No. 6, 10 y 22. Estas estaciones están localizadas más al norte, donde es esperado en general menos lluvia, al menos en esta región. La región II con una PP media de 351-450 mm incluye cinco estaciones, cuatro de Zacatecas No. 3, 12, 18 y 33 y una de Aguascalientes, No. 19. La región III con una PP media de 451-550 mm, incluye cuatro

estaciones, una de Zacatecas No. 16, y tres de Aguascalientes, No. 11, 17 y 27, respectivamente. La región IV con una PP media de 551-750 mm, incluye ocho estaciones, dos de Zacatecas No. 32 y 39, y todas las seis estaciones de Guanajuato No. 1, 9, 41, 71, 94 y 95. La distribución de las estaciones por regiones, está de acuerdo con lo descrito anteriormente en relación a la disminución de la población Xerofita en sentido noroeste-sureste, siguiendo el gradiente creciente de PP en el centro del país. El cuadro 9 muestra la PP media estacional por región y para la serie de años bajo estudio y para los años ENSO.

CUADRO 9. PP MEDIA ESTACIONAL (MM) PARA LA SERIE DE 21 AÑOS

	PP media estacional	N	EN	LN
Región I	313.7	275.4	366.0	362.6
Región II	383.1	355.4	360.5	473.1
Región III	487.1	452.1	479.7	593.6
Región IV	619.3	592.6	562.8	732.4

