



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
POSGRADO EN GEOGRAFÍA

**IMPACTO DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA EN LA
VEGETACIÓN EN DISTINTAS REGIONES CLIMÁTICAS DE
MÉXICO (1982-2006)**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A

LUIS MANUEL GALVÁN ORTIZ

ASESOR DE TESIS:

DR. VÍCTOR ORLANDO MAGAÑA RUEDA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria

A mi madre Josefina

A mis hermanos Carlos y Roxana

A mi amor Adriana

*A mi familia y amigos (que agradezco que sean tantos que no
puedo mencionar a todos)*



Agradecimientos

Al Dr. Víctor Magaña por el asesoramiento, la paciencia y apoyo incondicional para que el presente trabajo se desarrollara de la mejor manera posible, de igual manera es de agradecer la confianza y amistad que me ha otorgado durante el tiempo que llevo colaborando en su gran equipo de trabajo.

A los sinodales, el Dr. Raúl Aguirre, el Dr. Baldemar Méndez y el Dr. Leopoldo Galicia por el tiempo dedicado en la revisión de esta tesis y por sus valiosos comentarios para mejorarla. Especialmente quiero manifestar mi gratitud a la Dra. Leticia Gómez por el interés y aportaciones durante todo el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. Ernesto Caetano por su apoyo y confianza.

A todos los compañeros del grupo del Grupo de Clima y Sociedad del Instituto de Geografía, por su ayuda y amistad. Agradezco especialmente al Dr. Matías Méndez por compartir su experiencia en el tema de sequía y por ayudarme a obtener datos que fueron usados en esta investigación.

Al Instituto de Geografía por facilitar las instalaciones durante el desarrollo de la tesis. A la Universidad Nacional Autónoma de México por proporcionarme la beca con la cual financié mis estudios de Posgrado, además de ser la institución que me ha formado en el campo de la Geografía.

La presente tesis formó parte del proyecto CONACYT SEMARNAT 107997 "Una estrategia para la reducción de riesgos meteorológicos en protección civil basada en información de tiempo y clima".

Índice general

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Introducción a la relación clima-ecosistemas vegetales.....	1
1.2. La sequía.....	3
1.3. Tipos de sequía.....	4
1.3.1. Sequía meteorológica.....	4
1.3.2. Sequía hidrológica.....	5
1.3.3. Sequía agrícola	6
1.3.4. Sequía socioeconómica.....	6
1.4. Clima y sequía.....	8
1.5. Índices de Sequía.....	12
1.6. Índices de vegetación.....	13
1.7. El problema de las relaciones clima – ecosistema: objetivo.....	15
Capítulo 2. Datos y Metodología	17
2.1. Datos.....	17
2.2. Precipitación.....	17
2.2.1. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI).....	18
2.3. Vegetación.....	22
2.3.1. Índice normalizado de vegetación (NDVI).....	23
2.4. Humedad del suelo.....	25
2.4.1. Razón de pérdida de la humedad del suelo.....	26
2.5. Los impactos de la sequía sobre distintos tipos de vegetación.....	27
2.6. Metodología.....	28
2.7. Diferenciación de los impactos de sequías por zonas climáticas....	30

■ ■ ■

Capítulo 3. Resultados	33
3.1. Relaciones precipitación-humedad del suelo-vegetación.....	33
3.2. Impacto de la sequía de 1982.....	36
3.3. Impacto de la sequía de 1998.....	42
Capítulo 4. Análisis de resultados y conclusiones	48
4.1. Discusión. La sequía en México.....	48
4.2. Algunas acciones de la gestión de riesgo ante sequía.....	52
4.3. Conclusiones.....	54
Referencias bibliográficas	55

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción a la relación clima-ecosistemas vegetales

De forma tradicional, el clima ha sido considerado como el conjunto de condiciones promedio de la atmósfera para cada estación del año en las diversas regiones del planeta. Sin embargo, la incorporación de información sobre eventos extremos también forma parte del clima así como los rangos de su variabilidad, pues es bajo estas condiciones que se desarrollan procesos naturales y sociales (Landa et al., 2008). En el caso de México, los principales problemas relacionados a la variabilidad climática, tienen que ver con exceso o déficit de lluvia por los consecuentes efectos en la disponibilidad de agua, ya que las condiciones de sequía prolongada han tenido enormes costos sociales, ambientales y económicos (García, 2006). Aunque se sabe que la sequía afecta a los ecosistemas, no es claro cuál es el grado de presión que pueden resistir, o cual es su resiliencia, lo cual vuelve difícil establecer en qué medida por ejemplo, el cambio climático los afectará. Esto tiene importantes implicaciones cuando se piensa en actividades como la conservación, la restauración o la rehabilitación de ecosistemas (CONANP, 2010).

La variabilidad climática tiene con frecuencia impactos negativos en regiones, sectores económicos o grupos sociales que son altamente dependientes del agua, y es por ello que preocupa que el clima cambie de forma tal que, los desastres sean cada vez más frecuentes e intensos. Los desastres sin embargo, no suceden sólo por los efectos de la variabilidad climática o porque el clima cambie, sino porque la vulnerabilidad de los sistemas naturales y sociales a condiciones extremas del clima es alta. La vulnerabilidad es un aspecto dinámico y multifactorial de los socioecosistemas y por ello ha sido difícil evaluar. En particular, ha sido complicado establecer la vulnerabilidad de ecosistemas a condiciones extremas del clima.

La salud de la vegetación (monitoreada por sensores remotos) puede ser un indicador de los impactos de una sequía, dado que refleja las condiciones anómalas de precipitación y reflejan el contenido de humedad en el suelo (Wilhite y Svoboda, 2000). Períodos prolongados de déficit de lluvia provocan estrés hídrico en la vegetación, cuya respuesta inmediata es el cierre de los estomas, como una forma de evitar la resecación y muerte del tejido vegetal (Pertovt, et al, 2007).

Sin embargo, los ecosistemas son complejos, sujetos a influencias externas y procesos internos en los que puede influir la variabilidad climática. A diferencia de los agroecosistemas, para los cuales se tiene clara la influencia del clima (requerimientos hídricos y térmicos de los cultivos), los ecosistemas naturales requieren un mayor entendimiento de su relación con condiciones atmosféricas en términos de procesos. La experiencia indica que el exceso de lluvia no es tan perjudicial como las sequías y por ello se pondrá especial énfasis a esta amenaza para la vegetación.

Para cualquier diagnóstico ambiental es fundamental realizar un monitoreo de los ecosistemas vegetales (naturales y agrícolas). El diagnóstico hoy en día se puede realizar a través de sensores remotos, con el fin de poder establecer cuál es su respuesta a sequías intensas. El mismo procedimiento de monitoreo se puede dar para otros factores climáticos como lluvia intensa, temperaturas extremas o vientos intensos. El monitoreo debe ser una tarea primordial si se desea conocer la sensibilidad y respuesta de los ecosistemas de diversas regiones a los impactos de la variabilidad natural del clima.

Como país megadiverso (Sarukhán, et al., 2009), el reto de entender las relaciones entre sequías y ecosistemas vegetales involucra entre otras cosas:

- Determinar los cambios en el estrés de la vegetación, lo cual puede desarrollarse mediante percepción remota, usando información histórica

de imágenes satelitales correspondientes a la época de sequías intensas.

- Identificar la intensidad, duración y extensión de la sequía meteorológica mediante índices.
- Contrastar los resultados de estrés vegetal con humedad del suelo en diversas escalas de tiempo en relación con índices de sequía.
- Determinar el tiempo de respuesta de diferentes tipos de vegetación ante eventos de sequía.

1.2. La sequía

Existen diversas definiciones de sequía, dependiendo del sector en el que se experimente el déficit de agua. Adicionalmente, con frecuencia resulta difícil determinar y más aun pronosticar el inicio y fin de una sequía, lo cual refleja la complejidad de este fenómeno climático (Wilhite, 1997).

En México se han utilizado diversas definiciones de sequía meteorológica (Galván, 2007; Nerí, 2010; Méndez, 2010; CENAPRED, 2002;). Para fines de la presente investigación, se propone la siguiente:

La sequía corresponde a una disminución natural de la precipitación a diferentes escalas de tiempo (semanas, meses, años o décadas): se presenta en cualquier región climática, con amplias consecuencias encadenadas entre sectores naturales y socioeconómicos. Su evaluación en términos de la temporalidad, distribución, intensidad y efectos, depende de los datos con los que es calculada.

Con frecuencia se confunde sequía con aridez, por lo que la *World Meteorological Organization* (1975) las distingue definiendo la aridez en

términos de baja precipitación y alta evapotranspiración, como una característica permanente de la región. La sequía por otra parte, es una característica temporal del clima en el sentido de que ocurre cuando la lluvia o humedad disponible se desvía apreciablemente por debajo de lo normal. La aridez está restringida a las regiones con baja precipitación y usualmente altas temperaturas, mientras que la sequía es posible virtualmente en cualquier régimen de temperatura y/o humedad. Mientras la aridez ocasiona que las actividades humanas se realicen en función de la baja en humedad permanente, con la sequía se interrumpen las actividades normales en la zona que afecta ante la disminución extraordinaria de humedad.

1.3. Tipos de sequía

Los impactos de las sequías se manifiestan en los ecosistemas, cuerpos de agua (subterráneo, lagos, ríos, etc.), suelos o sectores socioeconómicos como la industria, ganadería, agricultura o abasto de agua en zonas urbanas, etc. La variedad de los efectos que puede tener la sequía hace que se divida en diferentes tipos. El *National Drought Mitigation Center* (2006) propone diferenciar a la sequía en: meteorológica, hidrológica, agrícola y socio-económica.

1.3.1. Sequía meteorológica

La sequía meteorológica se define en función del grado de sequedad o déficit de precipitación (en comparación con su rango de normalidad) y la duración del período seco. Las definiciones de la sequía meteorológica deben ser consideradas por región específica, puesto que las condiciones atmosféricas que se traducen en deficiencias de las precipitaciones, son muy variadas de una región a otra. Por ejemplo, algunas definiciones de la sequía meteorológica identifican sus períodos sobre la base del número de días con precipitaciones menores a un umbral determinado. Esta medida sólo es apropiada para las

regiones caracterizadas por un régimen de precipitaciones durante todo el año, como pueden ser un bosque tropical, clima subtropical húmedo o clima húmedo de latitudes medias. Otras definiciones pueden referirse a la disminución de la precipitación en escalas de tiempo mensuales, estacionales o anuales (NDMC, 2006).

La sequía meteorológica se presenta en cualquier región del mundo por ser parte de la variabilidad natural del clima. Su presencia no tiene relación directa con la administración de los recursos hídricos, actividades agrícolas o en general cualquier actividad socio-económica; por ende, la influencia humana en una sequía meteorológica es mínima.

1.3.2. Sequía hidrológica

La sequía hidrológica se asocia con los efectos de los períodos de precipitación deficientes que afectan la disponibilidad de agua superficial o del subsuelo (caudales, reservorios, niveles lacustres y aguas subterráneas). La frecuencia y severidad de este tipo de sequía se definen a menudo a escala de cuenca hidrológica. Si bien todas las sequías se originan por un déficit de precipitación (sequía meteorológica), los hidrólogos están más interesados en el papel que juega esta deficiencia en el sistema hidrológico. La sequía hidrológica se encuentra generalmente con un retraso respecto a la ocurrencia de la sequía meteorológica. La sequía meteorológica se tarda en aparecer en los componentes del sistema hidrológico tales como la humedad del suelo, caudales, aguas subterráneas y los niveles de embalses. La competencia por el agua en los sistemas de almacenamiento se intensifica durante la sequía hidrológica y los conflictos entre los usuarios de agua aumentan considerablemente (NDMC, 2006).

