

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA



**TELECONEXIONES DE LA OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO A LA
PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN MÉXICO**

POR:

ANGELA RAMÍREZ LEYVA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO FORESTAL

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO.

MAYO DE 2009

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

**TELECONEXIONES DE LA OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO A LA
PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN MÉXICO**

POR:

ANGELA RAMÍREZ LEYVA

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO FORESTAL

APROBADA:



Departamento
Forestal

ASESOR PRINCIPAL

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE
AGRONOMÍA


DR. JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ


DR. MARIO ERNESTO VÁZQUEZ BADILLO

Coordinación
División de Agronomía
SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO.

MAYO DE 2009

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

**TELECONEXIONES DE LA OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO A LA
PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN MÉXICO.**

Por

ANGELA RAMÍREZ LEYVA

TESIS PROFESIONAL

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO FORESTAL

APROBADA

ASESOR PRINCIPAL


DR. JORGE MENDEZ GONZÁLEZ



Departamento
Forestal


ASESOR
DR. ELADIO HERIBERTO CORNEJO OVIEDO


ASESOR
DR. ALEJANDRO ZÁRATE LUPERCIO

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO.

Mayo de 2009

DEDICATORIAS

A DIOS., por iluminar mi camino, por permitirme gozar y aprovechar al máximo cada momento de la vida y por permitirme llegar a cumplir una meta más en mi vida.

A MI MADRE., Sra. Angela Leyva Aviléz por su infinito amor y confianza, por apoyarme siempre incondicionalmente, ya que siempre me ayudaste cuando más te necesite, me faltan palabras para decirte cuanto te admiro y te quiero, mil gracias por ser mi inspiración.

A MI PADRE., Sr. Carlos Ramírez y Ramírez por el gran esfuerzo y apoyo que me brindaste en todos los momentos difíciles de mi carrera por todo esto y más gracias.

A MIS HERMANAS., Karla y Karina por estar siempre conmigo ayudándome siempre a salir adelante, por compartir momentos tristes y alegres, pero sobre todo porque dentro de nosotras nos une un gran amor.

A MIS PRIMOS., Monserrat, Maria Yoali, Fernando y Emilio porque son la alegría de la casa, por todos los momentos felices que llenaron con sus tiernas sonrisas, por mostrarme siempre su gran cariño.

A MIS ABUELOS., Emilio Leyva Nava y María Aviléz Díaz (†) por cuidarnos y protegernos gracias por su generoso afecto, cariño y comprensión que siempre me han brindado, por sus consejos que siempre me dieron fuerzas.

A MI COMPAÑERO DE BATALLAS., Rafael Loyo Melchor por los momentos inolvidables, por siempre brindarme tu apoyo, confianza y amor.

A Neri B. Benavides Hernández., por todo que esta por venir mi mosquito...

AGRADECIMIENTOS

A MI ALMA MATER., Por la oportunidad realizar mis estudios de Ingeniero Forestal por el apoyo para llegar a ser una profesionalista al servicio del campo y la sociedad.

AL Dr. JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ., Asesor principal de este trabajo, por enseñarme a valorar el tiempo y el trabajo pero sobre todo por su interés en mi superación, su entusiasmo y decidido apoyo en la realización de la tesis. Gracias porque además de ser mi asesor siempre me brindo su confianza y amistad.

AL Dr. ALEJANDRO ZÁRATE LUPERCIO., Por sus valiosos comentarios y observaciones que fortalecieron más el contenido del trabajo.

AL Dr. ELADIO CORNEJO OVIEDO., Por las sugerencias y observaciones en la asesoría del trabajo, por ser una persona siempre abierta a la consulta así como por su apoyo y consejos.

AL M.C. JORGE ALBERTO RAMIREZ LEYVA., Por ser un gran amigo, pero no solo eso, eres mi hermano y gracias por contribuir en mi formación profesional.

AL M.C. LINDOLFO ROJAS PEÑA., Por su ayuda desinteresada pero sobre todo por abrirme las puertas de su casa, por su sencillez, amabilidad y sabios consejos.

A TODOS LOS PROFESORES DEL DEPARTAMENTO FORESTAL., Gracias por su comprensión, por su paciencia y por su interés en transmitir sus conocimientos.

AL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL., Por la colaboración para la realización de este trabajo al proporcionar la información climatológica.

A TODOS MIS COMPAÑEROS DE LA CARRERA DE INGENIERO FORESTAL
GENERACION CVI

ÍNDICE

Página

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Importancia del estudio	1
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Justificación del estudio.....	4
2. OBJETIVOS	5
2.1. General	5
2.2. Específicos	5
2.3. Hipótesis de trabajo	5
3. REVISIÓN DE LITERATURA	6
3.1. Variabilidad climática.....	6
3.2. Formas naturales de variabilidad del sistema climático	8
3.3. Tendencias de precipitación y temperatura.....	9
3.4. Índices de los modos de variabilidad atmosférica e impactos	11
3.5. Estudios de la Oscilación Decadal del Pacífico en el mundo.	15
3.6. Estudios de la Oscilación Décadal del Pacífico en México.....	16
4. MATERIALES Y MÉTODOS	18
4.1. Descripción físico-climática del área de estudio	18
4.2. Fuente de datos.....	19
4.3. Procedimientos y análisis estadísticos.....	20
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
5.1. Teleconectividad temporal de la PDO a la precipitación.....	24
5.2. Distribución geográfica de las teleconexiones PDO-Precipitación	27
5.3. Teleconectividad temporal de la PDO a temperaturas máximas y mínimas... 31	
5.4. Distribución geográfica de las teleconexiones PDO-temperaturas máximas 37	
5.5. Distribución geográfica de las teleconexiones PDO-temperaturas mínimas. 39	
5.6. Correlación paramétrica vs no paramétrica.....	42
6. CONCLUSIONES	43
7. RECOMENDACIONES	46
8. LITERATURA CITADA	47

Índice de Figuras

Página

Figura 1. Distribución geográfica de las estaciones climatológicas utilizadas en este estudio...	20
Figura 2. Comportamiento promedio del índice de la PDO (línea gruesa) y patrones mensuales (líneas discontinuas) desde 1900-2008.	22
Figura 3. Porcentaje de estaciones con correlación significativa (+ y -) $p \leq 0.10$ desde el año 0 - 5 (escala anual) entre la PDO y la precipitación en México.	24
Figura 4. Porcentaje de estaciones con correlación significativa (+ y -) de A0 entre la PDO y la precipitación en México.	25
Figura 5. Porcentaje de estaciones con "r" significativa ($p < 0.10$) durante A0 (escalas mensuales) y promedio del índice de la PDO desde 1950-2008 (eje derecho).	27
Figura 6. a) Patrones geográficos de correlación de la PDO y precipitación en México durante A0 (escala mensual), y b) Histograma de frecuencias del coeficiente de correlación "r".	28
Figura 7. a) Patrones geográficos de correlación entre la PDO y precipitación en México durante A0 (escala mensual), y b) Histograma de frecuencias del coeficiente de correlación "r". .	29
Figura 8. a) Patrones geográficos de correlación entre la PDO y precipitación en México durante A0, (escala mensual), y a). Histograma de frecuencias del coeficiente de correlación "r".	30
Figura 9. a) Porcentaje de correlación significativa (+ y -) $p \leq 0.10$ desde el año 0 - 5 (escala anual) entre la PDO y la temperatura máxima en México, y b) Lo mismo pero para temperatura mínima.	32
Figura 10. Porcentaje de correlación significativa (+ y -) del año Z0 entre el PDO y la temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha) en México.	34
Figura 11. Porcentaje de estaciones con "r" significativa ($p < 0.10$) entre la PDO y temperaturas máximas en México durante A0 (escalas mensuales).	36
Figura 12. Porcentaje de estaciones con "r" significativa ($p < 0.1$) entre la PDO y temperaturas mínimas en México durante A0 (escalas mensuales).	36
Figura 13. Patrones geográficos de correlación entre la PDO y temperatura máxima en México durante A0, (escala mensual).	38
Figura 14. Histograma de frecuencias del coeficiente de correlación de r de todos los meses del año (temperatura máxima).	39

Figura 15. Patrones geográficos de correlación entre la PDO y temperatura mínima en México durante A0, (escala mensual)..... 41

Figura 16. Histograma de frecuencias del coeficiente de correlación de r de todos los meses del año. 42

Índice de Cuadros

Página

Cuadro 1. Algunos índices océano atmosféricos del sistema climático. 14

RESUMEN

La presente investigación analiza las posibles teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) sobre datos instrumentales mensuales de precipitación y temperaturas máximas y mínimas en México, con el objetivo de identificar las regiones más susceptibles a este fenómeno. El análisis de datos se basó en un total de 550 estaciones climatológicas distribuidas en todo el territorio mexicano, usando información proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional mexicano (SMN), variando desde 1950-2008. Las teleconexiones fueron evaluadas mediante análisis de correlación de Spearman "r", a escalas mensuales a un nivel de $p \leq 0.10$, realizando retardos de correlación desde 0 hasta 5 años (A0-A5). Los resultados del análisis muestran una importante teleconectividad de la PDO a la precipitación en México especialmente durante A0, registrándose principalmente en los meses de noviembre, marzo y mayo con un 26.18, 12.36 y 11.64%, respectivamente, del total de estaciones analizadas. El registro de lluvia durante estos meses parece estar asociada a la fase negativa de la PDO mostrando mayoritariamente correlaciones positivas y distribuyéndose geográficamente sobre el noreste de México a escalas locales y consistentes. En temperaturas también se muestra una importante influencia de la PDO, registrándose principalmente una disminución de temperaturas máximas y mínimas en regiones amplias del noreste de México, durante el año actual, en los meses fríos (noviembre-marzo), la cual parece estar asociada a la fase negativa de la PDO. Sin embargo, se encontró que el aumento de temperatura mínima en México durante parte del verano, registrada en el centro y sur de México está asociada parcialmente a la PDO.

Palabras Clave: Teleconexiones, PDO, precipitación, temperatura y México.

ABSTRACT

This research examines the possible teleconnections of Pacific Decadal Oscillation (PDO) using instrumental data on monthly precipitation, maximum and minimum temperatures in Mexico, in order to identify regions most susceptible to this phenomenon. Data analysis was based on a total of 550 weather stations distributed throughout the Mexican territory, information provided by the Mexican National Meteorological Service (SMN), ranging from 1950-2008. Teleconnections were valued using Spearman correlation analysis "r" at the monthly level of $p \leq 0.10$, with correlation lags from 0 to 5 years (A0-A5). The results show a significant correlation between the PDO and precipitation in Mexico especially during the present year recorded mainly in November, March and May with a 26.18, 12.36 and 11.64%, respectively, of total stations analyzed. Record rainfall during these months seems to be associated with the negative phase (cold) of the PDO showing positive correlations mostly distributed geographically and on the northeast of Mexico at the local and consistent scales. The maximum and minimum temperatures also shows a significant influence of the PDO, registering decreasing of maximum temperatures in large areas of northeastern Mexico during A0, in the month of January, March and November with 37.6%, 36.7% and 29.5% respectively of total stations analyzed, which seems to be associated with the cold phase of PDO. At the minimum temperatures teleconnections were observed in northeast Mexico, decreasing temperatures at the local level and very isolated in October and December, it was however, found that the increase in minimum temperature (diurnal) in Mexico during the summer, in small areas fo central and southern Mexico is associated with warm phase of the PDO.

Key word: teleconnections, PDO, precipitation, temperature and México.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Importancia del estudio

El cambio climático es una realidad que cada vez tendrá más incidencia en nuestras vidas, éste se refiere al estado del clima que puede ser identificado por cambios en su variabilidad y que persiste por un extenso periodo (por decenios o más), puede deberse a procesos naturales internos o a un forzamiento externo (IPCC, 2008). Algunas influencias externas, tales como los cambios en la radiación solar y el vulcanismo, ocurren naturalmente y contribuyen a la variabilidad natural total del sistema climático. Otros cambios externos, tales como el cambio en la composición de la atmósfera que comenzó con la revolución industrial, son resultado de la actividad humana (IPCC, 1995). En la actualidad existe una considerable incertidumbre con respecto a los fenómenos meteorológicos y las respuestas de los ecosistemas a éstos, esta situación afecta y preocupa a todos los países del mundo principalmente aquellos que dependen fuertemente de recursos naturales. La precipitación y temperatura tienen un papel importante en el manejo de los recursos naturales, debido a que controlan las actividades agrícolas, pecuarias y forestales, así como también las actividades económicas, comportamiento y desarrollo social (Corte-Real *et al.*, 1998).