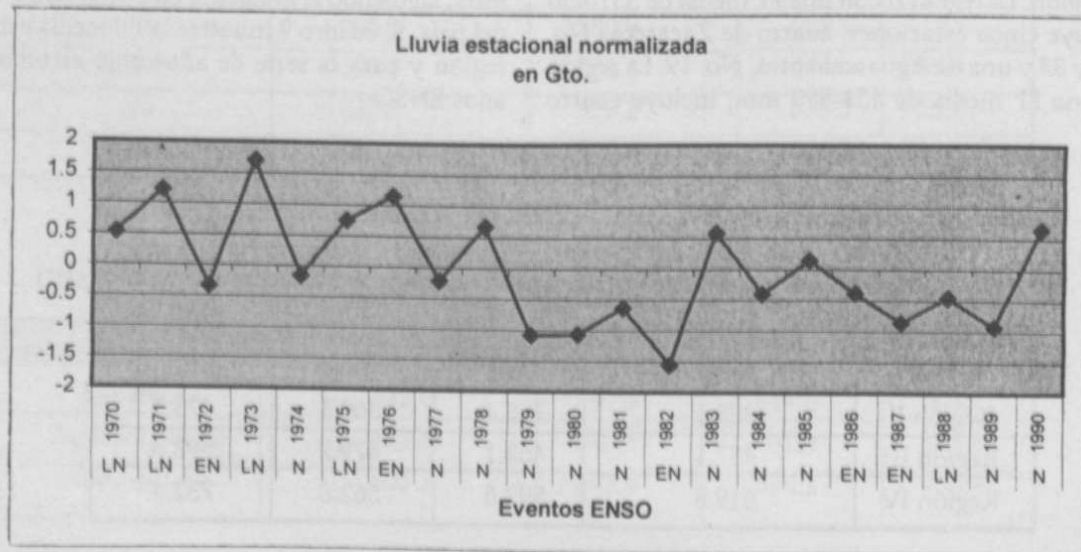
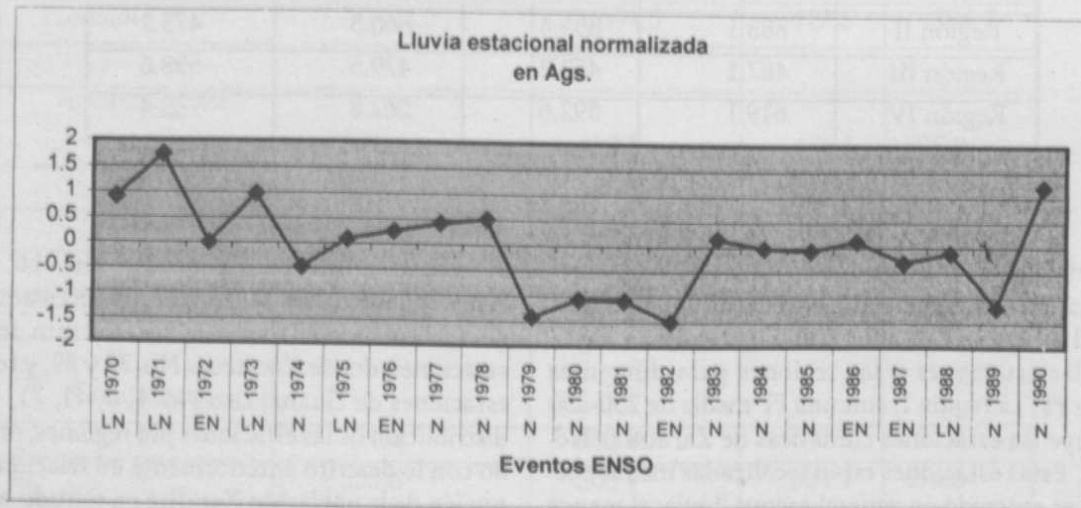
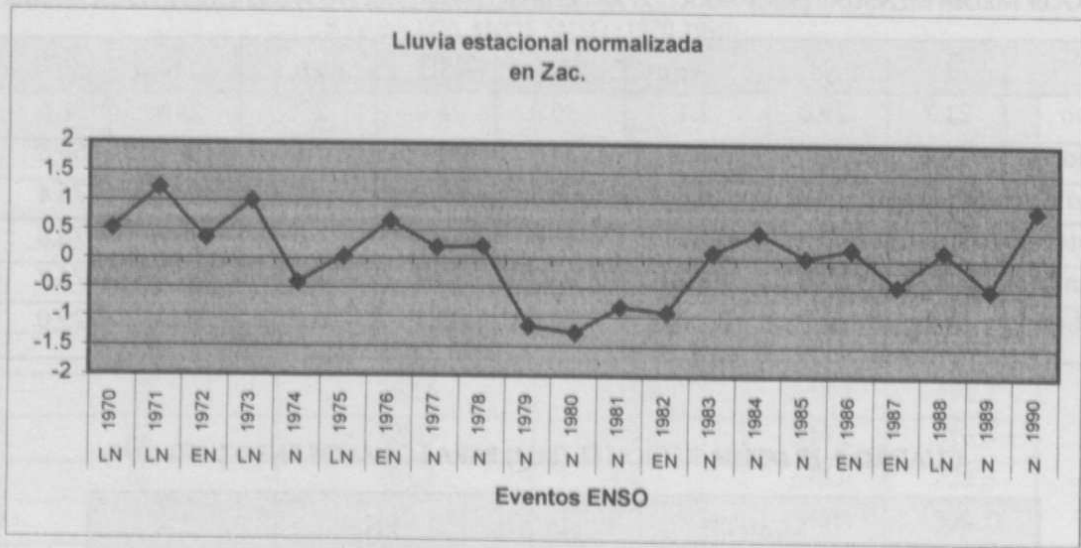


FIGURA 5. Lluvia estacional normalizada en cada estado.