De esta manera la presencia de la sequía hidrológica en cuencas con algún tipo de manejo, es influenciada por la capacidad de la administración de los

recursos hídricos. Con una adecuada planeación en el suministro del agua, es posible reducir el impacto de este tipo de sequía.

1.3.3. Sequía agrícola

La sequía agrícola vincula diversas características de la sequía meteorológica e hidrológica, enfocándose en la escasez de precipitaciones, las diferencias entre la evapotranspiración real y potencial, el déficit de agua en el suelo, reducción de aguas subterráneas o niveles de reservorios. Las necesidades de agua de las plantas dependen de las condiciones meteorológicas, características biológicas específicas de las plantas, etapas de crecimiento-floración y propiedades físico-biológicas de los suelos. Una buena definición de sequía agrícola debe tener en cuenta la sensibilidad de los cultivos durante las diferentes etapas de desarrollo, desde el nacimiento hasta la madurez. La deficiencia en la humedad del suelo puede impedir la germinación de los cultivos, lo que conduce a un bajo rendimiento final (NDMC, 2006).

Debido a que la agricultura depende en gran medida de una adecuada administración e infraestructura, la sequía agrícola sólo puede existir por el mal manejo de ésta. Los impactos estarán determinados por el tipo de agricultura (temporal o riego), el tipo de cultivo, los medios con que se cuentan y la combinación de la sequía meteorológica e hidrológica.

1.3.4. Sequía socioeconómica

El suministro de muchos bienes económicos, tales como el agua, forraje, cereales, pescado, energía hidroeléctrica y servicios, dependen de las condiciones climáticas. Las definiciones de sequía socioeconómica son asociadas a la oferta y demanda de algún bien económico con elementos de sequía meteorológica, hidrológica y agrícola. La sequía socio-económica se

diferencia de los tipos de sequía antes mencionados debido a que su ocurrencia depende de procesos espaciotemporales de oferta y demanda, para que pueda ser identificada o clasificada. Debido a la variabilidad natural del clima, el abastecimiento de agua es abundante en algunos años, pero incapaz de satisfacer las necesidades humanas y ambientales en otros años. La sequía socioeconómica se produce cuando la demanda de un bien económico es superior a la oferta, como resultado de un déficit en el suministro de agua (lluvia, ríos, lagos, manto freático, presas, etc.) relacionado con el clima (NDMC, 2006).

La escala de tiempo durante la cual se acumula el déficit de agua producto de una sequía meteorológica, se vuelve extremadamente importante y funcionalmente separa los diferentes tipos de sequía (McKee et al, 1993) (Figura. 1.1).

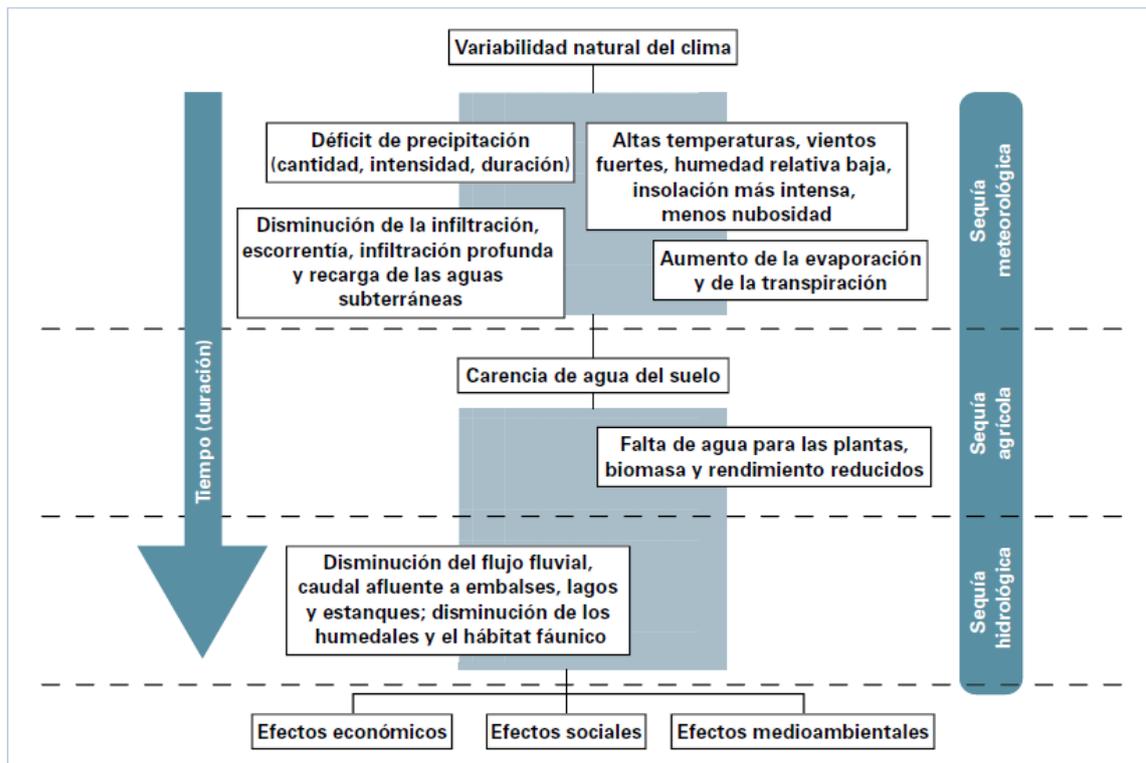


Figura 1.1. Secuencia de eventos de sequía y sus efectos (Fuente: The US National Drought Mitigation Centre, NDMC 2006).

En resumen, cada usuario del agua tiene su propia idea o concepción de sequía y cada concepción cambia con las condiciones operativas del usuario (Dracup et al., 1980). Sin embargo, es necesario preguntarse que significa sequía para un ecosistema natural en el cual se experimenta un déficit sin que necesariamente afecte su resistencia o resiliencia. Después de todo, los ecosistemas conservados han sobrevivido a numerosas sequías.

1.4. Clima y sequía

La información climática (especialmente la hidrometeorológica), es valorada por el costo económico que tienen los desastres, principalmente relacionados con sequías. De acuerdo a diversos escenarios de cambio climático (IPCC AR4, 2007), las sequías podrían ser más frecuentes e intensas y así afectar a muchos de los ecosistemas, aun y cuando se realicen acciones de conservación o de adaptación.

Los impactos de una sequía aparecen en diferentes sectores, sin embargo, la reducción de la producción agrícola, energía hidroeléctrica, incremento en incendios forestales, etc., no son los únicos efectos, los impactos se plasman de manera encadenada hasta el grado en que la población es afectada en su economía, salud y estabilidad social, en otras palabras hasta generar una crisis ambiental.

Los efectos provocados por una sequía difícilmente son notados en el tiempo en el que se presenta y sus impactos pueden continuar semanas, meses o años después de que haya terminado (Wilhite, 1997). Existen factores climáticos que agravan la severidad de la sequía y que están asociados con ella como altas temperaturas, fuertes vientos y baja humedad (NDMC, 1991).

En México la actividad agrícola es altamente vulnerable ante la presencia de eventos climáticos extremos, principalmente asociados al exceso o falta de precipitación pluvial. Los efectos de las sequías en la agricultura son de

diversos grados, según su periodicidad e intensidad pueden alcanzar desde daños patrimoniales al productor y a la economía familiar por pérdida parcial o total de la inversión y del ingreso esperado, hasta daños a la economía regional y nacional por la interrupción del ciclo productivo, reducción del ingreso, desocupación productiva, desabasto de alimentos, pérdida del nivel de bienestar, desarraigo y migración. En México el 98% de riesgo de base catastrófico que enfrenta responde a sequías (80%) y fenómenos ciclónicos (18%) (AGROASEMEX, 2006).

La ocurrencia de sequías intensas en México generalmente están asociadas al fenómeno *El Niño*, como en los años 1982-83. Se estima que a nivel mundial murieron 2 mil personas con relación a anomalías climáticas y las pérdidas materiales ascendieron a casi 13 mil millones de dólares (Suplee, 1999).

El Niño y *La Niña* son condiciones anómalas con respecto al valor promedio en la temperatura del océano en el Pacífico tropical del este. Bajo la definición de Trenberth (1997), *El Niño* corresponde al estado en el que la temperatura de la superficie del mar está 0.5°C o más, por encima de la media del período 1950-1979, por al menos seis meses consecutivos, en la región 4°N a 4°S, 150°W a 90°W conocida como “Niño 3” (Figura. 1.2).

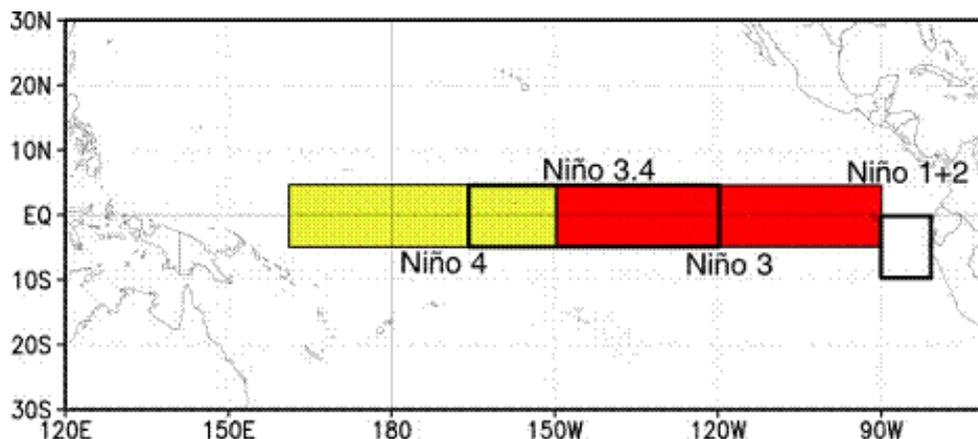


Figura 1.2. Regiones de *El Niño* (tomado de NOAA, 2005 en: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/nino_regions.shtml).

Durante años *El Niño*, en la época de lluvias, los descensos en la cantidad de precipitación son notables y por tanto, disminuyen los escurrimientos y los niveles de agua en presas y ríos (Magaña et al., 1999). *El Niño* en los años 1982-83 y 1997-98 son los dos eventos de mayor intensidad que se tengan registrados en la época instrumental (Figura 1.3) y se presentaron durante el período de estudio de esta investigación (1982-2006).

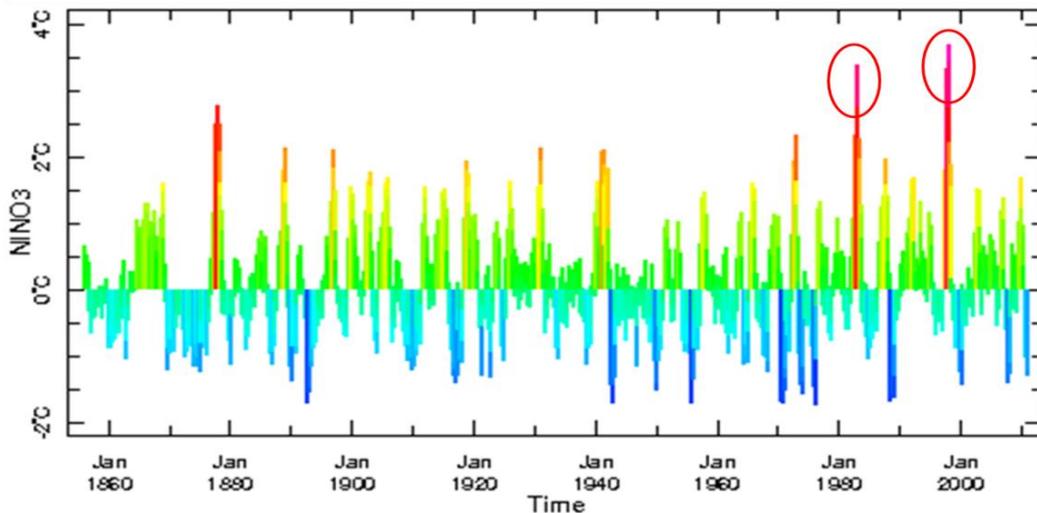


Figura 1.3. Anomalía de temperatura superficial del océano en la región Niño 3. En círculos los eventos más intensos que son parte de la presente investigación (enero 1856 - noviembre 2010) (Tomado de IRI, en: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.Indices/.nino/.EXTENDED/.NINO3/>).