De acuerdo a evidencias observacionales, los cambios climáticos de mayor impacto para México serán los asociados con la precipitación y temperatura,

pues existen sistemas humanos que están siendo afectados por el aumento en la frecuencia de inundaciones y sequías (Magaña y Gay, 2002).

Un fenómeno que contribuye a la variabilidad del clima en nuestro país y en todo el mundo, es El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), que altera los patrones climáticos globales; sin embargo, no se puede pensar que la variabilidad interanual se reduce sólo al fenómeno ENSO. Existen otros factores que pueden generar variaciones en el clima en diferentes escalas de tiempo, como son los cambios en la temperatura superficial del mar, variaciones en la cubierta de hielo y nieve así como cambios en la cubierta vegetal del planeta (Magaña y Matías, 2004; IPCC,2007; IPCC, 2008).

Se conocen numerosas causas naturales de fluctuaciones en los patrones climáticos globales, como son la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO), la Oscilación de El Niño (SOI) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) entre otros. De éstos se han desarrollado una variedad de índices utilizados por climatólogos y meteorólogos para estudiar el tiempo (Giddings y Soto, 2006).

La presente investigación se enfoca a estudiar las teleconexiones de la precipitación y temperatura mensual en México, a la "Oscilación Decadal del Pacífico" por sus siglas en ingles, la PDO es un patrón de variabilidad climática que se manifiesta en el Océano Pacífico Norte y en Norteamérica, se manifiesta mediante dos fases, una fase positiva y una negativa, en la primera la temperatura superficial del mar aumenta, mientras que en la segunda las

temperaturas se invierten. Una teleconexión se entiende como una correlación significativa, positiva o negativa, en las fluctuaciones de un campo en puntos terrestres separados por grandes distancias. Normalmente aplicado a la variabilidad en escalas de tiempo mensuales y mayores, según la Sociedad Americana de Meteorología (AMS, 2000).

La PDO es un fenómeno similar a la Oscilación del Sur, sin embargo, hay dos características principales que la distinguen de El Niño (Mantua *et al.*, 1997); a) De escala temporal ya que la PDO puede persistir por sobre los 20 años mientras que El Niño sólo persiste en promedio de 8 a 18 meses. b) De escala espacial porque la PDO se manifiesta más bien en el Océano Pacífico Norte y en Norteamérica, en cambio El Niño es más visible en el sector tropical del Océano Pacífico.

1.2. Planteamiento del problema

Después de observar la variabilidad climática que se está dando en los últimos años a nivel global, no se cuenta con información suficiente que revele de qué forma se ve afectado nuestro país por la PDO, y mucho menos a escalas mensuales. El comportamiento de la variabilidad climática y teleconexiones a escalas anuales e interanuales, difieren considerablemente sobre escalas mensuales, por tal motivo, la presente investigación enfatiza sobre estas escalas. Se requiere conocer la variabilidad del clima especialmente en éstas escalas sobre la precipitación y temperatura ya que son elementos claves que

caracterizan el clima de una región, para la planeación de las diferentes actividades agrícolas, pecuarias y forestales.

1.3. Justificación del estudio

Realizar estudios de teleconexiones proporcionaría información y bases para poder explicar relaciones entre fenómenos meteorológicos y alguna variable climática como por ejemplo la precipitación y temperatura en México con la PDO, y posteriormente, estar actualizados de las evoluciones de la PDO en el Pacífico Norte para planificar estrategias que mejor conlleven al manejo de los recursos naturales, incluso de la sociedad misma.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Evaluar la posibilidad de teleconexión de la Oscilación Decadal del Pacífico a la precipitación y temperatura en México.

2.2. Específicos

Aplicar análisis de correlación paramétrica y no paramétrica para identificar teleconexiones de la PDO a la precipitación y temperatura máxima y mínima a escala mensual en México.

Identificar las regiones geográficas del país más susceptibles al Fenómeno de la PDO y posibles impactos y consecuencias.

2.3. Hipótesis de trabajo

Existen teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico a la precipitación y temperatura máxima y mínima en México.

Las teleconexiones de la PDO a precipitación y temperaturas máximas y mínimas, son similares tanto en tiempo como en espacio, siendo más evidentes en las regiones más cercanas al origen del fenómeno.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Variabilidad climática

El “Tiempo” y el “Clima” tienen una influencia fundamental en la vida sobre la tierra; estos dos términos generalmente confundidos, especificando, “Tiempo”, se refiere a las fluctuaciones del estado de la atmósfera a nuestro alrededor, caracterizado por temperatura, precipitación, viento y nubosidad. “Clima” es definido como promedio del “Tiempo” (Houghton *et al.*, 1990). El IPCC, (1996) señala a “Clima” como la descripción estadística en términos de la media y su variabilidad sobre cierto tiempo (generalmente de 30 años), sobre cierta área.

El clima varía de un día a otro, entre meses, años, décadas e incluso entre milenios, pero también de un lugar a otro. La variabilidad del clima se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (desviaciones típicas, ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima, en todas las escalas espaciales y temporales (IPCC, 1996).

Montealegre y Pabón (2002) mencionan que la variabilidad climática se refiere a los cambios del clima durante períodos de tiempo relativamente cortos. Por ejemplo, en un año en particular, se registran valores por encima o por debajo de la normal climatológica, ésta es utilizada para definir y comparar el clima ya que representa el valor promedio de una serie continua de mediciones de una variable climatológica durante un período de por lo menos 30 años. A la diferencia entre el valor registrado de la variable y su promedio se le conoce

como Anomalía. En diferentes años, los valores de las variables climatológicas (temperatura, precipitación, etc.) fluctúan por encima o por debajo de lo normal. La secuencia de estas oscilaciones alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática y su valoración se logra mediante la determinación de las anomalías.

Conde (2003) manifiesta que además de las variaciones en temperatura, precipitación, etc. la variabilidad climática se manifiesta en modos de forzamientos externos como cambios en las erupciones volcánicas, fenómenos naturales y variaciones en la actividad solar, así como composición atmosférica (IPCC, 2007) las cuales se pronostica se incrementen también para los próximos años.

Seleshi y Delleur (1994) han estudiado el número de manchas solares indicando que éstas pueden alterar el balance de radiación que llega a la Tierra y por lo tanto tiene efectos en el clima del mundo.

La variabilidad climática se manifiesta en diferentes escalas de tiempo y espacio de acuerdo a Montealegre y Pabón (2002), la escala estacional corresponde a la fluctuación del clima a nivel mensual, la escala intraestacional determina las condiciones de tiempo durante semanas (de uno a dos meses), la escala interanual corresponden las variaciones climatológicas de año en año, y la escala interdecadal se manifiesta en fluctuaciones del clima a nivel de décadas.

3.2. Formas naturales de variabilidad del sistema climático

Garduño (1999) concluye que “la única constante del clima es su variabilidad”, haciendo referencia a las Oscilaciones naturales del sistema climático, menciona que los estudios realizados sobre variaciones climáticas naturales en la República mexicana en aquel tiempo eran insuficientes, pero se empieza a contar con información para interactuar con los procesos del clima y enfrentar sus impactos.

Philander (1990) señala que El Niño Oscilación del Sur tiene una componente oceánica y una componente atmosférica que oscila entre anomalías cálidas (El Niño) y frías (La Niña) de la temperatura de la superficie del mar en el este y centro del Pacífico Ecuatorial. De acuerdo a las observaciones realizadas en diversas partes del mundo (Cavazos y Hastenrat, 1990; Jones y Trewin 2000; Magaña y Matías, 2004; Díaz *et al.*, 2008) este fenómeno tiene impactos importantes en la variabilidad de precipitación y temperatura.

Landscheidt (2001) menciona a la Oscilación del Atlántico Norte como un fenómeno atmosférico de gran importancia en lo que se refiere a variabilidad y cambio climático, la influencia de la NAO sobre la zona del Mediterráneo Occidental ha sido discutida por muchos autores (Van Loon y Roger 1978; Corte-Real *et al.*, 1995; Hurrell y Van Loon, 1997; Parra *et al.*, 1998; González-Rouco *et al.*, 2000; Maheras *et al.*, 2001) ésta se entiende como los vaivenes de las diferencias de la presión atmosférica a nivel del mar entre el Ártico y el Atlántico subtropical.

Troup (1965) sugiere que la Oscilación del Sur es un sistema importante de una variabilidad climática interanual, especialmente en los trópicos. La fase baja y cálida de la SOI se define por una presión baja/alta anómala en Tahiti/Darwin y por aguas superficiales anómalamente cálidas en el Pacífico ecuatorial. Los impactos sobre la precipitación en México por este índice han sido bien descritos por Cavazos y Hastenrat (1990) y Magaña y Gay, (2002).

3.3. Tendencias de precipitación y temperatura

Las tendencias de la precipitación terrestre han sido analizadas en base a diversos conjuntos de datos, entre ellos, los de la Red Mundial de Datos Climatológicos Históricos (Peterson and Vose, 1997). El IPCC (2007) muestra las tendencias globales de precipitación, indicando que entre 1900 y 2005, la precipitación aumentó notablemente en las partes orientales del norte de América del Sur y del Norte, Europa septentrional, y Asia septentrional y central, aunque disminuyó en el Sahel, en el Mediterráneo, en el sur de África y en ciertas partes del sur de Asia.

Bates et al. (2008) indican que durante el siglo XX, la precipitación ha aumentado en mayor medida en extensiones terrestres y en latitudes septentrionales altas, y ha disminuido entre los 10°S y los 30°N a partir de los años 70. En la mayoría de las áreas, la frecuencia de fenómenos de precipitación intensa (o la proporción total de lluvia descargada por lluvias intensas) ha aumentado.

Las tendencias de la precipitación en México han sido estudiadas por Méndez et al (2008a) estudiaron de 1920 al 2004 encontrando cambios importantes en verano, registrándose un incremento de lluvia en regiones áridas y semiáridas a escalas regionales y consistentes, y concluyen que en verano se dieron incrementos y decrementos de aproximadamente 30 mm por década, mientras que el invierno registra solamente 8 mm por década.

De más de 29.000 series de datos observacionales, recogidas en 75 estudios, que arrojan cambios importantes en numerosos sistemas físicos y biológicos, más de un 89% son coherentes con la dirección del cambio esperado en respuesta al calentamiento (IPCC, 2007).

El IPCC (2007) y Bates et al. (2008) afirman que de los doce últimos años (1995-2006), once figuran entre los doce más cálidos en los registros instrumentales de la temperatura de la superficie mundial (desde 1850). La tendencia lineal a 100 años (1906-2005), cifrada en 0,74°C entre 0,56°C y 0,92°C con una tendencia al calentamiento más acusada durante los últimos 50 años.

Méndez et al (2008b) evaluaron la variabilidad de la temperatura máxima y mínima en México durante los últimos 50 años, de 1950 al 2006, indicando en sus resultados cambios en la temperatura mínima incrementándose hacia el NE del país y disminuyendo hacia el SE, por otro lado las temperaturas máximas se comportan de manera contraria, revelando que la temperaturas de México tienden a hacerse más extremosas.

3.4. Índices de los modos de variabilidad atmosférica e impactos

Giddings y Soto (2006) presentan una variedad de índices empleados por climatólogos y meteorólogos para estudiar el tiempo. Uno de los índices más conocidos es el **NINO34** que se presenta como anomalías del promedio de la TSM (temperatura superficial del mar) el cual ha sido recomendado para estudios del fenómeno del ENSO por acuerdo del NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration de U.S.A) (NOAA, 2005).

Se ha acuñado el término de El **ENSO** a una componente oceánica y una componente atmosférica, que oscila entre anomalías cálidas (El Niño) y frías (La Niña) de la temperatura de la superficie del mar en el este y centro del Pacífico Ecuatorial (Quin *et al.*, 1987), cuyos impactos en México revelan inviernos más fríos, con un superávit en los regímenes de precipitación, particularmente en el Norte del país, percibiéndose un contraste durante el verano, con aumento de temperaturas y déficit de precipitación (Cavazos y Hastenrath, 1990; Magaña, 1999; Magaña y Gay, 2002).