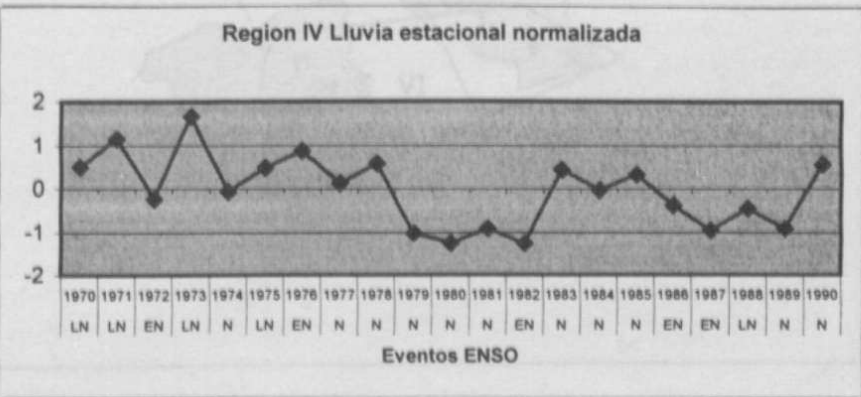
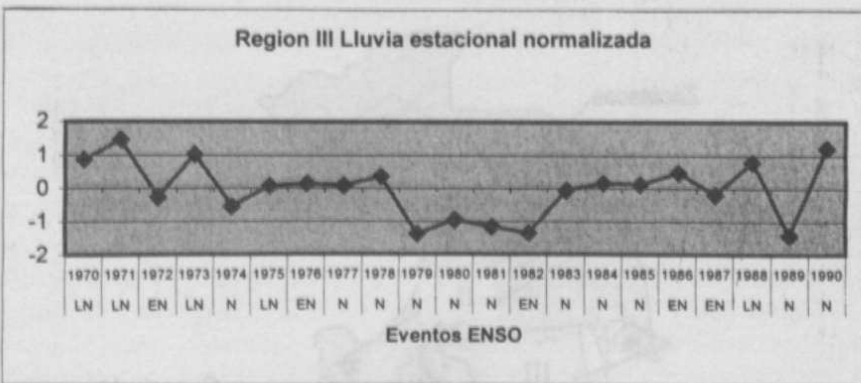
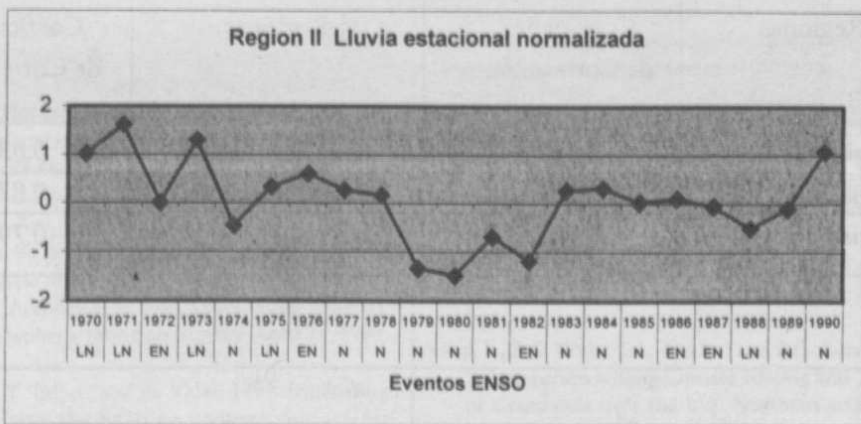
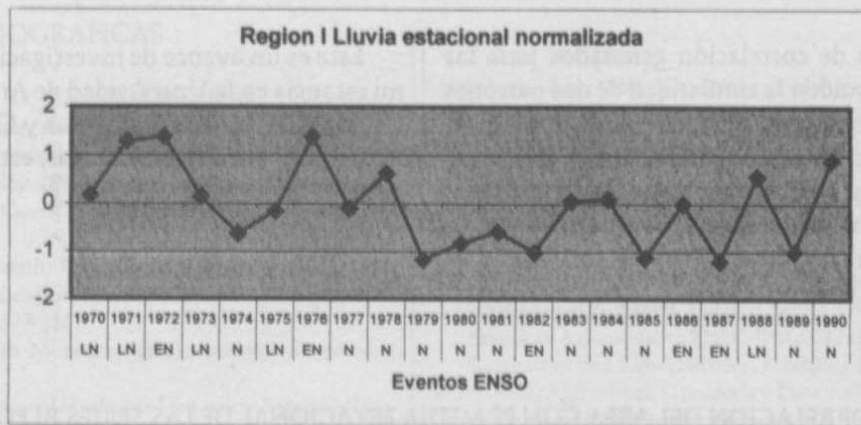


FIGURA 6. Lluvia estacional normalizada por regiones.