El evento de *El Niño* 1997-98, en México provocó importantes cambios en la distribución y abundancia de las lluvias, lo que ocasionó pérdidas de más de 2 millones de toneladas de granos básicos, además de daños en la agricultura por cerca de 8 mil millones de pesos. La severidad de la sequía fue tal, que cerca de 2 millones de hectáreas sembradas con diversos granos básicos se vieron afectadas (Magaña et al., 1999). Se produjo pérdidas del orden de 204 millones de dólares por concepto de cosechas siniestradas, así como importaciones adicionales de granos con un costo de 1300 millones de dólares, debido a la disminución registrada en la producción nacional (Delgadillo, Aguilar y Rodríguez, 1999).

La combinación de *El Niño* 1997-98 con los daños causados por el huracán Paulina, provocaron en la agricultura mexicana que las importaciones de maíz y sorgo alcanzaran 4,716 millones de toneladas. A esto se debe añadir el gran número de población afectada que tuvo que emigrar de sus tierras (Magaña et al., 1999).

Durante el fenómeno de *El Niño* 1998, se calculó por medio de percepción remota que las temperaturas alcanzaron entre los 33 y 51°C (Manzo, Aguirre y Álvarez, 2004), siendo la zona centro de las más afectadas por incendios forestales a nivel nacional. Por las altas temperaturas y baja humedad, resultado del déficit de precipitaciones, se reportó en México durante este evento *El Niño* el record histórico de incendios forestales el cual fue de más de 14,400 que afectaron 849,632 ha (Palacios, Luna y Macías, 1999) (Figura.1.4).

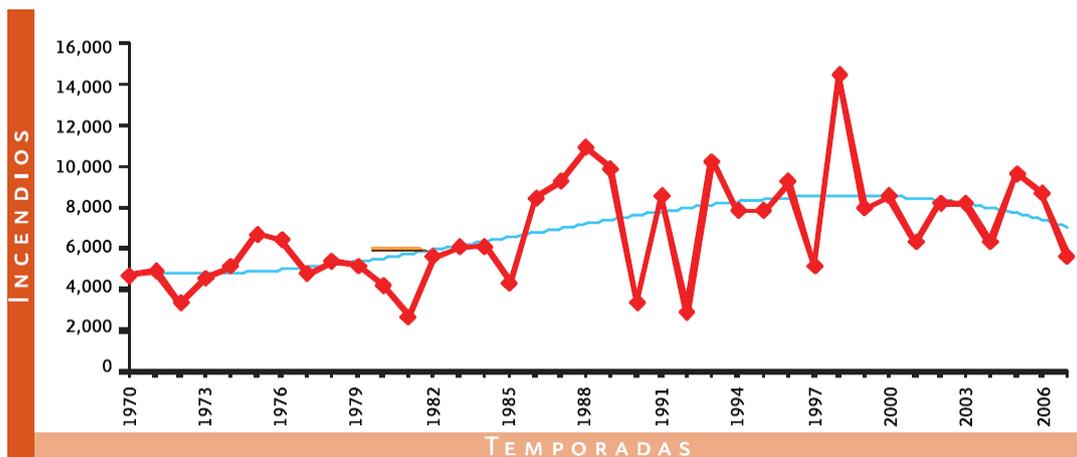


Figura 1.4. Número de incendios forestales en México 1970-2007 (CONAFOR, 2008).

Las condiciones de sequedad de la planta y las características de la sequía, pueden ser evaluadas de forma cuantitativa por medio de índices, los cuales sirven para resumir de manera práctica una gran cantidad de datos, con el objetivo de generar valores que refleje el cambio de las variables en el tiempo y espacio.

1.5. Índices de Sequía

Los índices de sequía asimilan datos de lluvia, nieve, caudales y otros indicadores de suministro de agua. Los valores de índices de sequía suelen ser un solo número, que resulta más práctico que los datos de origen para la toma de decisiones. Aunque ninguno de los índices de sequía es por sí superior al resto, algunos índices son más adecuados que otros para determinados usos. La mayoría de los planificadores de abastecimiento de agua les resulta útil consultar más de un índice antes de tomar una decisión (Hayes, 1998).

Algunos índices de sequía usados en diferentes regiones del mundo:

- Porcentaje de lo normal. Es el porcentaje que se presenta por debajo de un valor considerado normal, es un simple cálculo que adapta bien a las necesidades de los meteorólogos de la televisión y el público en general.
- Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés). Creado por McKee, et al. (1993,1995), es un índice basado en la probabilidad de la precipitación para cualquier escala de tiempo.
- Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés). El índice de Palmer (1965) es un algoritmo de humedad del suelo calibrado para regiones relativamente homogéneas.

Los impactos de la sequía se reflejan en la salud de la vegetación, y para poder estimar las condiciones vegetales se hace uso de los llamados índices de vegetación.

1.6. Índices de vegetación

Para generar índices de vegetación se hace uso de técnicas de teledetección basadas en la combinación de los valores digitales de bandas pertenecientes a diversos rangos del espectro electromagnético adquiridas en una o en diferentes fechas, con la finalidad de confeccionar una nueva banda espectral que contenga y sintetice los aspectos de interés que resulten comunes a todas ellas. De ahí parten tanto las composiciones de imágenes para el análisis visual mediante teledetección, en color real o falso color y los índices de vegetación.

Es posible analizar la fisiología de las plantas y sus propiedades biométricas, como las diferencias del contenido de clorofila, la biomasa en condiciones secas y húmedas, el contenido de agua, la estructura interna de las hojas, la humedad del suelo, la temperatura superficial de la planta, el estrés vegetal, etc., que son reflejadas en el espectro electromagnético por medio de diferentes longitudes de onda.

Según Gilabert, González y García (1997), un índice de vegetación puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda y es particularmente sensible a la cubierta vegetal. Las imágenes resultado de los índices de vegetación pueden ser visualizadas de forma independiente (como si se tratara de bandas aisladas) o bien, pueden dar lugar a composiciones matemáticas obtenidas a partir del cálculo de índices con imágenes multitemporales, como el promedio de un mes o anomalías.

Con base en los anteriores fundamentos teóricos, los índices de vegetación sintetizan la información contenida en imágenes multiespectrales, a partir de la combinación de las bandas roja (R) e infrarroja cercana (IR), es posible interpretar a partir de ellas las condiciones en las que se encuentra la vegetación, debido a que los contrastes del porcentaje de reflectividad en R e IR son inversas cuando la vegetación se encuentra en condición sana (R disminuye, IR aumenta) o enferma (R aumenta, IR disminuye) (De La Casa y

Ovando, 2006). En otros cuerpos como el suelo la reflectividad aumenta o disminuye simultáneamente en ambas bandas, de esta manera, un suelo húmedo refleja menos en el R pero también menos en el IR, y un suelo seco refleja más en ambas bandas (Sánchez et al., 2000) (Figura. 1.5).

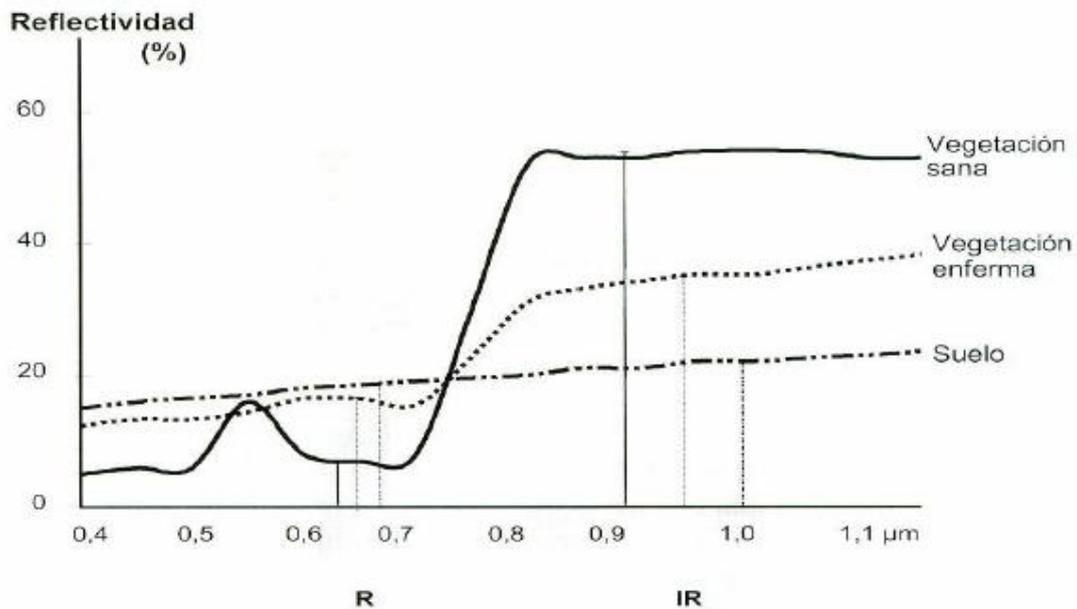


Figura 1.5. Teóricamente un índice de vegetación está basado en el contraste que presenta su firma espectral entre las bandas de rojo (R) y el infrarrojo cercano (IR) (tomado de la Universidad de Sevilla, <http://www.geografia.us.es/web/contenidos/profesores/materiales/archivos/TEMAS4y5.pdf>).

Existen tantos índices como operaciones o combinaciones de bandas son posibles, si bien la mayoría son desarrollos basados en índices ya existentes, lo que se busca al modificarlos es una mejor discriminación en la respuesta espectral de hechos diferentes o para reflejar con exactitud las condiciones de una superficie vegetal determinada. Se muestran algunos índices de vegetación de mayor uso en el mundo:

- Índice de vegetación de proporción simple (RVI, por sus siglas en inglés) creado por Pearson y Miller en 1972

- Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), creado por Rouse et al. (1974)
- Índice Perpendicular de Vegetación (PVI, por sus siglas en inglés), introducido por Richardson y Wiegand en 1977 y reescrito por Jackson et al. en 1980
- Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI, por sus siglas en inglés). Fue desarrollado por Huete en 1988

Por medio de los índices de sequía y vegetación es posible realizar un monitoreo de los ecosistemas vegetales (naturales y agrícolas) para identificar los procesos que se relacionan entre la salud vegetal y el déficit de lluvia.

1.7. El problema de las relaciones clima – ecosistema: objetivo

Ante los escenarios de cambio climático que se proyectan para el mundo y para México en general, es necesario considerar cuáles son los cambios de clima que afectan mayormente a diversos ecosistemas. Aunque se sabe algo respecto a la respuesta de pinos o de otras variedades vegetales de latitudes medias (Gómez, 2007), poco se ha hecho para conocer la sensibilidad de ecosistemas mexicanos a extremos del clima. En particular, resulta adecuado conocer la respuesta de la vegetación a la sequía, dada la experiencia de que resulta con frecuencia en numerosos incendios forestales y pérdida de recursos. Es por ello que la presente tesis tiene como objetivo principal, aproximar la relación clima-ecosistema mediante la caracterización de los tiempos de respuesta de diversos tipos de vegetación en distintas zonas de México.