Hurrell *et al.* (2001) definen el índice de la **Oscilación del Atlántico Norte** como la diferencia normalizada de presión medida en las estaciones en las Azores e Islandia. Consideran que se presenta un índice NAO positivo cuando un centro de presión subtropical es mayor que lo normal y un centro de baja presión en Islandia, más profundo que lo normal. Mientras que un índice NAO negativo apunta a un subtropical alto débil y a un fuerte bajo en Islandia

Troup (1965) sostiene que la variación de la presión atmosférica, es un indicador del estado del sistema tal como ha sido expresado a través del **Índice de Oscilación Sur**, el cual pondera la diferencia de la presión atmosférica entre Tahiti y Darwin (Australia), el SOI es una medida comparativa de cómo cambia la presión atmosférica en dos grandes regiones, occidental y central-oriental, del Océano Pacífico Tropical.

Kerr (2005) relaciona al Índice de la **Oscilación Multidecadal del Atlántico** con la frecuencia de tormentas tropicales; alto índice de valores indican un océano más **cálido** y más tormentas tropicales, y el bajo índice de valores indican un océano más fresco y menos actividad de tormentas tropicales.

Wolter y Timlin (1993) mencionan al MEI (**Multivariate Enso Index**) como un índice que representa el promedio de las características ocurridas durante el fenómeno del **ENSO**, indicando como un promedio ponderado de la combinación de seis variables océano-atmosféricas (presión atmosférica, componentes del viento de Este-Oeste y Norte-Sur, temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire y nubosidad total), el cual por su estructura multivariada puede explicar mejor la variabilidad climática de un lugar.

Méndez *et al.* (2009) realizaron una investigación sobre las teleconexiones espaciales y temporales del **MEI** a las anomalías precipitación y temperaturas máximas y mínimas en México, mostrando teleconectividad importante durante el mes de diciembre, enero y febrero en regiones áridas y semiáridas del

noreste de México, concluyendo que el MEI tiene una marcada influencia en el clima del país a escalas regionales y consistentes.

Mantua *et al.* (1997) muestran el índice de la **Oscilación Decadal del Pacífico** derivado de un análisis de componentes principales de anomalías de temperatura **superficial** del mar en el océano Pacífico norteño, 20 latitud norte. Este es uno de los índices de variabilidad climática del ENOS, los efectos climáticos primarios de la PDO se concentran en el Pacífico Norte y los efectos secundarios en las zonas tropicales.

Cuadro 1. Algunos índices océano atmosféricos del sistema climático.

Índice	Denominación	Descripción	Localización
AAO	Oscilación antártica	Unidades arbitrarias basadas en anomalías de 700 mb alturas	Anillo antártico
AO	Oscilación ártica	Unidades arbitrarias basadas en anomalías de 1000 mb alturas	Anillo ártico desde 20N
GL	Temperatura global superficial del mar	Anomalía del promedio de la TSM (temperatura superficial del mar)	30S a 60N
NAf	Atlántico norteño	Anomalía del promedio de la TSM	35N a 70N, 75W a 10W
NAO	Oscilación del Atlántico norteño	PNM (presión al nivel del mar); diferencia de Azores (o Gibraltar) e Islandia	38.5N, 28.7W a 64.1N, 21.9W
NINO34	Pacífico Tropical central oriental	Anomalía del promedio de la TSM; hay otros índices similares de áreas adyacentes del mar.	5N a 5S, 170W a 120W
NP	Pacífico norteño	Anomalía del promedio de la TSM	5N a 5S, 150E a 120W
SOI	Oscilación sureña	PNM diferencia de Tahití y Darwin	12.4S, 130.9E a 17.5S, 14.6W
Sun	Manchas Solares	Manchas solares	Solares
TNA	Atlántico tropical norteño	Anomalía del promedio de la TSM	5.5N a 23.5N, 15W a 57.5W
TSA	Atlántico tropical	Anomalía del promedio de la TSM	Ecuador a 20S, 10E a 30W
WP	Pacífico occidental (Warm Pool: "poza cálida")	Anomalía del promedio de la TSM	5N a 5S, 120E a 170E

Fuente: Giddings y Soto (2006).

3.5. Estudios de la Oscilación Decadal del Pacífico en el mundo.

Las teleconexiones son asociaciones estadísticas de fenómenos climatológicos separados por grandes distancias, éstas son una consecuencia de dinámicas a gran escala del océano y la atmosfera vinculadas a diferentes climas regionales dentro de un sistema climático global (Leathers y Yarnal, 1991).

La Oscilación Decadal del Pacífico es un periodo largo de fluctuación de temperaturas superficiales del mar en el Océano Pacífico que fue descubierta en 1996 por el oceanógrafo Steven Hare, en registros de temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico, el índice de la PDO se define como la primera componente principal de la variabilidad mensual de la temperatura superficial del mar (TSM), la presión atmosférica a nivel del mar y el viento superficial del Pacífico Norte (Mantua *et al.*, 1997).

Giddings y Soto (2006) realizaron un trabajo de las teleconexiones que existen entre la precipitación de América del Sur y una variedad de índices utilizados por climatólogos y meteorólogos para estudiar el tiempo utilizando la función @PEARSON, de Quattro Pro 12, y mediante técnicas de interpolación para toda la imagen del continente. Cada red fue convertida en una imagen de contornos por el mismo programa, como resultado se observaron algunas relaciones interesantes de fenómenos globales con relación a El Niño y, lógicamente, menos relaciones con índices que se ubican lejos del continente.

Mccabe y Dettinger (2002) con la finalidad de comprender los factores climáticos que influyen en la variabilidad de abastecimiento de agua por medio

de la nieve en el oeste de los Estados Unidos, realizaron un análisis de componentes principales usando variables climáticas, en sus resultados encontraron que las principales modas de variabilidad de los Estados Unidos son la Oscilación Decenal del Pacífico (DOP) y el Niño-3, temperaturas de la superficie del mar y que éstos componentes representan el 61% del total de la variabilidad de la nieve que se presenta en el oeste de Estados Unidos.

Cambios importantes en los ecosistemas marinos del Pacífico nororiental se han correlacionado con la PDO (Francis *et al.*, 1998). Por ejemplo, las fases cálidas altas de la PDO han favorecido la producción de salmón en Alaska, pero disminuye la producción de salmón de la costa oeste de California, Oregon y Washington. Por otro lado, en la fase fría de la PDO decrece la producción de salmón en Alaska y relativamente incrementa la producción de salmón de California, Oregon y Washington (Hare y Francis, 1994).

3.6. Estudios de la Oscilación Décadal del Pacífico en México

Englehart y Douglas (2002) estudiaron la variabilidad interanual de la lluvia en México por medio de un análisis de componentes principales basándose en datos históricos de la lluvia de 130 estaciones meteorológicas (1927-1997), evaluaron la teleconectividad entre las series de lluvia regionales y varios índices de la variabilidad oceanográfica y atmosférica de gran escala como El Niño- Oscilación del Sur, diferentes índices que describen la posición en intensidad del cinturón subtropical de altas presiones, así como valores locales de la temperatura del agua de la superficie del mar en el océano pacífico

oriental y Golfo de México, también consideraron la PDO y no encontraron evidencias de un comportamiento no lineal en las teleconexiones dentro de la fase de la PDO, sólo que éstas tienden a ser más fuertes y extensas durante la fase positiva de la PDO.

Brito y Leyva (2002) realizaron un estudio acerca de la variabilidad de los volúmenes mensuales de entrada a las presas (MIV), localizadas en los ríos de la vertiente continental de Golfo de California, utilizaron un análisis de funciones empíricas ortogonales con rotación Varimax a las series de MIV. Para este análisis usaron datos de series mensuales del índice de la PDO (1900-1999), de lluvia (1921-1999) y de MIV, como resultado encontraron una relación entre las lluvias de invierno y la PDO y sugieren que durante la década siguiente los inviernos podrían continuar siendo secos y los MIV permanecer por debajo de lo normal.

Díaz *et al.* (2008) con el objetivo de tener un mejor conocimiento de la variabilidad interanual de los ciclones tropicales en la región semiárida del noroeste mexicano y su relación con fenómenos océano-atmosféricos y su ocurrencia interdecadal, realizaron técnicas de interpolación y análisis de funciones empíricas ortogonales con datos de lluvia de 534 estaciones meteorológicas, los resultados más importantes fueron una influencia del Índice de la Oscilación del Sur más fuerte en la parte norte de la región estudiada, mientras que la parte sur tiene una influencia más pronunciada a la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción físico-climática del área de estudio

El estudio se desarrolló para toda la República Mexicana que se encuentra ubicada totalmente en el hemisferio Norte, la extensión territorial de México, es de 1, 964, 375 Km² de los cuales 5, 127 Km² corresponden a superficie insular. Las coordenadas extremas que enmarcan al territorio mexicano son: al sur 14° 32' 27'' latitud norte, en la desembocadura del río Suchiate, frontera con Guatemala, al Norte 32° 43' 06'' latitud norte, en el Monumento 206, en la frontera con los Estados Unidos de América, al Este 86° 42' 36'' longitud oeste, en el extremo sureste de la Isla Mujeres y al Oeste 118°22' 00'' longitud oeste, en la Roca Elefante de la Isla de Guadalupe, en el Océano Pacífico (INEGI, 2009).

En cuanto al clima, un factor que influye es la asimetría que caracteriza las dos vertientes de México, siendo la de Atlántico, por regla general, más húmeda que la del Pacífico, esto se debe, en gran medida a los vientos, dominantes (alisios) y es parte de un notable gradiente de aumento de aridez que afecta a todo el país en dirección sureste-noroeste. En México predominan los climas secos sobre los húmedos y al parecer las superficies del país donde la generalidad de las plantas disponen de agua durante o casi todo el año no ocupan más del 15% de su territorio (Rzedowski, 2006).

La precipitación de México presenta contrastes ya que la media anual promedia 777 mm, variando desde 100 mm en el Noroeste y Noreste, hasta más de 4000 mm en el Sureste y costa Sur del Pacífico (INEGI, 1994). Las temperaturas que se presentan en el país pueden variar regionalmente al igual que la precipitación, las medias anuales se encuentran entre valores por encima de los 32°C hasta menores de 10°C sin embargo, en el 93% del país las temperaturas de superficie promedio se encuentran en el rango de 10°C y 26°C (Magaña *et al.*, 1999).

4.2. Fuente de datos

Se utilizó información de 550 estaciones climatológicas distribuidas en todo el país, cubriendo espacios geográficos razonables. Los datos analizados son supervisados por la Comisión Nacional del Agua (CNA) y proporcionados para este estudio por el Servicio Meteorológico Nacional Mexicano (SMN), variando desde 1950-2008. La información corresponde a registros diarios de precipitación y temperatura, registrada en cada estación climatológica (Figura 1).

Para la selección de estaciones analizadas se consideraron los siguientes criterios: que tuvieran más del 80% de la información, así como una longitud de registro de al menos 50 años, algunas con menores registros para cubrir espacios geográficos del área de estudio, consistencia anual e interanual y la homogeneidad de las series.

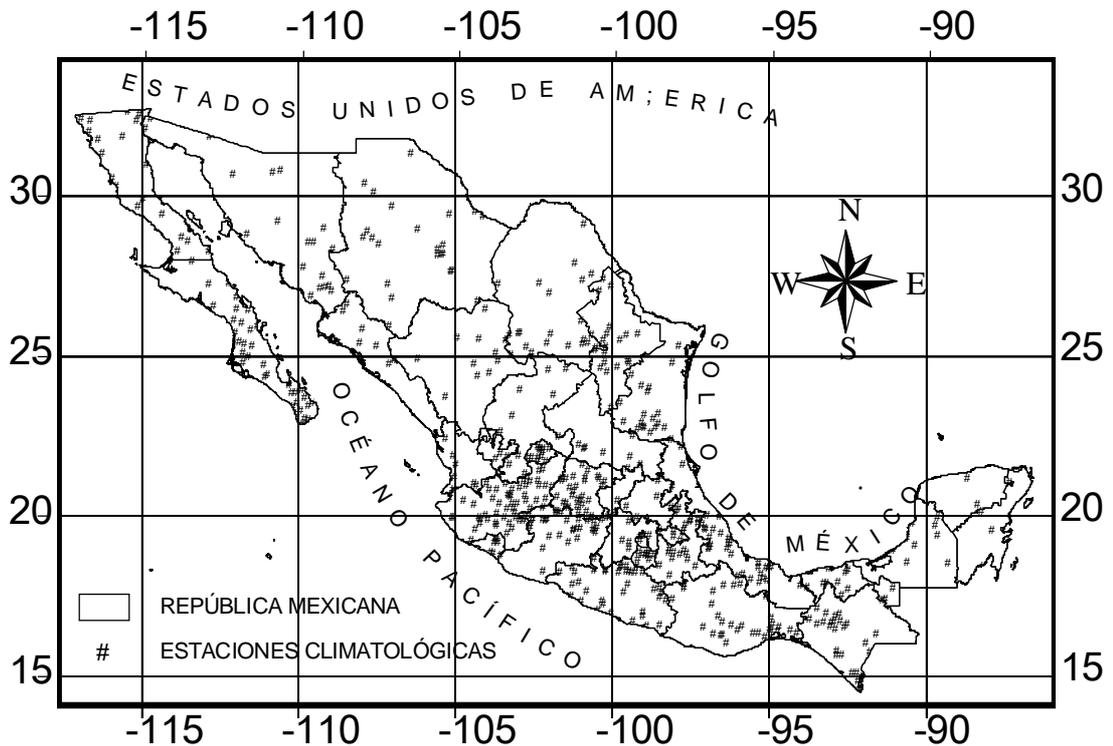


Figura 1. Distribución geográfica de las estaciones climatológicas utilizadas en este estudio.