– Los coeficientes de correlación generados para las cuatro regiones miden la similaridad de dos patrones de comportamiento ya sea anual o estacional, con una alta correlación positiva indicando que el signo de las desviaciones en la mayoría de las estaciones y la magnitud relativa es la misma para ambos años. El cuadro 9, muestra los coeficientes de correlación para las regiones en estudio.

Este es un avance de investigación realizado durante mi estancia en la Universidad de Arizona para obtener el grado de Doctor en Suelo, Agua y Ciencias Ambientales. El producto final que es la tesis, estará terminada en Diciembre de 2001.

CUADRO 10. CORRELACIÓN DEL ÁREA CON PP MEDIA ESTACIONAL DE LAS SERIES RJ POR REGIONES I-IV.

Regiones	Coficiente de Correlación	Regiones	Coficiente de Correlación
Region I and II	0.634	Region II and III	0.835
Region I and III	0.687	Region II and IV	0.876
Region I and IV	0.645	Region III and IV	0.794

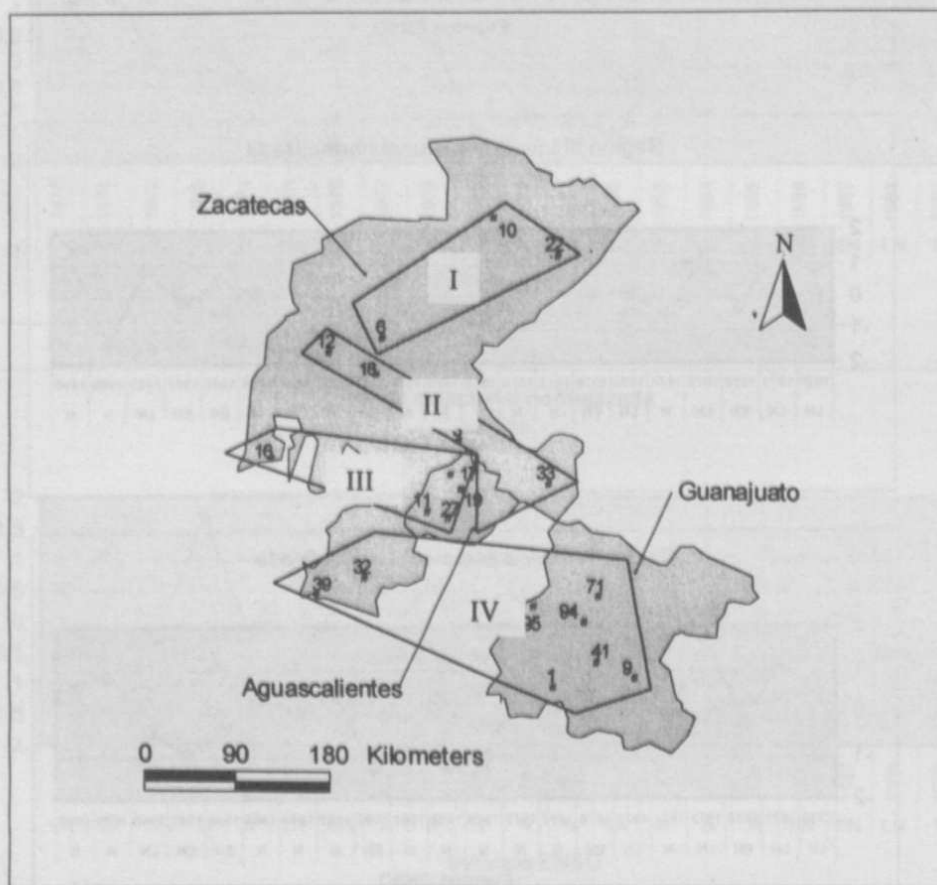


FIGURA 7. Red de estaciones climáticas y posición de las regiones I, II, III y IV.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen R.B., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration. Irrig. and Drain. Paper 56, Food and Agric. Organization of the United Nations, Rome, Italy. 300 pp.