Específicamente, se intenta:

- a) Establecer una relación entre sequía y magnitud del impacto a través del uso del NDVI que permita medir el nivel de estrés hídrico en la vegetación
- b) Analizar los casos de sequías severas, como las asociadas a eventos *El Niño*, de forma que se pueda estimar mediante un indicador el grado de afectación en diversos ecosistemas ante sequías
- c) Establecer los desfases entre la señal de la sequía y la respuesta del ecosistema, lo que permita una gestión en el ecosistema para la reducción de incendios forestales, por ejemplo
- d) Iniciar los trabajos que lleven a conectar el monitoreo climático con los impactos en diversos ecosistemas

La tesis está estructurada en cuatro capítulos. En el capítulo 1 se presentó un contexto sobre el potencial impacto de extremos del clima en los ecosistemas, considerando en forma particular el caso de la sequía. En el capítulo 2 se describen los datos y la metodología por usarse. El capítulo 3 muestra resultados y por último en el capítulo 4 se presenta las conclusiones.

Capítulo 2

Datos y metodología

El presente es un estudio basado en observaciones que reflejan datos medidos *in situ*, es decir en una estación meteorológica, con estimaciones obtenidas por percepción remota, pues sin duda, el futuro de la climatología estará en nuestra capacidad de interpretar imágenes de satélite o de radar.

2.1. Datos

Para analizar los impactos de la sequía en diferentes tipos de vegetación, como parte de las relaciones clima–ecosistemas, se usan datos de lluvia y de cambios en la salud de la vegetación. Para realizar el análisis en forma eficiente, es común recurrir a campos en puntos de malla, más que a los datos de las estaciones directamente. Una opción es usar series históricas de precipitación asimiladas en una matriz, de forma equivalente a los datos en arreglo de píxeles como los de NDVI. Adicionalmente, se recurrió a estimaciones de humedad del suelo, ya que aunque en la mayoría de los casos se sabe que el déficit de precipitación lleva a déficit de humedad del suelo que impone estrés hídrico en la vegetación, es posible que el cambio en la humedad del suelo se deba también a anomalías positivas de temperatura. Se pudo haber considerado adicionalmente la radiación solar o el viento, pero se estima que los impactos más importantes de la sequía quedan descritos en las variables elegidas.

2.2. Precipitación

La base de datos de precipitación CRU TS 3.0 generada en el *Climatic Research Unit* (CRU) de la *University of East Anglia*, se basa en datos de una

red de 1224 estaciones en el mundo que reportan de forma mensual datos climáticos observados, para el período 1901-2006. Tiene cobertura global en una resolución de 0.5 grados y permite la comparación de variables climáticas con otros fenómenos. La base de datos completa consta de nueve variables climáticas: temperatura promedio, mínima y máxima, rango de temperatura diurna, precipitación, frecuencia de días húmedos, frecuencia de días de heladas, presión de vapor y cobertura de nubes (CRU, 2007).

Para identificar los períodos de sequía meteorológica, se utilizaron los datos de precipitación de la base CRU TS 3.0, los cuales fueron procesados para el cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés).

2.2.1. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

El SPI, se basa en registros de lluvia y fue diseñado para ser un indicador espacial de la sequía; puede calcularse con distintas escalas de tiempo para el análisis de disponibilidad de agua y su uso. El SPI es una transformación estandarizada de la densidad de probabilidad de la precipitación observada. En períodos cortos, como pueden ser meses (o incluso semanas), los datos de SPI pueden ser útiles para el manejo agrícola, mientras que períodos largos (años), los resultados pueden ser importantes para el suministro de agua (Guttman, 1999).

El SPI se calcula a partir de datos de precipitación mensual y se recomienda usarlo para un período continuo de al menos 30 años. Se selecciona un período promedio para determinar una escala de tiempo mensual generalmente de 3, 6, 12, 24 ó 48 meses. Las escalas de tiempo son arbitrarias pero representan una típica serie de déficit de precipitación que afecta a diferentes fuentes de agua. Por ejemplo, para anomalías de lluvia relacionados con variabilidad intraestacional se recomienda usar SPI-3 o SPI-6, mientras que

para sequías persistentes se puede usar SPI-24 o SPI-48 (Méndez y Magaña, 2010).

El conjunto de datos se mueve en el sentido de que cada mes se determina por un nuevo valor de los meses anteriores, (como ejemplo, un SPI-3 de septiembre representa a julio, agosto y septiembre). Cada uno de los conjuntos de datos se ajusta a la función Gamma para definir la relación de probabilidad de la precipitación (Figura. 2.1).

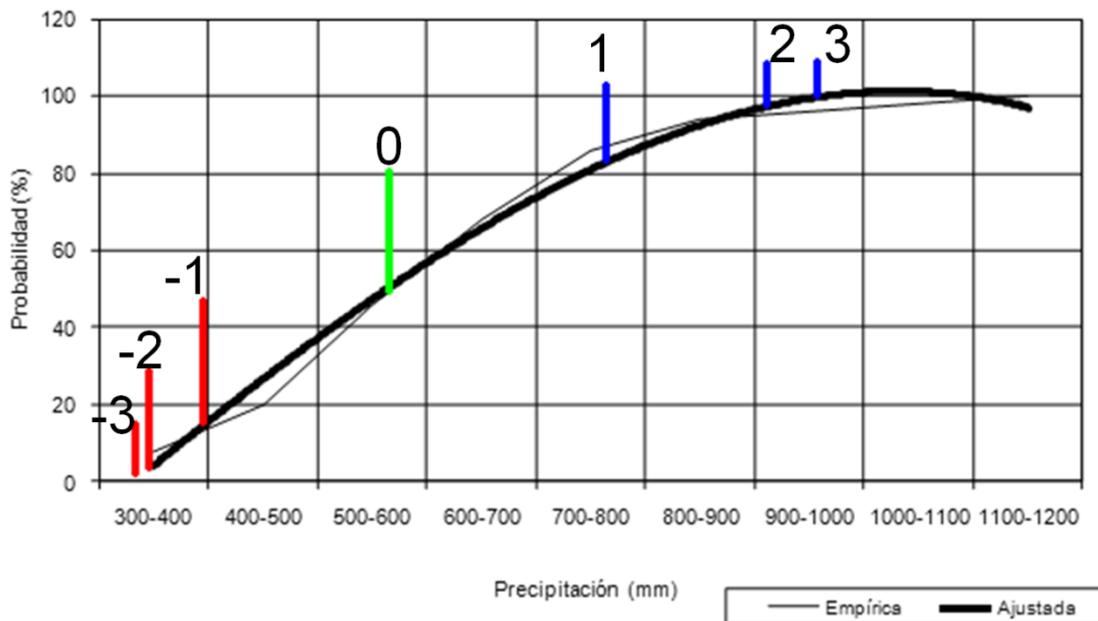


Figura 2.1. Ejemplo de la relación de la distribución gama y su transformación a desviaciones estándar.

Una vez que la relación de probabilidad de precipitación se establece a partir de los registros históricos, la probabilidad de cualquier dato mensual de precipitación observada se calcula y se utiliza junto con una estimación de la inversa de lo normal para calcular la desviación de la precipitación a partir de una densidad de probabilidad de una distribución normal con media cero y desviación estándar uno (Tabla 2.1) (NDMC, 2000). Este valor es el SPI de un dato puntual de precipitación (McKee, et. al., 1993).

SPI	Probabilidad acumulada
-3.0	0.0014
-2.5	0.0062
-2.0	0.0228
-1.5	0.0668
-1.0	0.1587
-0.5	0.3085
0.0	0.5000
0.5	0.6915
1.0	0.8413
1.5	0.9332
2.0	0.9772
2.5	0.9938
3.0	0.9986

Tabla 2.1. SPI y Probabilidad acumulada (NDMC, 2000).

En otras palabras, el SPI representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico.

Para el cálculo del SPI se utiliza la siguiente fórmula (Agnew, 2000):

$$SPI = \frac{(X_{ik} - \bar{X}_i)}{\sigma_i}$$

Donde:

σ_i = Desviación estándar de estación observada.

X_{ik} = Precipitación de la estación observada y observación histórica.

\bar{X}_i = Precipitación media de la estación observada.

El *National Drought Mitigation Center* (2006) categoriza el déficit de lluvia y los posibles impactos, de acuerdo con valores SPI (Tabla 2.2).

Categoría	Posibles Impactos	Rango de SPI
Condición normal seco	Condiciones normales de precipitación	0 a -0.5
Condición anormal seco	Inicia la sequía, período corto en que se secan lentamente las siembras, cultivos y pastizales, empieza a haber peligro de incendios, déficit de agua, pasturas y cultivos no se recuperan completamente.	-0.5 a -0.8
Sequía moderada	Algo de daño a cultivos y pastizales, riesgo alto de incendio. Corrientes, represas y pozos con bajo nivel de agua, escasez de agua inminente, lo que implica la petición del cuidado del agua.	-0.8 a -1.3
Sequía severa	Posible pérdida de cultivos y pastos, riesgo de incendio alto, escasez de agua común, restricciones en el uso del agua.	-1.3 a -1.6
Sequía extrema	Pérdida mayor de cultivos/pasto, peligro extremo de incendios, restricciones estrictas de uso del agua.	-1.6 a -2.0
Sequía excepcional	Pérdida de cultivos/pasto excepcional y extendida, riesgo inminente de incendios, escasez de agua en represas, corrientes y pozos, creación de un estado de emergencia	-2.0 ó menos

Tabla 2.2. Clasificación de la sequía de acuerdo a valores de SPI. Fuente: *National Drought Mitigation Center* (2006).

El SPI tiene las siguientes características:

- El SPI se relaciona únicamente con la probabilidad de la lluvia.
- La precipitación utilizada por el SPI puede ser usada para calcular el déficit de precipitación para el período en curso.

- El SPI es una distribución normal, de esta manera puede ser utilizado para monitorear períodos húmedos y secos.
- El SPI puede calcularse para otras variables relacionadas con el agua como: cubierta de nieve, embalses, caudales, humedad del suelo y agua subterránea.
- El SPI está normalizado de modo que climas húmedos o secos son representados de una manera similar para su comparación.

Los impactos de la sequía dependen de su magnitud, pero también de la vulnerabilidad del sector o región. El SPI solo proporciona información de la magnitud de la sequía meteorológica, lo que permite establecer la amenaza, por lo que la estimación del riesgo requiere de diagnósticos de vulnerabilidad.

2.3. Vegetación

La base de datos para caracterizar la vegetación y su respuesta a fluctuaciones del clima es el NDVI y forma parte del *Global Inventory Monitoring and Modeling Studies* (GIMMS) generada en el *Global Land Cover Facility* (GLCF) de la *University of Maryland*. Los datos del NDVI para un período de 25 años que abarca desde 1981 hasta 2006. El conjunto de datos se deriva de las imágenes obtenidas del sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), instrumento a bordo en los satélites NOAA 7, 9, 11, 14, 16 y 17. Los datos de NDVI se han corregido en la calibración, vista geométrica, aerosoles volcánicos y otros efectos no relacionados con los cambio en la vegetación (Tucker, Pinzon y Brown, 2004).

Los datos se encuentran en mapas raster (mallas) con una resolución espacial de 8km x 8km para períodos de 15 días, la cual es apropiada para detectar cambios en la vegetación inducida o natural a nivel nacional y su relación con otras variables como la lluvia y la humedad del suelo.