4.3. Procedimientos y análisis estadísticos

El conjunto de datos de precipitación y temperatura, se ordenaron por medio de una macro realizada en Excel, posteriormente mediante el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System) Versión 9.0 se realizaron análisis de homogeneidad de cada una de las series. Los datos de precipitación y temperaturas máximas y mínimas fueron estandarizados en SAS, usando su media y desviación estándar mensual. Las teleconexiones de la PDO sobre los datos mensuales estandarizados de precipitación y temperaturas, fueron evaluadas mediante análisis de correlación de Spearman “r”, donde $-1 \leq r \leq 1$;

llevados a cabo a escalas mensuales a un nivel de confianza del 90%, realizando retardos de correlación (lags) desde 1 hasta 5 años (A1,..., A5), para identificar la influencia interanual (temporal) de la PDO sobre el clima en México considerando su persistencia hasta cerca de 20 años según se ha indicado por Manthua *et al.* (1997). Mediante la correlación de Pearson se verificó la existencia de la teleconectividad ya encontrada en una muestra aleatoria del 10%. Este tipo de estudios realizando análisis de correlación en estudios climatológicos han sido realizados por Cayan y Peterson (1989); Cavazos y Hastenrath (1990); Jones y Trewin (2000); Méndez *et al* (2009).

Los datos de la PDO se proporcionan en forma estandarizada mensual, iniciando desde enero a diciembre y vienen desde 1900 hasta la fecha, se encuentran disponibles en: <http://www.atmos.washington.edu/~mantua/abst.PDO.html>, donde se puede percibir que valores positivos de la PDO corresponden a fase cálida, mientras que valores negativos indican la fase fría (Figura 2). Así mismo, los resultados históricos indican una fase cálida desde aproximadamente 1900 hasta 1940 y de 1975 a 1995, mientras que de 1945 a 1975 se percibe la existencia de un periodo negativo (fase fría).

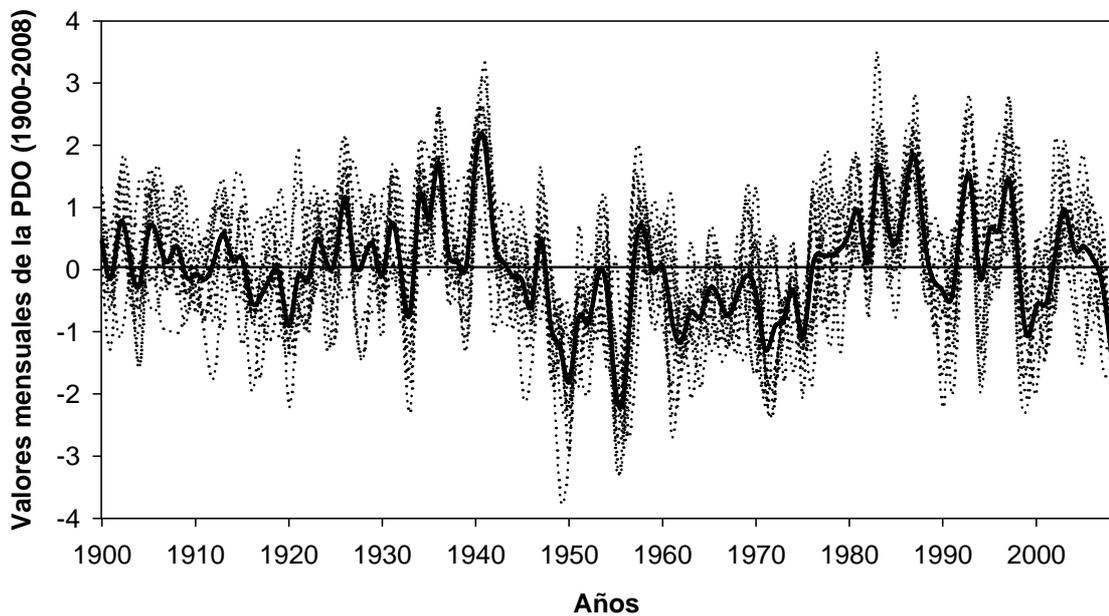


Figura 2. Comportamiento promedio del índice de la PDO (línea gruesa) y patrones mensuales (líneas discontinuas) desde 1900-2008.

En este estudio, una correlación positiva indica que si el índice de la PDO se incrementa, la precipitación, se incrementa también y si la PDO disminuye, la variable en cuestión también lo hace. Contrariamente, una correlación negativa indica que cuando el PDO se incrementa, la variable disminuye y viceversa. Lo anterior es también aplicable a temperatura.

Los patrones geográficos de las teleconexiones del PDO a precipitación y a temperaturas máximas y mínimas, se obtuvieron realizando interpolaciones de "r" mediante un sistema de información geográfica (Arc View 3.2), utilizando el método de IDW (Inverse Distance Weighted) conservando el valor y signo del

coeficiente y asignando "0" (cero) a estaciones con $p \geq 0.10$. De tal manera que se generaron mapas del territorio mexicano que muestran los patrones geográficos de las teleconexiones, así como aquellas donde no se registran.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Teleconectividad temporal de la PDO a la precipitación

Los resultados del análisis de la PDO y su relación a la precipitación mensual, evaluado mediante la correlación de Spearman “r”, muestran una importante teleconectividad especialmente durante A0 (año actual), con un 19% en promedio del total de las estaciones evaluadas, incluyendo el porcentaje de correlación significativa (+ y -) (Figura 2), muy por encima de los siguientes años que sólo alcanzan un 13% en promedio.

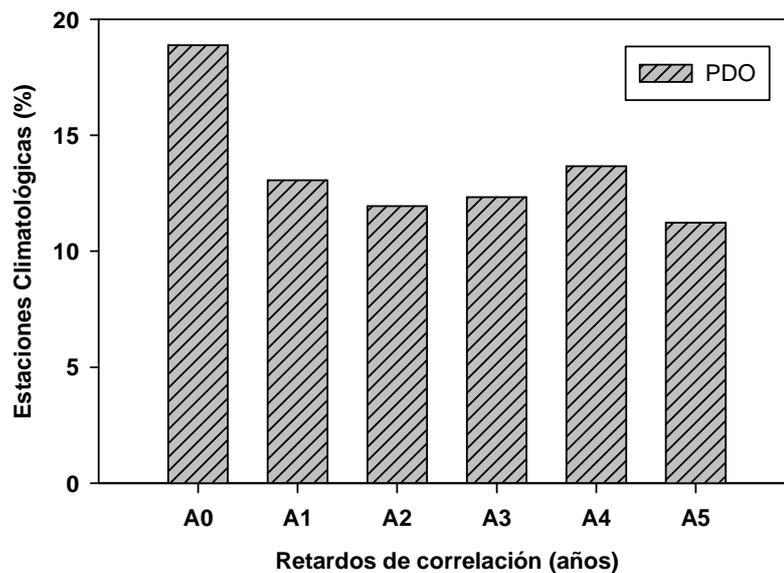


Figura 3. Porcentaje de estaciones con correlación significativa (+ y -) $p \leq 0.10$ desde el año 0 - 5 (escala anual) entre la PDO y la precipitación en México.

De acuerdo a los resultados obtenidos, en el año actual (A0), es donde se presenta la mayor teleconectividad de la PDO a la precipitación. De ese 19% de estaciones significativas ($p \leq 0.10$), los meses de noviembre, enero y diciembre representan un 41.8, 27.6 y 22.3%, respectivamente, del total de estaciones analizadas (Figura 3). Por otro lado, los meses donde se registró la menor teleconectividad fueron octubre, julio y junio con 9.3, 9.5 y 12.4%, respectivamente. Cabe mencionar que aquí se incluye la correlación significativa, ya sea positiva o negativa.

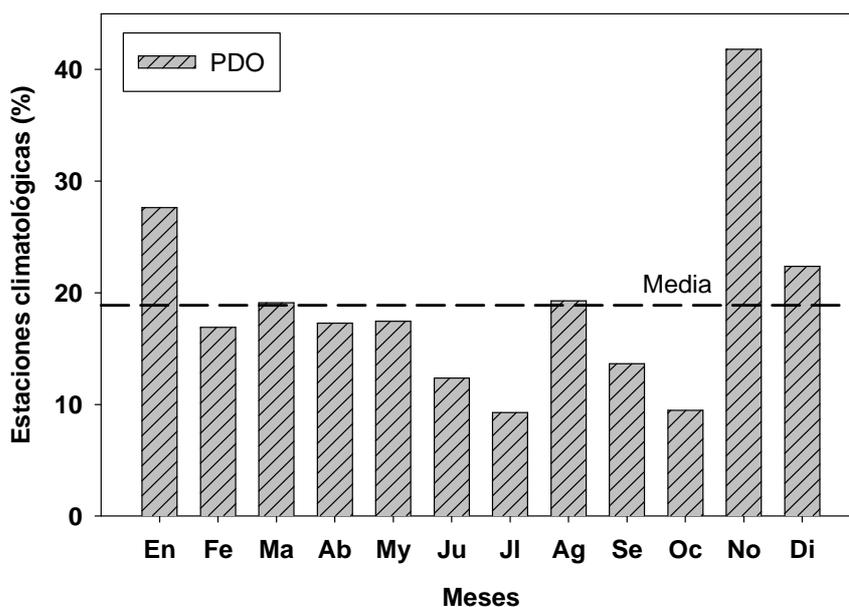


Figura 4. Porcentaje de estaciones con correlación significativa (+ y -) de A0 entre la PDO y la precipitación en México.

En el porcentaje de estaciones significativas ($p < 0.10$), entre la PDO y la precipitación mensual durante el primer año (A0) indicaron que para los meses de noviembre, enero y diciembre fueron positivas en su gran mayoría.

En el mes de noviembre del 41.8% de correlación significativa total, 97.2% fue positiva y sólo el 2.8% negativa. En enero fue de 27.6%, del total de estaciones significativas el 87.5% fue positiva y sólo 12.5% negativa. Diciembre con 22.3% se reparte con 78.0% positiva y el 22.0% negativa (Figura 5). Al observar a los meses restantes podemos decir que en el periodo de abril a octubre se presentan correlaciones principalmente negativas y por lo tanto la precipitación podría disminuir al cambiar la PDO de la fase fría a cálida (Figura 5).

El registro de lluvia durante los meses ya indicados en donde se presentan las teleconexiones parecen estar asociadas a la fase negativa de la PDO; es decir, la teleconectividad se presenta de la siguiente manera: cuando el índice del PDO disminuye (fase fría) se registra un superavit en precipitación en México. Esto se puede corroborar de acuerdo al índice de la PDO que muestra una patrón negativo promedio (1950-2008) línea punteada (Figura 5) en los meses donde se encontró teleconectividad (noviembre, diciembre y enero) y los datos evaluados varían desde el desde el año 1950 hasta el 2008 en promedio.