Carlson, T.N. and D.A. Ripley. 1997. On the Relation Between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote Sens. Environ.* 62: 241-252.

Cavazos, T., and S. Hasternath. 1990. Convection and Rainfall over Mexico and their Modulation by the Southern Oscillation. *Int. Journal Climatol.*, 10, 377-386.

Cortez, M. 2001. Servicio Meteorológico Nacional. Personal Communication.

Gray, W. 1984. Atlantic Seasonal Hurricane Frequency. Part I. El Niño and 30 mb Quasi-Biennial Oscillation. *Mon. Wea. Rev.* 112, 1649-1668.

Huete, A.R., H.Q. Liu, K. Batchily and W. Van Leewen. 1997. A Comparison of Vegetation Indices Over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* 59: 440-451.

Jauregui, E. 1995. Rainfall Fluctuations and Tropical Storm Activity in Mexico. Rainfall fluctuations and Tropical Storm Activity in Mexico. *Erdkunde*, 49, 39-48.

Krauss, E.B. 1977. Subtropical Droughts and Cross-Equatorial Energy Transports. *Mon. Wea. Rev.* 10, 1009-1018.

Laboratorio de Observación de la Tierra. Instituto de Geografía de la Universidad Autónoma de México. 2000.

Legler, D.M. ENSO Index According to JMA SSTA (1868-present). Center for Ocean-Atmospheric Precipitation Studies. April 24, 1998. On-line.

Moran, M.S., T.R. Clarke, Y. Inoue, and A. Vidal. 1994. Estimating Crop Water Deficit Using the Relation between Surface-Air Temperature and Spectral Vegetation Index. *Remote Sens. Environ.* 49:246-263.

Nicholson, S.E. 1980. The Nature of Rainfall Fluctuations in Subtropical West Africa. *Mon. Wea. Rev.* 108, 473-487.

1979. Revised Rainfall Series for the West African subtropics. *Mon. Wea. Rev.* 107, 620-623.

Roderick M., R. Smith, and S. Cridland. 1996. The Precision of the NDVI Derived from AVHRR Observations. *Remote Sens. Environ.* 56:57-65.

Rosenberg, N.J., R.C. Izaurralde, M. Tiscareño-López, D. Legler, R. Srinivasan, R.A. Brown, and R.D. Sands. 1997. Sensitivity of North American Agriculture to ENSO-based Climate Scenarios and Their Socio-economic Consequences; Modeling in An. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SAGAR) Centro de Estadística Agropecuaria, México, 1997.

Sellers, W.D. 1965. *Physical Climatology*. The University of Chicago Press. 272 pages.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Estadísticas climatológicas para PP y Tm para el período 1941-1996.

Sistemas de Información Geográfica Estatal (SIGES). Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato INEGI. 1981. México.

Thorntwaite., C.W. and J.R. Mather. 1957. *Instruccions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance*. Centerton, New Jersey. Publications in Climatology Vol. X, No. 3. 185-311.

Wittich, K-P., O. Hansing. 1995. Area-averaged vegetative cover fraction estimated from satellite data. *Int. J. Biometeorol.* 38:209-215.

Yang, L., B.K. Wylie, L.L. Tieszen and B.C. Reed. 1988. An Analysis of Relationships among Climate Forcing and Time-Integrated NDVI of Grasslands over the U.S. Northern and Central Great Plains. *Remote Sens. Environ.* 65:25-37.