2.3.1. Índice normalizado de vegetación (NDVI)

El NDVI forma parte de los llamados “índices de vegetación”, los cuales son calculados por medio de la combinación matemática de bandas para reflejar las condiciones fisiológicas y biométricas de las plantas (Jensen, 1983). Una aproximación de los impactos en la vegetación de las variaciones en la lluvia lo constituye el índice de vegetación NDVI que proporciona información sobre la magnitud del estrés hídrico de la vegetación.

El NDVI se utiliza en los modelos climáticos y biogeoquímicos para calcular la fotosíntesis, el intercambio de CO₂ entre la atmósfera y la superficie terrestre, la evapotranspiración del suelo y la absorción y liberación de energía de la superficie (Tucker, Pinzon y Brown, 2004).

La ecuación de bandas del espectro electromagnético para el cálculo del NDVI se determina de la siguiente manera (Rousse et al, 1974):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{IRC} - \text{R}}{\text{IRC} + \text{R}}$$

Donde:

IRC = reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

R = reflectancia en la banda roja visible

El NDVI es el cociente entre la suma y la diferencia de las bandas infrarroja y roja (Figura 2.2).

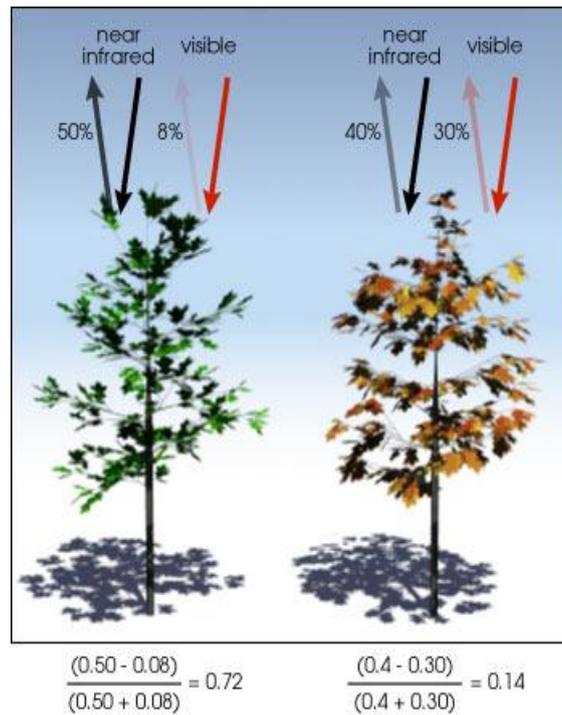


Figura 2.2. Ejemplo del cálculo de NDVI (ilustración de Robert Simmon, en: http://www.nasa.gov/topics/earth/features/obscure_data.html).

Debido a que el NDVI tiene un ciclo anual bien marcado para regiones tropicales y subtropicales, el cual va casi paralelo a la actividad del monzón (mayor actividad fotosintética en período húmedo y menor en seco) (Figura 2.3), es necesario filtrar dicho modo para poder concentrarse en las anomalías de un año a otro y realizar una comparación más adecuada con valores del sequía (SPI).

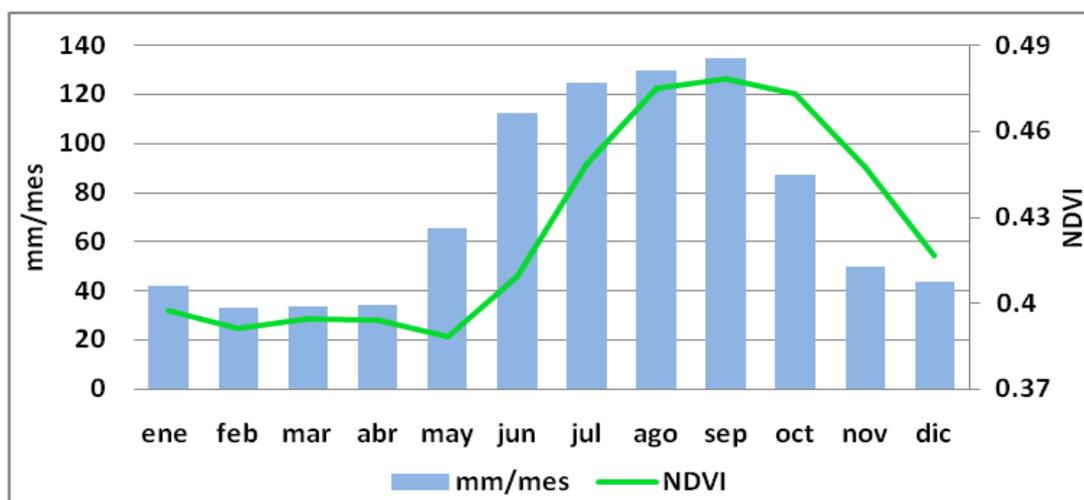


Figura 2.3. Ciclo anual de la precipitación y NDVI para México.

Se calcularon anomalías mensuales de NDVI (aNDVI) para el período 1981-2006, filtrando el ciclo anual e identificando eventos extremos de las condiciones de la salud de la vegetación (vigorosa o en estrés). Diversos trabajos han utilizado las anomalías de NDVI para caracterizar los impactos de la variabilidad climática en ecosistemas (Verdin et al., 1999; Wang et al., 2006; Zaitchk et al., 2006; Erasmi et al., 2009;).

Las anomalías se calcularon mediante la siguiente ecuación (Wilks, 1995):

$$Z = X_i - \bar{X}$$

Donde:

Z = Anomalía

X_i = Valor observado de un mes

\bar{X} = Valor promedio histórico de un mes

Mediante SPI-aNDVI, es posible caracterizar la respuesta de la vegetación a las sequías, considerando un desfase de la respuesta vegetal a la carencia de humedad y una posterior recuperación de la actividad fotosintética de la planta.

Como complemento de las bases de datos anteriores se tomó en cuenta la humedad del suelo como elemento que depende de las precipitaciones e influye de manera directa en la salud vegetal.

2.4. Humedad del suelo

La base de datos *Global Monthly Soil Moisture* (GMSM) generada por el *Climate Prediction Center* (CPC) de la *National Oceanic and Atmospheric*

Administration (NOAA), es resultado de la combinación de los datos de precipitación de la base *CPC PRECipitation REConstruction over Land* (Chen, et al., 2002) y valores de temperatura de la base *CPC Global Land Surface Air Temperature Analysis* (Fan y van den Dool, 2008). Se conforma de observaciones de superficie a nivel mensual con una cobertura global y se calcula con la climatología del período 1971-2000.

2.4.1. Razón de pérdida de la humedad del suelo

La humedad del suelo se calcula mediante un modelo hidrológico de una sola capa (Huang et al., 1996; van den Dool et al., 2003). El modelo usa la precipitación y la temperatura para el cálculo de la humedad del suelo, evaporación y escurrimiento. La evaporación potencial se estima a partir de la temperatura observada.

$$dw/dt = P - E - R - G$$

Donde:

W = humedad del suelo en una columna de 1.6m de profundidad, mm/mes

P = precipitación, mm/mes

E = evaporación, mm/mes

R = escurrimiento, mm/mes

G = pérdidas por aguas subterráneas, mm/mes

De igual manera que la variable NDVI, se generan anomalías de humedad del suelo (aHS) para filtrar el ciclo anual y detectar los eventos anómalamente secos, para así, identificar la respuesta ante la presencia de sequía. El

procedimiento es el mismo que para el cálculo de aNDVI. La normal climática para la aHS se calculó con el período 1971-2000.

2.5. Los impactos de la sequía sobre distintos tipos de vegetación

El rango de tolerancia de los ecosistemas a la sequía depende de la vulnerabilidad de cada sistema relacionada con los procesos evolutivos de miles o millones de años. Determinar la tolerancia de ecosistemas a condiciones extremas del clima como las sequías, es un reto de la ciencia.

Los efectos de una sequía no son iguales para todos los ecosistemas, éstos tienen su propia forma de responder a un déficit de precipitación. Por la importancia económica y los servicios ambientales, es de gran interés identificar el grado de afectación y el tiempo de respuesta de diversos ecosistemas como bosques de coníferas (pino, encino y otras coníferas), selvas (bajas y medias) y agricultura (temporal y riego) ante sequías intensas como los que ocurrieron durante eventos *El Niño*. La identificación de los tipos de vegetación se basa en la cartografía de la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), que contiene los diversos tipos de vegetación en México.

La información sobre uso de suelo y vegetación esta agrupada por categorías propuestas por la CONABIO (1999) a escala 1:250,000 y publicadas en las "Cartas de uso del suelo y vegetación" del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (1981-1991). Los datos se encuentran en forma digital gracias al Instituto Nacional de Ecología (INE), a través de la Dirección General de Ordenamiento Ecológico (DGOE). Las cartas digitales fueron editadas por CONABIO con la finalidad de reducir el tamaño y facilitar el manejo de la información cartográfica digital en escala 1: 1,000,000. Para su elaboración, se agruparon las 375 clases de uso del suelo y vegetación que aparecen en las

cartas originales en 27 grupos. Así mismo, se eliminaron áreas iguales o menores a 25 ha (Figura 2.4).

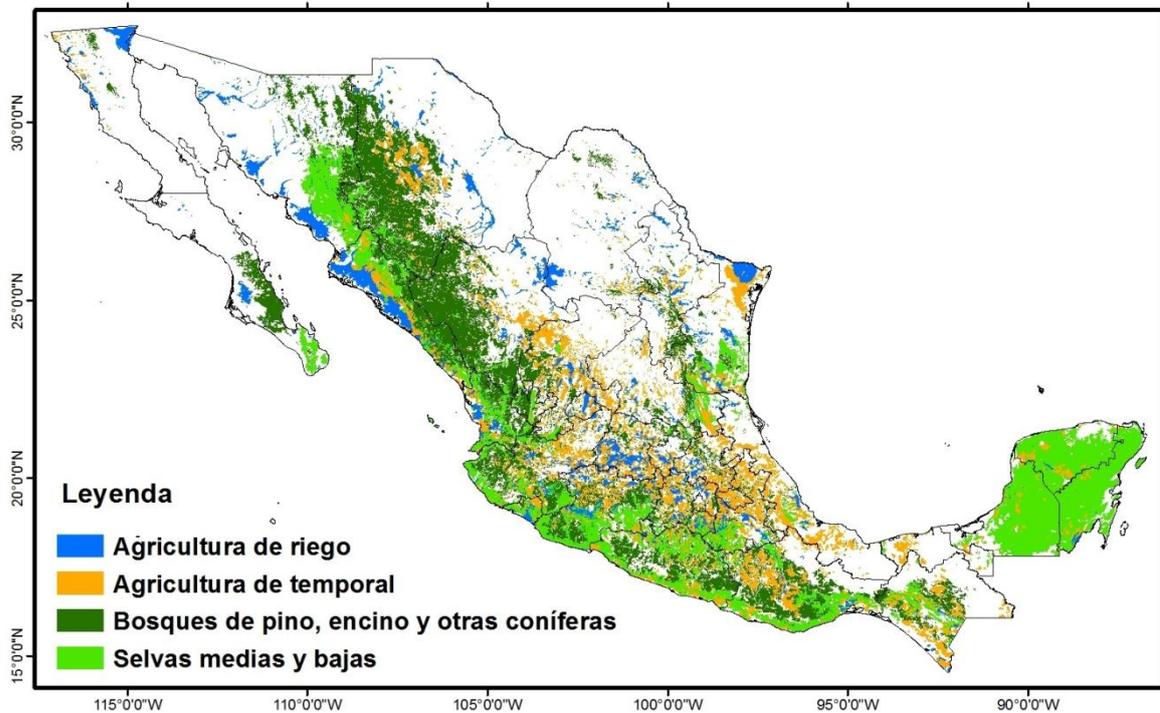


Figura 2.4. Tipos de vegetación de interés para la presente investigación (Fuente: CONABIO, 1999).