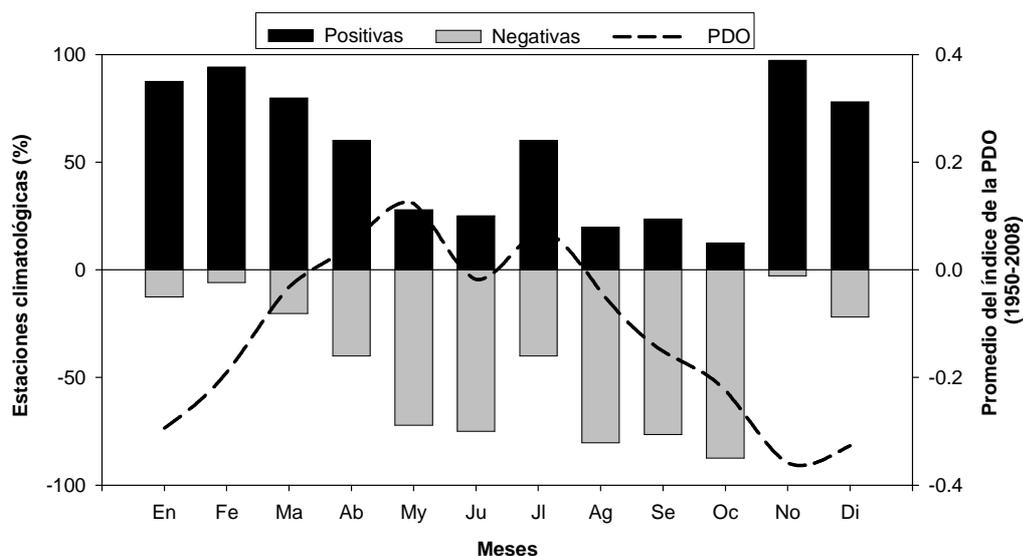


Figura 5. Porcentaje de estaciones con "r" significativa ($p < 0.10$) durante A0 (escalas mensuales) y promedio del índice de la PDO desde 1950-2008 (eje derecho).

5.2. Distribución geográfica de las teleconexiones PDO-Precipitación

Los resultados de las teleconexiones más importantes encontradas en este estudio (noviembre, enero y diciembre), parecen estar asociadas a la fase negativa de la PDO mostrando mayoritariamente correlaciones positivas, registrándose de una forma consistente espacialmente y a escala regional, distribuyéndose geográficamente sobre el noreste del territorio mexicano (Figuras 6a, 7a y 8a).

En el mes de noviembre, la influencia de la PDO a la precipitación en México se puede observar una zona que va desde el estado de Chihuahua, Coahuila,

hasta Durango, Zacatecas, Jalisco y Nayarit hasta conectar con el Océano Pacífico (figura 6a), indicando que la PDO explica en promedio más del 10% de la precipitación sobre estas regiones, incluso hasta cerca del 25% en algunas regiones muy particulares (Figura 6b).

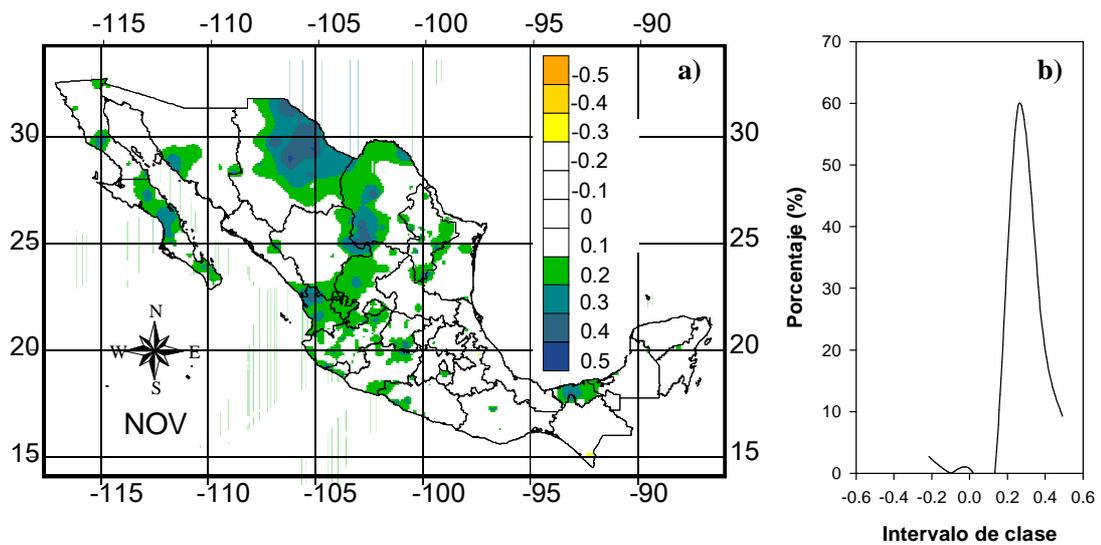


Figura 6. a) Patrones geográficos de correlación de la PDO y precipitación en México durante A0 (escala mensual), y b) Histograma de frecuencias del coeficiente de correlación “r”.

En cuanto al mes de enero se nota muy marcado el registro de precipitación en una región que abarca los estados de Nuevo León, Coahuila, Durango y Zacatecas, cabe mencionar que prácticamente todo el estado de Nuevo León está influenciado por la PDO. Similarmente los resultados indican que la PDO puede explicar en promedio más del 10% de la PP en esa región (Figura 7a).

Resultados similares de la influencia de la PDO en esta región a la lluvia invernal con coeficientes de r cercanos a 0.27 han sido reportados por Mantua *et al.* (1997), en concreto, examinan los registros de la temperatura superficial del océano en la parte tropical y extratropical del hemisferio norte y la presión del nivel del mar, la temperatura del aire y la precipitación en la superficie terrestre de Norte América en época de invierno.

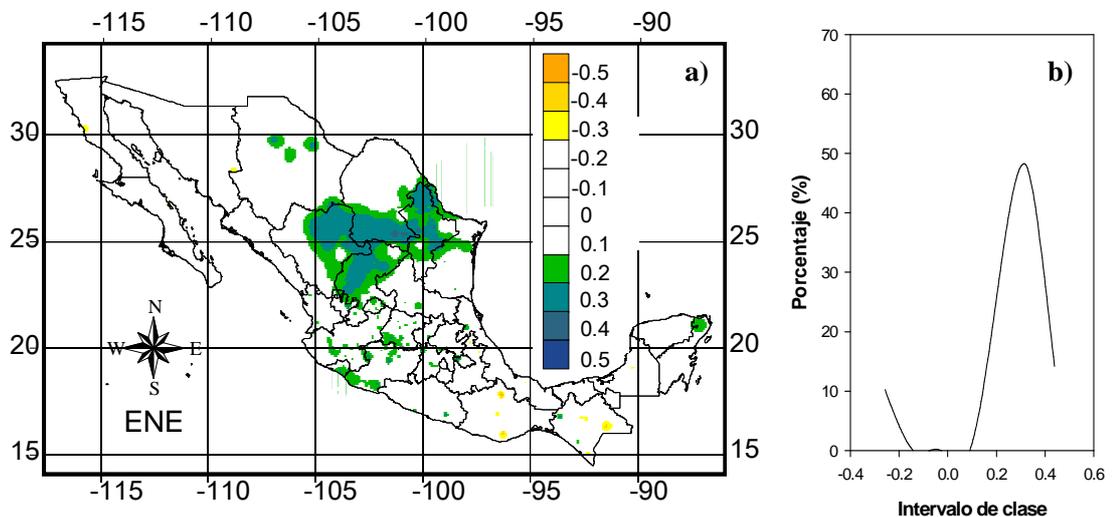


Figura 7. a) Patrones geográficos de correlación entre la PDO y precipitación en México durante A0 (escala mensual), y b) Histograma de frecuencias del coeficiente de correlación “r”.

En el mes de diciembre se observan teleconexiones ubicadas geográficamente abarcando casi la mitad del estado de Coahuila y una buena parte del norte de Nuevo León, lo que nos indica que en los meses ya citados anteriormente, parte de la precipitación en estos estados esta asociada en gran parte a la PDO (Figura 8a). Nuevamente más del 60% de estas estaciones presentan

coeficientes de correlación del orden de 0.3 (Figura 8b), explicando más del 10% de la precipitación.

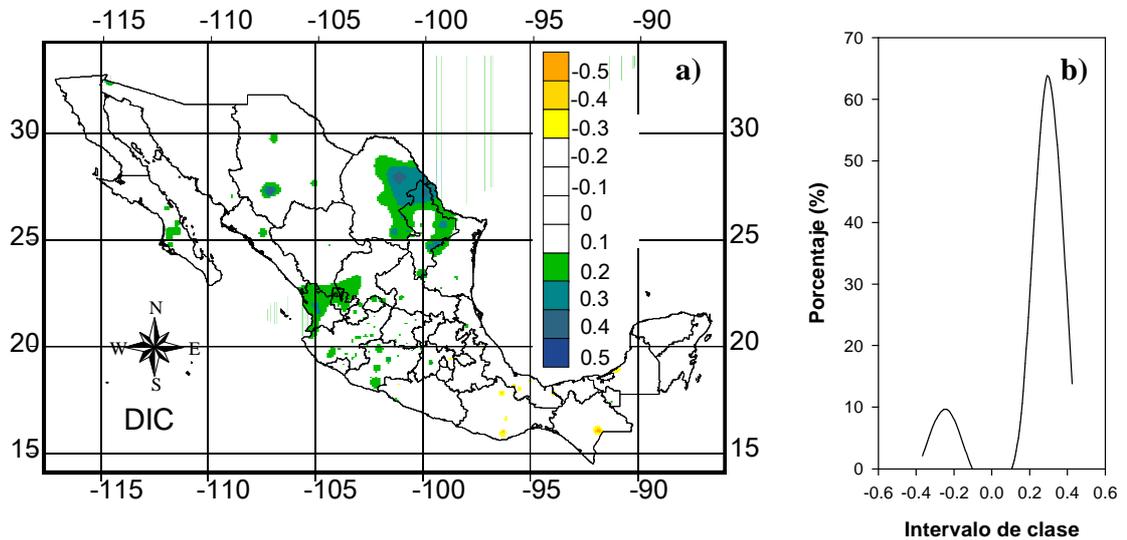


Figura 8. a) Patrones geográficos de correlación entre la PDO y precipitación en México durante A0, (escala mensual), y a). Histograma de frecuencias del coeficiente de correlación “r”.

Mantua *et al.* (1997) muestran las anomalías climáticas de América del norte asociadas con PDO, para México se observa una influencia de la PDO en el noreste abarcando una franja desde Coahuila y Nuevo León hasta Colima. Esta misma tendencia aparece en el mes de noviembre en el presente estudio confirmándose la consistencia espacial y regional de las teleconexiones encontradas.

Al igual que en este estudio, Brito y Leyva (2002) analizaron series mensuales de precipitación y revelaron una relación entre la lluvia de invierno y la PDO en la vertiente continental del Golfo de California, similarmente a lo que se

presenta en la precipitación los meses de noviembre, diciembre y enero influenciados principalmente por la PDO.

Es posible que el incremento de precipitación en el norte de México indicado por el IPCC (2008) y Méndez *et al*, (2008) sea debido a los diversos índices climáticos como el ENSO, MEI y PDO ya que los patrones climáticos encontrados en este estudio son similares.

5.3. Teleconectividad temporal de la PDO a temperaturas máximas y mínimas

La relación entre la PDO y la temperatura máxima en México muestra teleconectividad importante desde A0 a A5 (años), encontrándose una relación más significativa durante A0 (año actual) con un 29.1% en promedio y 23.27% en A4, de las 550 estaciones climatológicas evaluadas, se incluye el porcentaje de correlación significativa (+ y -) (Figura 9a).

Mientras que para temperaturas mínimas se encontraron teleconexiones a la PDO, en todos los años (A0-A5) que van desde 23.8 en A3 hasta 27.8% en A0 del total de las estaciones analizadas, sin embargo, al igual que en las temperaturas máximas y precipitación la teleconexión más fuerte se presenta en el año actual (A0) incluyendo la correlación significativa ya sea positiva y negativa (Figura 9b).