2.6. Metodología

El procesamiento espacial se trabajó dentro del un Sistema de Información Geográfica (SIG), ArcGIS 9.2, con la finalidad de extraer de la base de datos aNDVI, solo la información que espacialmente corresponde a los usos de suelo como: bosques de coníferas, selvas, cultivos de temporal y cultivo de riego (Figura 2.5). De esta manera se puede desagregar cada uno de los tipos de vegetación para identificar la respuesta ante sequía y pérdida de humedad del suelo (SPI y aHS) por zonas climáticas.

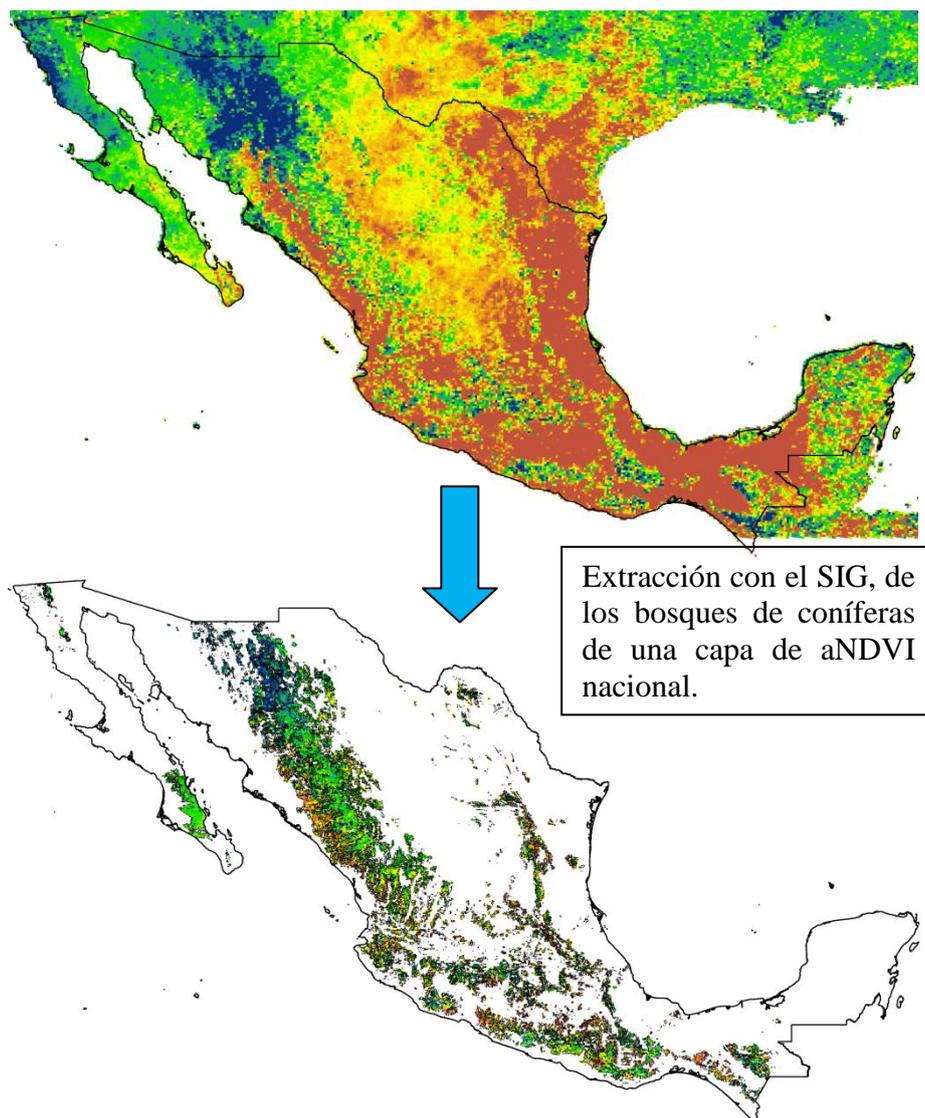


Figura 2.5. Ejemplo de la extracción de las áreas correspondientes a bosques de coníferas de los datos a nivel nacional de aNDVI.

El proceso de extracción de datos de cada tipo de vegetación, se generó para cada capa mensual de los mapas raster de aNDVI correspondientes al período de estudio. De esta manera es posible generar series de tiempo individuales para cada tipo de vegetación e identificar el impacto de las sequías de forma desagregada.

2.7. Diferenciación de los impactos de sequías por zonas climáticas

La vegetación está determinada en buena medida por tipos de clima, tipos de suelo y altitud. Sin embargo, ésta es una visión limitada y estática de la naturaleza y de sus interacciones con el clima, ya que no considera las dinámicas e interacciones entre subsistemas en el corto y mediano plazo. Dichas interacciones representan la forma en que la vegetación se acopla con su ambiente climático y cuáles pueden ser sus tolerancias críticas así como la forma en que los ecosistemas influyen en el clima. Determinar la tolerancia por tipo de vegetación ante eventos de sequía intensos es fundamental, pues aunque en el pasado reciente han ocurrido varias sequías intensas y prolongadas, su impacto en los ecosistemas es poco claro y se documenta principalmente por los incendios forestales.

Bajo la premisa de que en México la vegetación no tiene la misma dinámica durante el año, debido a que el ciclo anual del clima depende de altitud y latitud, entre otras cosas, lo cual de forma general distribuye la lluvia y la temperatura a lo largo del territorio nacional diferenciadamente. Se busca regionalizar al país para identificar diferencias en la respuesta de la vegetación no como un determinante dinámico, sino como una división paisajística, ya que los eventos de sequía meteorológica aquí analizados se distribuyen de manera extensa sin que intervengan las condiciones dominantes de las zonas climáticas.

Una posibilidad de regionalización es la división del país en grandes zonas climáticas como las propuestas por Cervantes et al. (1990) a escala 1:4,000,000 en el Atlas Nacional de México, del Instituto de Geografía, UNAM. La clasificación de las grandes zonas climáticas que se utilizaran de referencia para esta investigación son: árida, templada, trópico subhúmedo y trópico húmedo, las cuales pueden diferenciar adecuadamente los regímenes de lluvia y actividad de NDVI durante el año (Figura 2.6). Esta cartografía la distribuye CONABIO por medio de su página web.

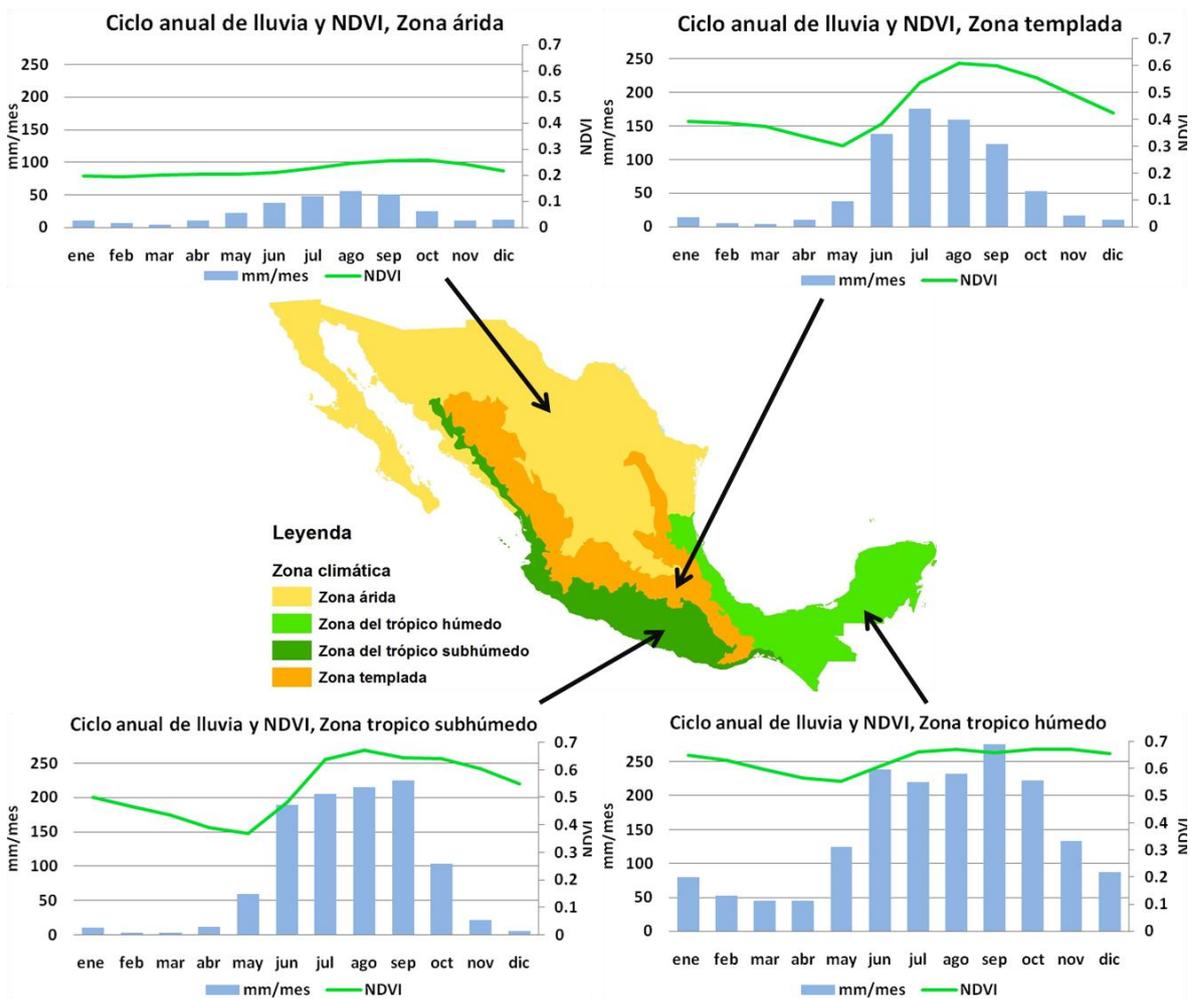


Figura 2.6. Ciclo anual de precipitación y valor medio del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para las zonas climáticas de México.

Mediante análisis geoestadístico, en el SIG se calcula los valores promedio mensual de cada tipo de vegetación y su valor de anomalía, basado en su distribución espacial por zona climática. De esta manera se identifica la respuesta de los ecosistemas a través de las aNDVI de bosques, selvas y agricultura a lo largo del país, diferenciando por la zona climática en la que se encuentre. Ejemplo de esto es que, la agricultura que se genera en las zonas tropicales (condiciones húmedas), no tiene la misma respuesta que podría tener en la zona templada o árida. De igual manera los bosques pueden tener respuestas diferentes al mismo déficit de lluvia en regiones diferentes.

Para poder ser comparables los valores promedio de aNDVI por zona climática, se genera el mismo proceso geoestadístico, para las variables de SPI-3 y las aHS, para así crear las series de tiempo que determinen la respuesta de los tipos de vegetación a la sequía (Fig. 2.7).

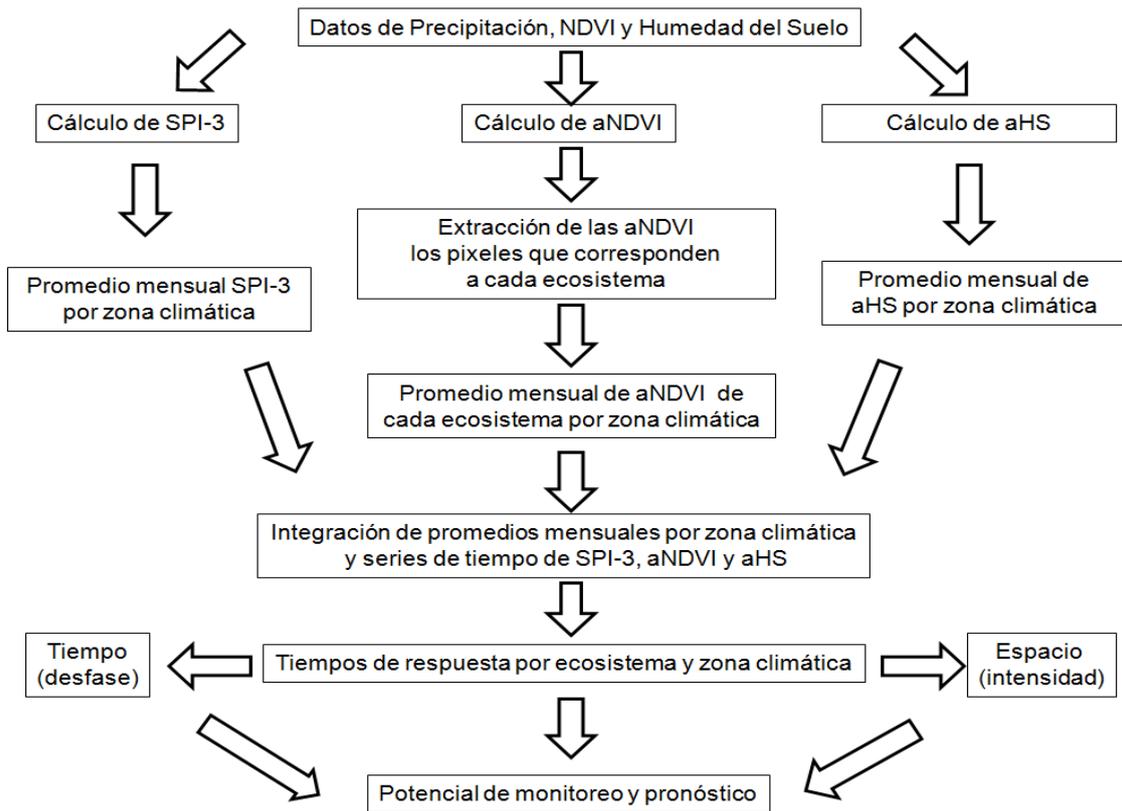


Figura 2.7. Diagrama de flujo de la metodología.

Capítulo 3

Resultados

3.1. Relaciones sequía-humedad del suelo-vegetación

Los impactos de sequía sobre la vegetación se construyen bajo el supuesto de que existe un desfase de la respuesta de las plantas ante un déficit acumulado de lluvia (Gómez, et al 2008). Tal relación se puede observar en los cambios en humedad del suelo y los valores del NDVI. Los procesos hidrológicos y su relación en la fisiología de las plantas indican que la respuesta de la vegetación es un reflejo de una serie de relaciones agua-suelo-vegetación (Al-Bakri y Suleiman, 2004; Nightingale y Phinn, 2003; Paruelo y Lauenroth, 1998; Salinas, Douglas y Díaz, 2002;), donde el déficit de lluvia no es siempre el único detonantes del estrés de la vegetación. En realidad se trata de una combinación de variables atmosféricas (lluvia, temperatura, humedad, radiación solar), condiciones biológicas y geográficas locales (evapotranspiración, escurrimiento, condiciones edáficas), lo que determina en gran medida la respuesta de la vegetación a la sequía.

Para este trabajo el SPI fue calculado para diferentes escalas temporales, para identificar cual muestra mayor relación con los procesos vegetales, se generaron correlaciones a nivel nacional de SPI a 1,3 y 6 meses (SPI-1, SPI-3 y SPI-6) con aNDVI por tipos de vegetación. Los resultados indican que la mayor correlación ($R= 0.53$) se presentó con el SPI de 3 meses. Las correlaciones para SPI de 1 y 6 meses fueron menores ($R= 0.47$ y $R= 0.45$ respectivamente).

El análisis temporal de los promedios de SPI-3, aNDVI y aHS por tipo de vegetación y zona climática, se generó para los eventos de *El Niño* ya que las variaciones de lluvia interanual más importantes que se han presentado durante el periodo de estudio en México (1982- 2006) corresponden al

fenómeno de *El Niño* 1982 y 1998 (Figura 1.3). Para estimar el tiempo de respuesta de cada tipo de vegetación ante los cambios de humedad en el suelo, se obtuvieron las relaciones entre aNDVI y aHS para tres momentos; sin desfase (inmediata), a un mes y a dos meses para eventos de sequías asociadas con *El Niño* (Figura 3.1).

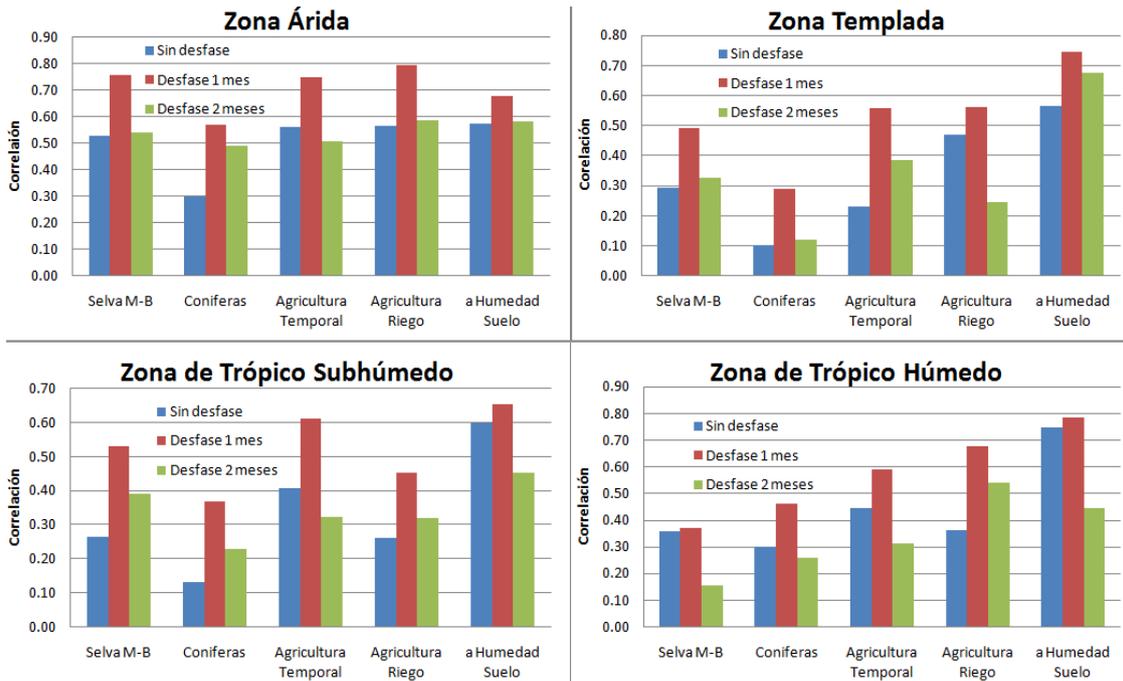


Figura 3.1. Correlaciones entre el SPI-3 con las aNDVI (tipo de vegetación) y aHS para eventos *El Niño*.

Los resultados de las relaciones de SPI-3 con aNDVI por tipo de vegetación y aHS son significativas cuando se considera un mes de desfase para cualquier zona climática de México, es decir de forma general toma alrededor de cuatro semanas el ecosistema entrar a estrés hídrico luego de la ocurrencia de sequía. Los valores de SPI-3 con desfase de un mes, resulta ser la combinación más adecuada para establecer el tiempo de respuesta de la agricultura, los bosques y las selvas a escala nacional ante sequías intensas para cualquier zona climática de México. Por otra parte, las aHS presentan los valores más altos de las correlaciones con el SPI-3 a un mes de desfase, lo

que sugiere que es el suelo que responde primero a las condiciones de SPI y después lo hace la vegetación.

Se examinaron series de tiempo del SPI-3 y la respuesta por tipo de vegetación para determinar el tiempo de recuperación por zona climática lo que indica la resiliencia vegetal, la cual para fines de esta investigación se define como: la capacidad de los ecosistemas de recibir impactos negativos por efectos de sequía y recuperar sus condiciones normales, cuando la anomalía negativa de lluvia (SPI-3) desaparece.

Para facilitar la interpretación de los resultados, se presenta en la figura 3.2 un esquema idealizado de la presencia de sequía (SPI-3) y su efecto en la humedad del suelo (aHS) y el impacto en la vegetación (aNDVI).

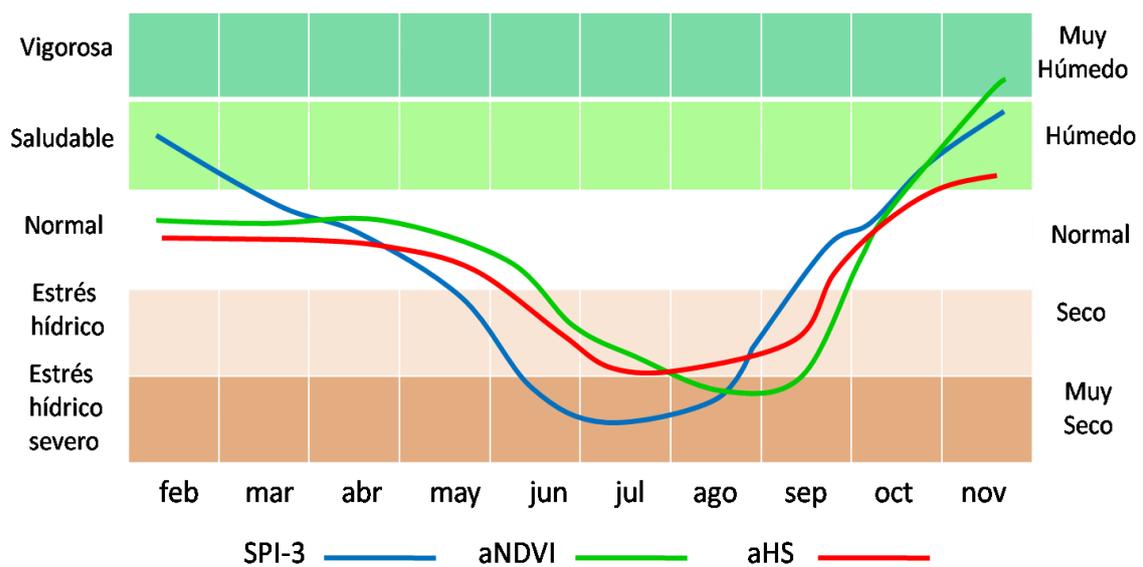


Figura 3.2. Diagrama esquemático de series de tiempo idealizadas para un caso de sequía intra-anual.

En el esquema idealizado el SPI-3 muestra que el sistema estaba en condiciones de sequía severa, aunque ésta se inicia en mayo y termina en septiembre, la respuesta de la humedad del suelo y la vegetación en el ecosistema se manifiesta en estrés hídrico, alcanzando niveles de severidad entre julio y septiembre, es decir con desfase de alrededor de un mes con respecto a la precipitación.