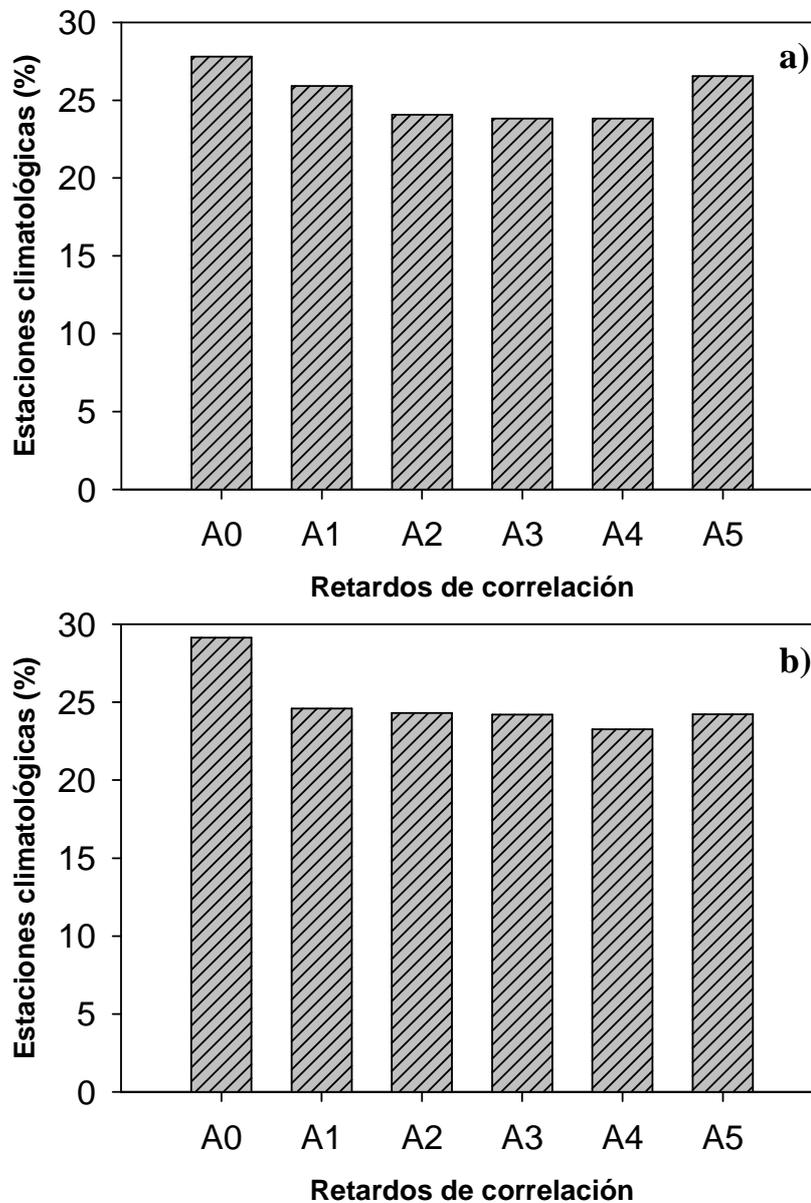
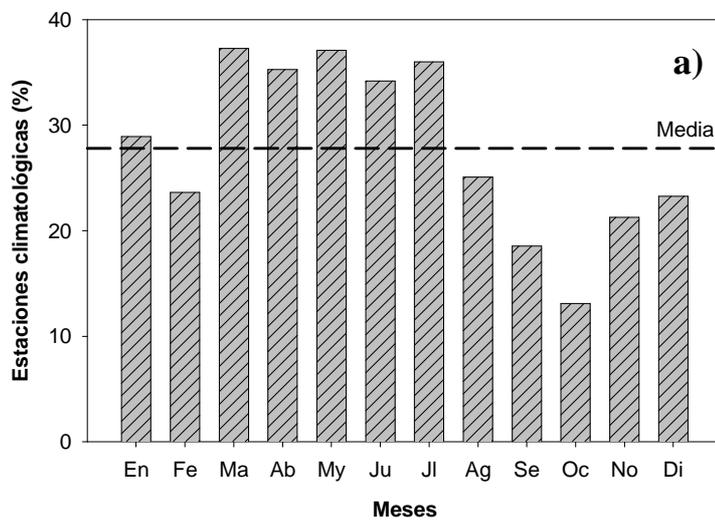


Figura 9. a) Porcentaje de correlación significativa (+ y -) $p \leq 0.10$ desde el año 0 - 5 (escala anual) entre la PDO y la temperatura máxima en México, y b) Lo mismo pero para temperatura mínima.

De la mayor teleconectividad encontrada entre la PDO a las temperaturas máximas durante el año actual A0 ($p \leq 0.10$), los meses de enero, marzo y

mayo representan un 37.6, 36.7 y 32.5%, respectivamente, de las 550 estaciones analizadas (Figura 10a). Sin embargo, en los meses de febrero, junio y julio también se registra teleconectividad importante con 30.4, 30.2 y 29.8% respectivamente, incluyéndose la correlación positiva y negativa. Por otro lado, en las temperaturas mínimas durante A0, se encontró que las teleconexiones se presentan principalmente desde marzo a julio, oscilando alrededor de 36% del total de las estaciones analizadas (Figura 10b). Una situación opuesta se observa en los meses de septiembre, octubre y noviembre (otoño) que presentan menos del 20% de correlación significativa tanto en temperatura máxima como mínima. Al igual que en A0 como se ha indicado anteriormente aquí se incluye la correlación significativa positiva y negativa.



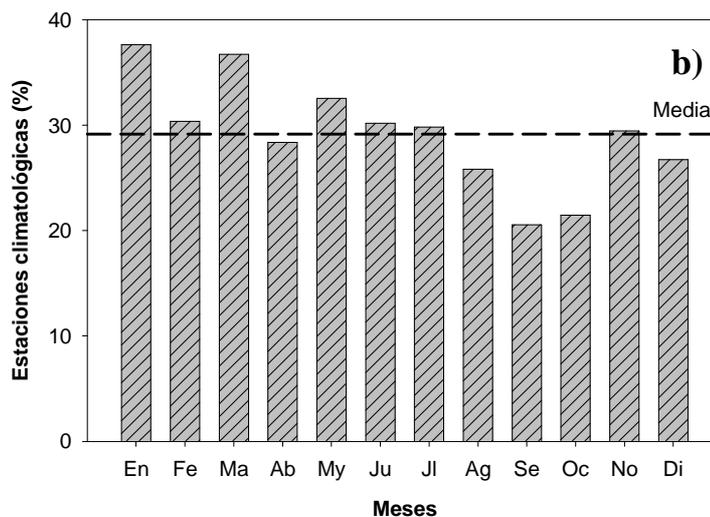


Figura 10. Porcentaje de correlación significativa (+ y -) del año Z0 entre el PDO y la temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha) en México.

El registro de temperaturas máximas durante los meses de enero, marzo y mayo parecen estar asociadas principalmente a la fase negativa (fría) de la PDO, según se indica por el promedio de la PDO con signo negativo (línea punteada), (Figura 11). La teleconectividad se presenta de la siguiente manera: cuando el índice del PDO disminuye (fase fría), las temperaturas máximas en México aumentan y viceversa aunque, en el porcentaje de estaciones significativas ($p < 0.10$), entre el PDO y los valores estandarizados de temperaturas máximas mensuales durante el primer año (A0) indicaron que para los meses de enero, marzo y mayo fueron negativas en su gran mayoría con 82.1, 76.2 y 36.9%, respectivamente, mientras que las correlaciones positivas representaron 17.9, 23.8 y 63.1%, respectivamente, de un total de 37.6, 36.7 y 32.5% (Figura 11).

Las temperaturas mínimas analizadas presentaron correlación significativa a la PDO especialmente durante primavera (negativa) y verano (positiva) representando alrededor del 35% del total de estaciones evaluadas de ese mes (Figura 12). Sin embargo, correlaciones negativas predominantes del orden de 60% y positiva de hasta 80% del total de estaciones se registran respectivamente durante primavera y verano.

De acuerdo al promedio del índice de la PDO (1950-2008) el comportamiento de las temperaturas mínimas de marzo a mayo en México indica estar asociado a la fase negativa de la PDO (Figura 12). Debido a que se encontró correlación positiva y negativa las teleconexiones se presentan de la siguiente manera: cuando los valores de la PDO se incrementan, las temperaturas mínimas en México disminuyen (marzo, abril y mayo), caso contrario ocurre en junio y julio cuando los valores de la PDO incrementan las temperaturas mínimas también lo hacen.

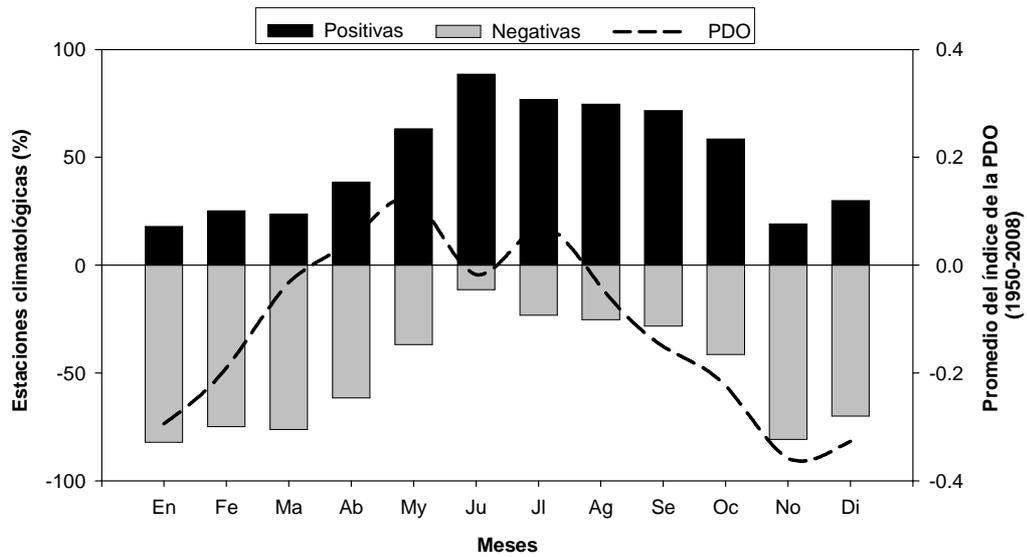


Figura 11. Porcentaje de estaciones con "r" significativa ($p < 0.10$) entre la PDO y temperaturas máximas en México durante A0 (escalas mensuales).

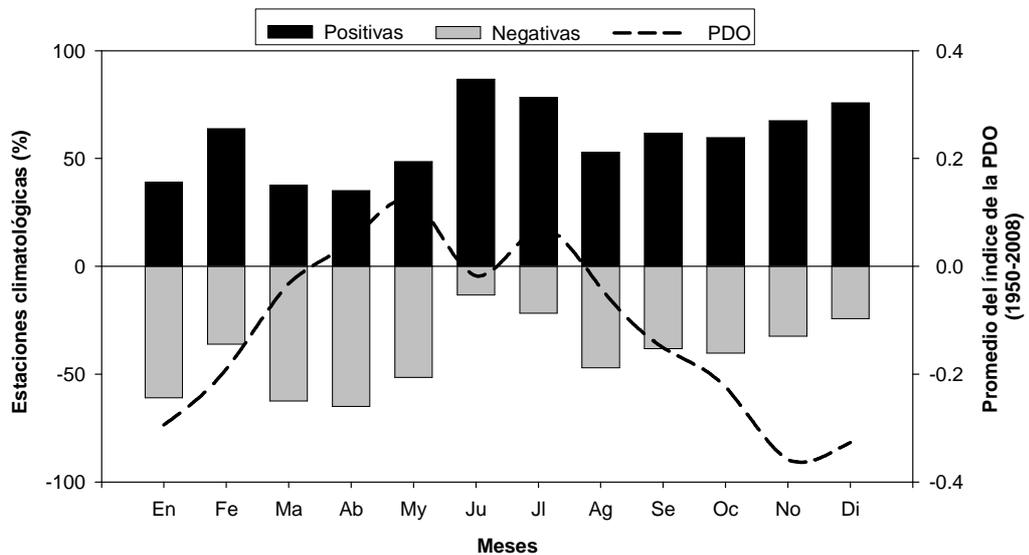


Figura 12. Porcentaje de estaciones con "r" significativa ($p < 0.1$) entre la PDO y temperaturas mínimas en México durante A0 (escalas mensuales).

5.4. Distribución geográfica de las teleconexiones PDO-temperaturas máximas

Los patrones de correlación de la PDO a temperatura máxima se registran de una forma consistente espacialmente y a escala regional, distribuyéndose sobre el noreste y noroeste del territorio mexicano (Figura 13).

De abril a octubre las teleconexiones de la PDO a temperaturas máximas disminuyen (Figura 13), prevaleciendo correlaciones positivas principalmente (Figura 11), y distribuyéndose geográficamente muy dispersas (escala local) a lo largo del país especialmente sobre el este del territorio mexicano.

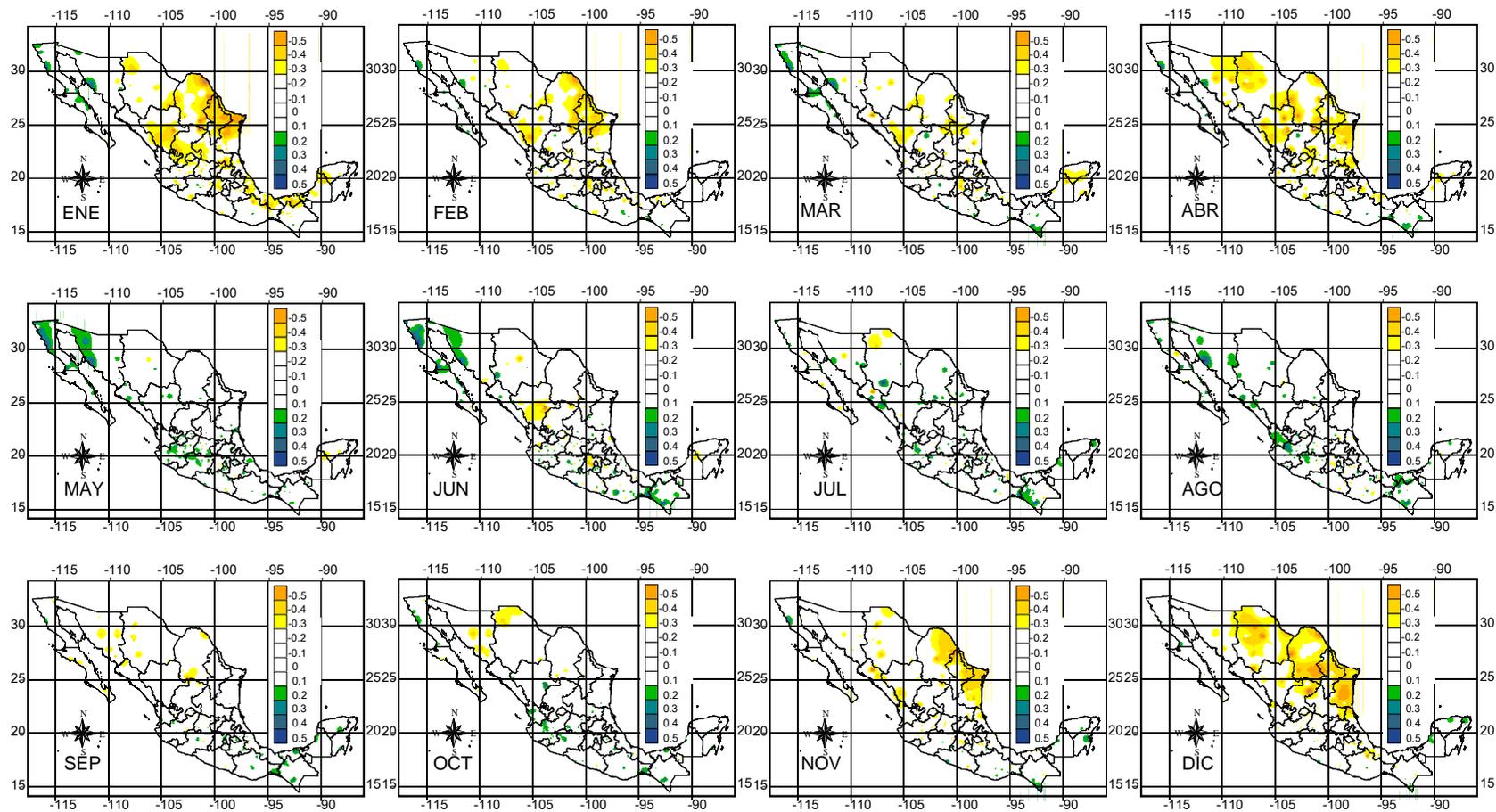


Figura 13. Patrones geográficos de correlación entre la PDO y temperatura máxima en México durante A0, (escala mensual).

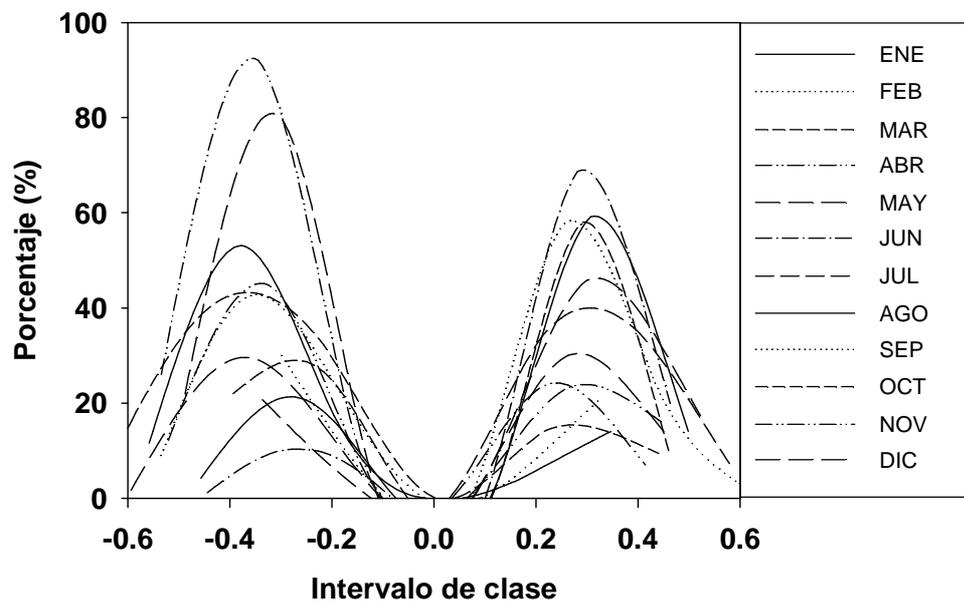


Figura 14. Histograma de frecuencias del coeficiente de correlación de r de todos los meses del año (temperatura máxima).

De acuerdo a los resultados obtenidos, la PDO puede explicar más del 20% de la variabilidad de temperatura máxima especialmente en el noreste y noroeste de México donde se presentan las mayores teleconexiones.

5.5. Distribución geográfica de las teleconexiones PDO-temperaturas mínimas

Según se ha indicado, la correlación positiva y negativa de la PDO a temperaturas mínimas en México se reparten similarmente (Figura12), los meses donde no se perciben visualmente son octubre y diciembre (Figura15).

En términos generales la disminución de temperatura mínima a consecuencia de la PDO se ubica en el noroeste de México, similar a temperatura máxima,

mientras que el incremento de temperatura se observa en forma local en el centro y sur de México especialmente durante el verano (Figura15). Los resultados de este estudio indican que parte de las altas temperaturas durante el verano en el centro y sur de México están gobernadas por la Oscilación Decadal del Pacífico, la cual registra principalmente fases cálidas (positivas).

Los resultados indican que en este periodo la PDO puede explicar desde un 10 hasta cerca del 25% de la variación de temperatura mínima en México (Figura 16). En términos generales las correlaciones se reparten similarmente en + y -, aunque a nivel mes estos patrones difieren pudiendo ser positiva principalmente como por ejemplo durante junio y julio.

Cavazos y Hastenrat (1990); Méndez et al. (2009) usando el SOI y el MEI respectivamente encuentran patrones espaciales y temporales en precipitación y temperaturas similares a los observados en este estudio.

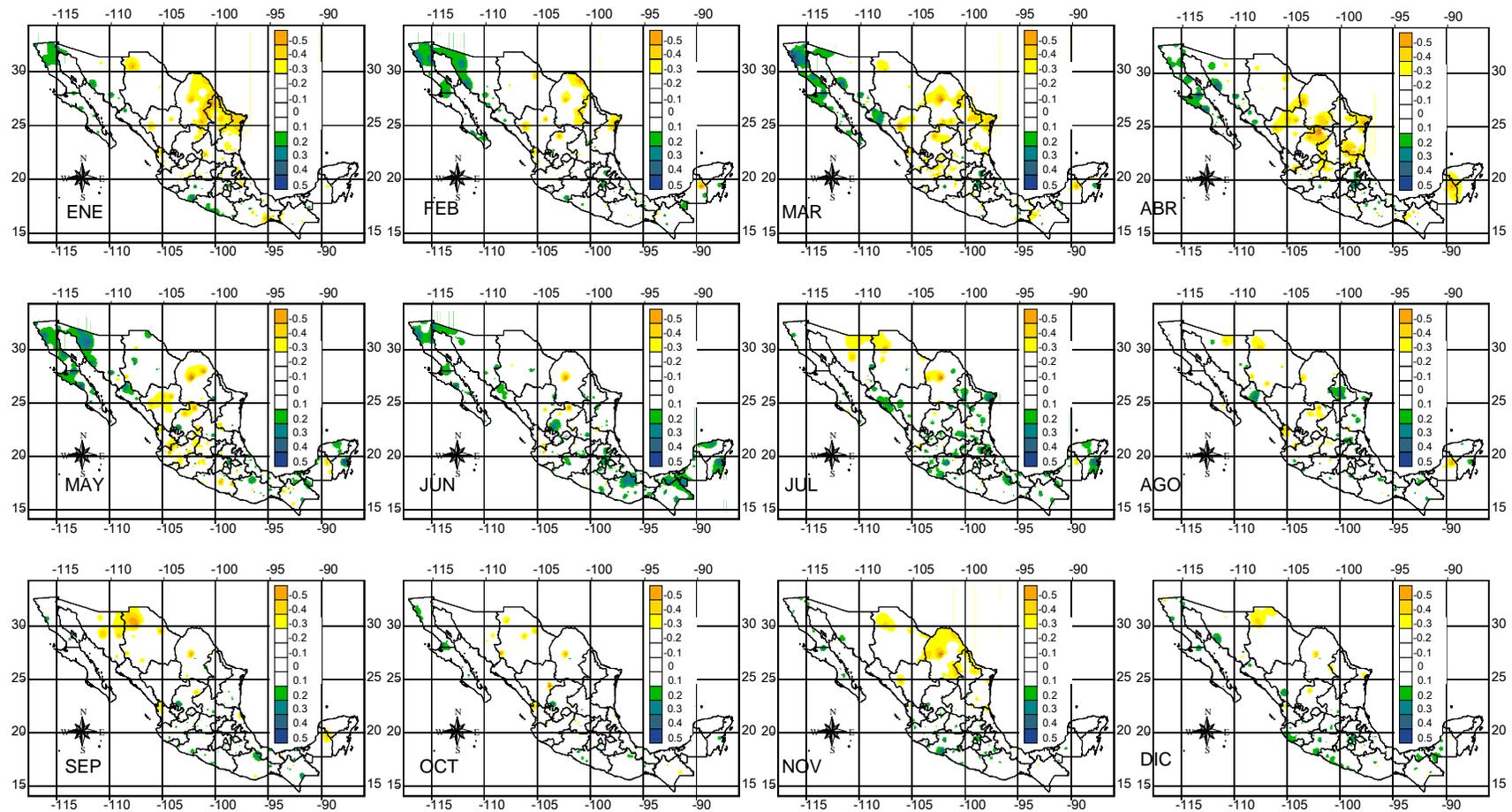


Figura 15. Patrones geográficos de correlación entre la PDO y temperatura mínima en México durante A0, (escala mensual).

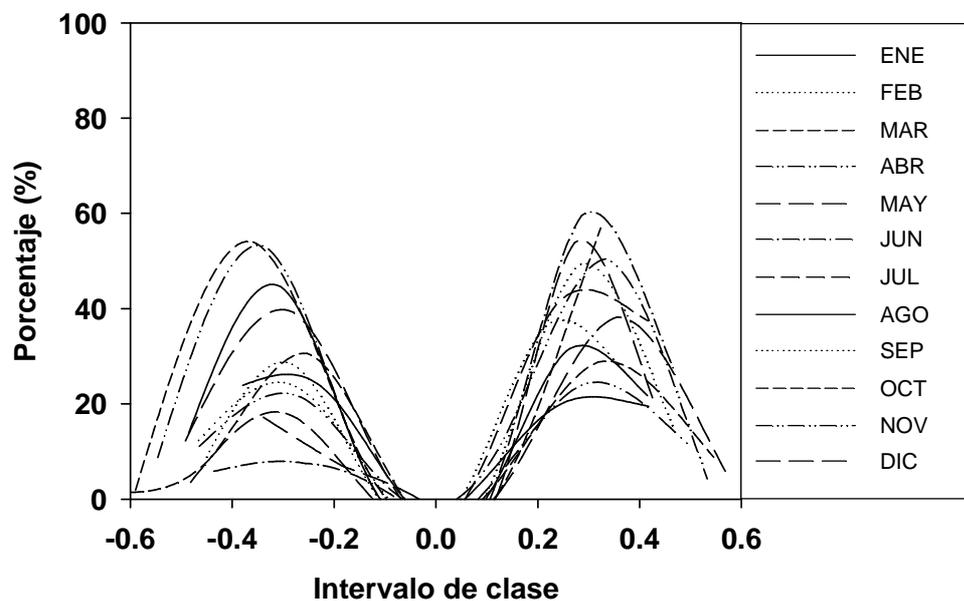


Figura 16. Histograma de frecuencias del coeficiente de correlación de r de todos los meses del año.

5.6. Correlación paramétrica vs no paramétrica

Del total de las estaciones analizadas se obtuvo una muestra aleatoria del 15% (n=85) misma que fue analizada mediante correlación paramétrica y poder comparar y confirmar las teleconexiones evaluadas mediante correlación no paramétrica. Los resultados indican que de esa muestra el 70% de las estaciones coinciden en cuanto a la significancia (no significancia) estadística. De ellas el 100 % concuerda en el signo de la correlación. En el caso de la magnitud de "r" la correlación no paramétrica indica medias más altas aunque estadísticamente no son significativas y geográficamente se encuentran distribuidas en la misma zona.

6. CONCLUSIONES

Este estudio aporta información y evidencias importantes sobre como se ve afectado el territorio mexicano por la PDO, evaluado por medio del análisis de correlación no paramétrica (Spearman).

Se encontró que el territorio mexicano está influenciado por la Oscilación Decadal del Pacífico, principalmente, a la temperatura máxima y mínima representando el 29.1 y 27.8% del total de las estaciones climatológicas analizadas, mientras que a la precipitación se registra solo el 18.9% en promedio.

Los patrones geográficos de la correlación de la PDO a precipitación y temperatura (noreste de México) son similares en el aspecto geográfico, pero opuestas en cuanto a su registro. La precipitación aumenta durante la fase negativa de la PDO pero la temperatura disminuye en el mismo periodo, principalmente, durante la época fría del año (noviembre a marzo).

La PDO contribuye parcialmente al registro de precipitación, en regiones amplias del noreste de México (escalas regionales y consistentes) mostrando una correlación positiva a la precipitación, especialmente, durante el año actual, registrándose principalmente, en los meses de noviembre, marzo y mayo con un 26.1, 12.3 y 11.6%, respectivamente, del total de estaciones analizadas, la cual parece estar asociada a la fase fría de la PDO.

Se muestra una importante influencia de la PDO en la disminución de temperaturas máximas en regiones amplias del noreste de México, contrario a lo observado en precipitación, especialmente durante el año actual, registrándose principalmente en los meses de enero, marzo y noviembre con un 38, 37 y 29%, respectivamente, del total de estaciones analizadas, la cual parece estar asociada a la fase fría de la PDO.

En cuanto a las temperaturas mínimas se observan teleconexiones en el noreste de México, observándose disminución de temperaturas a escalas locales principalmente. En algunos meses la teleconectividad se presenta de forma muy aislada como octubre y diciembre, sin embargo, se encontró que el aumento de temperatura mínima en México durante parte del verano, registrada en el centro y sur de México esta asociada a la PDO.

En los patrones geográficos de la PDO a la precipitación en México encontrados en este estudio la PDO no parece influir en la presencia de sequías.

De acuerdo a lo anterior, se tienen suficientes elementos para aceptar la hipótesis planteada, donde se establece que existen teleconexiones de la Oscilación Décadal del Pacífico a la precipitación y temperatura en México. Así como a los patrones geográficos encontrados (similares en precipitación y temperatura) y más evidentes en las regiones más cercanas al origen del fenómeno.

Los resultados proporcionan información para poder hacer predicciones sobre el comportamiento del clima en México y estar preparados para los cambios e intensificación de fenómenos meteorológicos que vienen para los próximos años.

7. RECOMEDACIONES

Realizar más estudios sobre la variabilidad climática que afecta a la república mexicana con el fin de tener información que permita comprender el comportamiento del clima y estar preparados para los cambios que se pronostican en los próximos años.

Actualizar y observar las predicciones del índice de la PDO para diseñar estrategias de planificación de los recursos naturales dependientes de la climatología en las regiones que muestran teleconectividad a la PDO, y tomar acciones para favorecer actividades agrícolas, pecuarias, forestales etc., en el noreste de México.

8. LITERATURA CITADA

- AMS, 2000. American Meteorological Society Glossary, 2nd edition, Allen Press, Lawrence, KS. (<http://amsglossary.allenpress.com/glossary/browse?s=t&p=6>).
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, Eds., 2008: El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, 224 págs.
- Brito, L., and Leyva C. 2002. Pacific Decadal Oscillation and the filled capacity of dams on the rivers of the Golf of California continental watershed. *Atmósfera* 15 pp. 121-138.
- Cavazos, T. and Hastenrath S. 1990. Convection and rainfall over México and their modulation by the southern Oscillation *Int. J. of Climatology*, 10: 337-386.
- Cayan, D.R. and Peterson D.H. 1989. The influence of North Pacific atmospheric circulation on streamflow in the West, *PA-CLIM AGU Monographs*, 55:357-397.
- Conde, C. 2003. Cambio y variabilidad climáticos. Dos estudios de caso en México. Tesis para obtener el doctorado en ciencias de la tierra. Posgrado en ciencias de la tierra, UNAM. 227pp.
- Corte-Real, J., Qian B., Xu H. 1998. Regional climate change in Portugal: Precipitation variability associated with large-scale atmospheric circulation, *Int. J. Climatol.*, 18: 619-635.
- Corte-Real, J., Zhang X. & Wang X. 1995. Large-scale circulation regimes and surface climatic anomalies over the Mediterranean. *International Journal of Climatology*, 15:1135-1150.

- Díaz, S. C., Salinas Z. and Hernández-Vazquez S. 2008. Variability of rainfall from tropical ciclones in northwestern México and its relation to SOI and PDO. *Atmósfera* 21(2) 213-223.
- Englehart, P. J., and Douglas A.V. 2002. México's summer rainfall patterns an analysis of regional modes and changes in their teleconnectivity. *Atmósfera* 15: 147-167.
- Francis, R. C., Hare S. R., Hueco A. B. y Wooster, 1998. Efectos de la variabilidad climática interdecadal sobre los ecosistemas oceánicos del Pacífico Nordeste. *Fisheries Oceanography*, 7: 1-21.
- Garduño, R. 1999. Aportaciones Mexicanas al Estudio del Clima. *Revista Geofísica*. Número 51. Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Julio-Diciembre.
- Giddings L. y Soto M. 2006. Teleconexiones y precipitación en América del Sur. *Revista de Climatología*. Vol. 6: 13-20.
- González-Rouco, J. F., Heyen H., Zorita E.& Valero F. 2000. Agreement between observed rainfall trends and climate change simulations in the Southwest of Europe. *Journal of Climate*, 13: 3057-3065.
- Hare, S. R. and R. C. Francis. 1994. Climate change and salmon production in the northeast Pacific Ocean. In R. J. Beamish [ed.] *Climate Change and Northern Fish Populations*. Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci. 121:357-372.
- Houghton, J. T., Jenkins, G. K. and Ephramus, J. J. 1990. *Climate change. The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, 364 pp.
- Hurrel, J., Kushnir Y. and Visbeck M. 2001. The North Atlantic Oscillation. *Science*, Vol. 291, 5504: 603–605.
- Hurrel, J.W. & Van loon, H. 1997. Decadal variations in climate associated with the north Atlantic Oscillation. *Climate Change*, 36: 301-326.

- INEGI, 1994. Estadísticas históricas de México. Tomos I y II. INEGI México, D.F.
- INEGI, 2009. Aspectos generales del territorio Mexicano. INEGI México, D.F.
- IPCC, 1995. Glossary by the Intergovernmental Panel on Climate Change (<http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>).
- IPCC, 1996: Climate change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K Maskell (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, 572 pp.
- IPCC, 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- Jones, A. D. and Trewin C. B. 2000. On the relationships between the El Niño-Southern Oscillation and Australian land surface temperature, *Int. J. Climatol.*, 20: 679-719.
- Kerr, R.A. 2005. Climate change: Atlantic Climate Pacemaker for Millennia Past, Decades Hence? *Science* 309 (5731): 41-43.
- Landscheidt, T. 2001. Solar eruptions linked to North Atlantic Oscillation. <http://www.john-daly.com/theodor/solarnao.htm>
- Leathers, J. D., and Yarnal B. 1991. The pacific/North American Teleconnection pattern and United States Climate Part I: Regional temperature and precipitation Associations. *American Meteorological Society*. Vol (4) pp 517.
- Magaña V.O. 1999. Los impactos del el Niño en México. Dirección General de protección civil, Secretaria de Gobernación, México 229 p.

- Magaña, V. y Gay G. 2002. Vulnerabilidad y adaptación regional ante el cambio climático y sus impactos ambientales, sociales y económicos. *Gaceta ecológica*, INE-SEMARNAT, Núm. 65: 7-9.
- Magaña, V. y J. Matías M. 2004. Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. In: Martínez J. (Comp.): *Cambio climático: una visión desde México*. INE-SEMARNAT pp. 204-205.
- Maheras, P., Flocas H. A., Patrikas I. & Anagnostopoulou C. 2001. A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: spatial and temporal distribution. *International Journal of Climatology*, 21: 109-130.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Wallace, J.M, and Francis, R.C. 1997. Un clima oscilación decenal del Pacífico, con impactos en la producción de salmón. *Bull. Toro. Am. Meteor.Soc.* 78:1069-1079.
- Mccabe, G. J., and Dettinger D. 2002. Primary modes and predictability of year-to-year snowpack variations in the western United States from teleconnections with Pacific Ocean Climate. *Journal of Hydrometeorology*. 3:13-24.
- Méndez, G. J., Cornejo O.E., González R. H., García O.M.A., y Bazaldua S. P. 2008b. Variabilidad de temperatura máxima y mínima en México: Tendencias de los últimos 50 años, XVII Congreso Mexicano de meteorología, noviembre, Monterrey, Nuevo León, México.
- Méndez, G. J., González R. H., Treviño G.E., Jurado Y.E., Pando M.M. y Cavazos P.T. 2009. Spatial and temporal tele/connections of the Multivariate Enso Index (MEI) to rainfall, maximum and minimum temperature anomalies in México, IOP Conf. Serie: Earth and Environmental Science 6.
- Méndez, G. J., Návar CH. J. González O.V. 2008a. Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México, *Investigaciones Geográficas*,

Boletín del Instituto de Geografía, UNAM ISSN 0188-4611, Núm. 65: 38-55.

Montealegre, E. & Pabon D. 2002. Seguimiento, diagnóstico y predicción climática en Colombia. Universidad Nacional: Revista Meteorología Colombiana 5: 1-8.

NOAA, 2005. National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D.C., Press release, April 28.

Parra, M.J.E., Rodrigo F. S. & Castro D. 1998. Spatial and temporal patterns of precipitation in Spain for the period 1880-1992. *International Journal of Climatology*, 18: 1557-1574.

Philander, S. G. 1990. 'El Niño, la Niña and the Southern Oscillation', Intern. Gophys. Series. Acad. Press. San Diego, California.

Quinn, W. and Neal V. 1992. The historical record of El Niño events, In: *Climate since A.D. 1500*. Bradley, R., Jones, P. (eds). 623- 648.

Rzedowski, J. 2006. La vegetación de México. Primera edición digital. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad. Mexico. Pp. 34-47

Seleshi, Y., and Delleur J.W. 1994. Sunspot numbers as a possible indicator of annual rainfall at Addis Ababa, Ethiopia. *International journal of climatology*, vol 14:911-923.

Troup, A.J. 1965. The Southern Oscillation. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* 91:490-506.

Van loon, H. & Roger J.C. 1978. Seesaw in winter temperatures between Greenland and Northern Europe. I. General description. *Monthly Weather Review*, 106: 296-310.

Wolter, K., and Timlin M.S., 1993. Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index, *Proc. of the 17th Clim.*

Diag. W., Norman, OK, NOAA/N MC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and the School of Meteor., Univ. of Oklahoma, 52-57.