3.2. Impacto de la sequía de 1982

A mediados del año 1982 se presentó un evento *El Niño*, que fue uno de los más intensos que se tengan registrados (Figura 3.3). En México provocó una sequía en el verano de 1982 y hacia el invierno 1982-83 se presentaron lluvias por encima de la normal (Magaña y Ambrizzi, 2005).

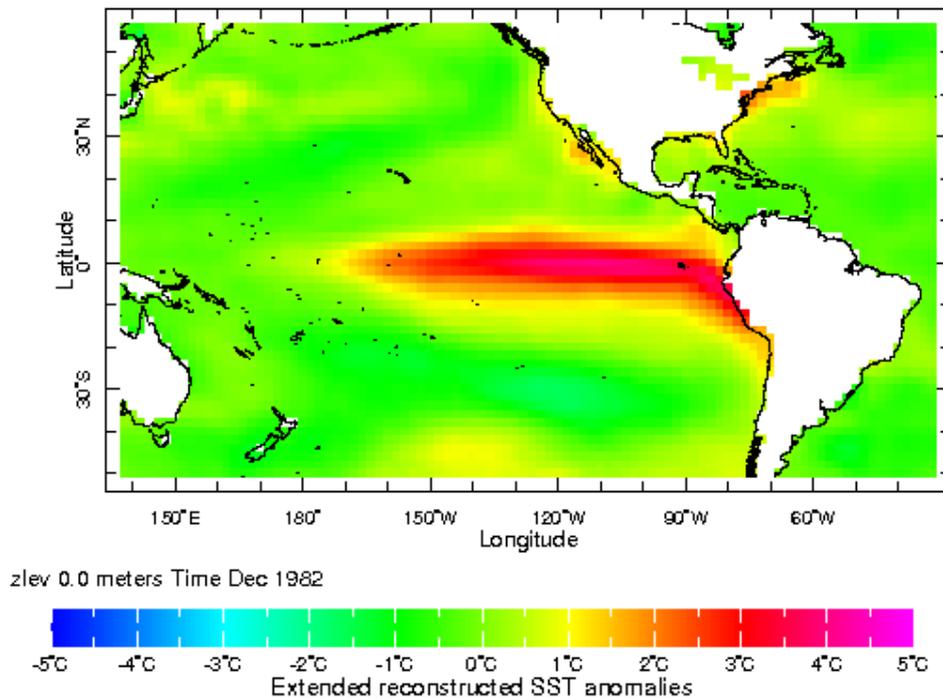


Figura 3.3. Anomalía de temperatura superficial del mar durante diciembre de 1982 (tomado de IRI en: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.ERSST/.version3b/.anom/>).

En México *El Niño* 1982-83 tuvo efectos en la mayor parte del territorio nacional, lo que causó daños a diferentes tipos de vegetación. La resiliencia vegetal ante la disminución de la lluvia por zona climática y su evolución en el tiempo se cuantificó por medio de índices. Las series de tiempo para el período marzo 1982 a febrero 1983 se integran con los valores de SPI-3, aNDVI y aHS (Figura 3.4).

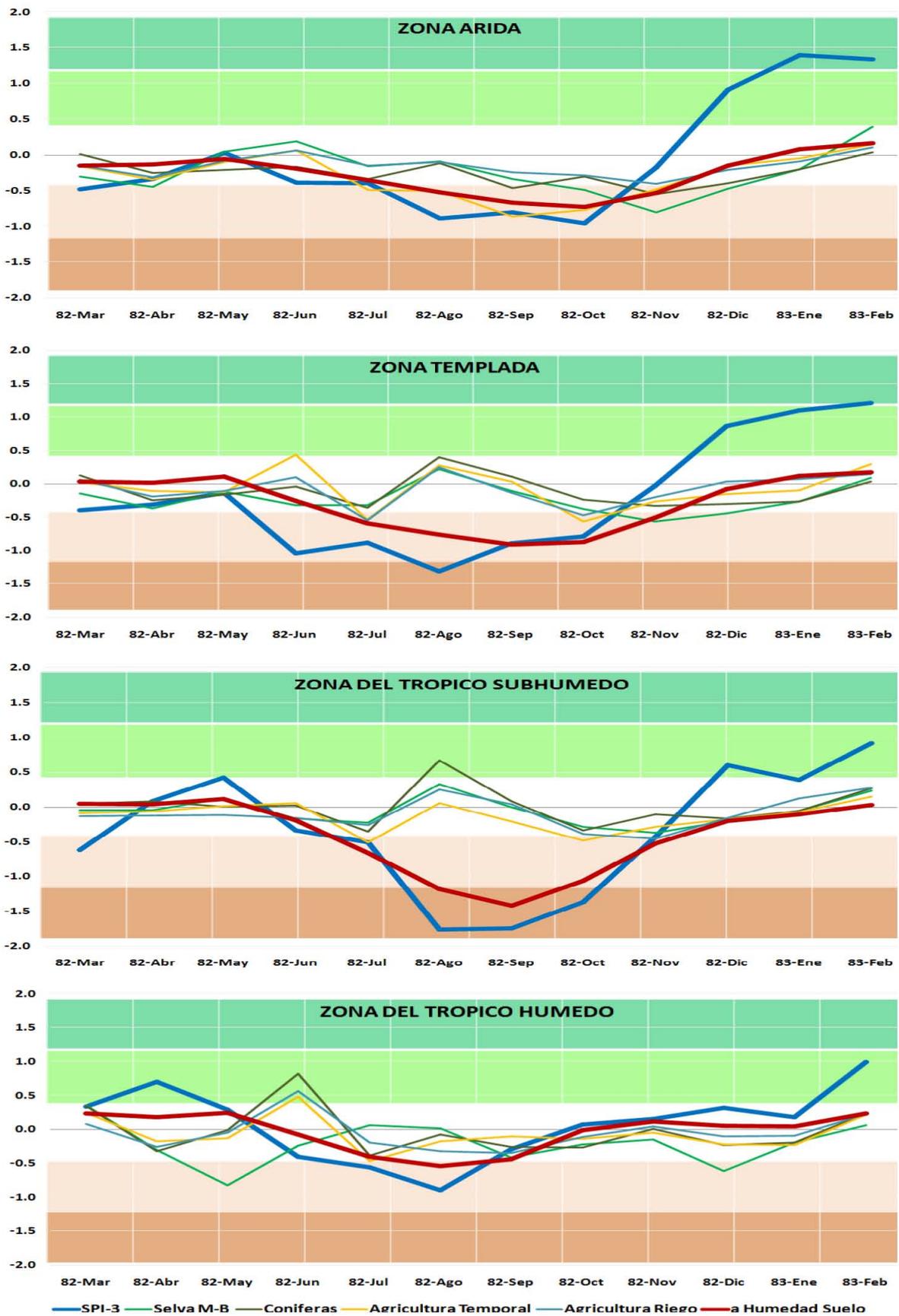


Figura 3.4. Series de tiempo por zona climática de las aNDVI/1000 de diferentes tipos de vegetación, SPI-3, y aHS/100 (marzo 1982 a febrero 1983).

Tanto en los análisis de correlación como en las series de tiempo la zona árida es donde mayor concordancia existe entre SPI-3 y aNDVI, también es donde se presenta el mayor estrés hídrico en la vegetación durante este período. La sequía inicia en junio y termina en noviembre de 1982, mientras que la vegetación continúa en condiciones de estrés un mes después, de esta manera se puede determinar que la resiliencia de la vegetación para las zona más seca del país es del orden de un mes. Las aHS tienen una relación temporal casi paralela con las aNDVI lo que muestra que la humedad del suelo juega un papel determinante para las zonas áridas de México.

La agricultura de temporal es el uso de suelo que mayor efecto negativo presentó para este período teniendo su mínimo en septiembre y regresando a condiciones normales tres meses después, lo que indica una menor resiliencia. Sin embargo la anomalía negativa de NDVI en agricultura se traduce en pérdida del cultivo y en un impacto fuerte en la economía de quienes se dedican a esta actividad en la zona árida de México.

Para la zona templada la sequía se presenta desde junio hasta octubre. Es de considerar que dentro del periodo de sequía en junio se registro un ligero aumento, el cual fue suficiente para que todos los ecosistemas reaccionaran positivamente y regresaran a condiciones normales, con este aporte de lluvia dentro del periodo de sequía los ecosistemas logran sostenerse dos meses más hasta que la persistencia de la sequía hace efecto en las aNDVI en octubre que corresponde a dos meses después del mínimo de lluvias, este retrasó en el impacto podría estar relacionado al aporte de lluvia acumulado de junio, lo que genera la idea que la vegetación reacciona más rápidamente a el aporte de lluvia que al déficit. El ligero aporte de humedad de julio no se refleja claramente en las aHS por el alto grado de evaporación que se genera durante los periodos de sequía debido a la intensa insolación característica de cielos despejados.

La precipitación regresa a condiciones normales en noviembre y para diciembre las aNDVI muestran condiciones cercanas a lo normal, lo que habla

de la alta resiliencia de los ecosistemas en la zona templada del país. Las selvas bajas y medias son la vegetación que se mantienen en estrés hídrico durante octubre, noviembre y diciembre, lo que indica que pueden ser éstas las más vulnerables ante sequía en esta región.

El mayor déficit de precipitación (cerca del -2 SPI-3 en promedio) para el período de sequía 1982-83 se presentó en la zona del trópico subhúmedo, con escasas lluvias en agosto, las comunidades vegetales se encontraron en situación normal dentro de los meses de mayor sequía y los efectos se percibieron dos meses después. Esto sugiere que la vegetación reacciona al déficit de lluvia más lento (de uno a dos meses) que al aporte de lluvia (un mes). Las condiciones normales de lluvia se registran en noviembre y para diciembre las aNDVI regresaron a condiciones normales cumpliendo con el periodo de un mes de respuesta. La humedad del suelo y la lluvia muestra el desfase de un mes en los mínimos (agosto y septiembre), pero con un comportamiento casi paralelo durante todo el periodo de sequía, esto sugiere que el suelo retiene poca humedad en condiciones de sequía para esta zona y depende de los aportes de lluvia en su totalidad.

Las lluvias normales y arriba de lo normal en los meses de marzo abril y mayo en la zona del trópico húmedo, aportan la humedad suficiente para que los ecosistemas se mantengan en condiciones normales los primeros meses de sequía (junio y julio). Al igual que en todo el país en esta zona se registra el mínimo del acumulado de lluvias en agosto (cercano a -1 SPI-3 en promedio) y los efectos en aNDVI se perciben un mes después en septiembre. Las lluvias regresan de forma normal para septiembre en el trópico húmedo y los efectos en aNDVI son en octubre, lo que indica nuevamente al igual que en otras zonas climáticas del país que los ecosistemas reaccionan más rápidamente al aporte de humedad que al déficit. Las selvas presentan dos mínimos de aNDVI, uno en mayo y otro en diciembre, ambos eventos no muestran una clara relación con las condiciones de lluvias ni de humedad del suelo y pueden estar más relacionados con variables ajenas a las condiciones climáticas como lo marca los resultados de correlación, en que se muestra como las selvas en el trópico

húmedo son los ecosistemas menos relacionados con la variable SPI-3 durante evento *El Niño* (Figura 3.1).

Se puede inferir que si las lluvias de abril, mayo y junio se dan de forma normal o superiores a lo normal antes de un evento de sequía intenso dentro de la temporada de lluvias (julio, agosto, septiembre y octubre), puede esperarse que los ecosistemas resistan la sequía los primeros meses. Por el contrario, al continuar el déficit de lluvia en verano, los ecosistemas sufren estrés hídrico. Así, es fundamental que las lluvias al final del año producto de una mayor actividad de frentes fríos característicos de años *El Niño*, se presenten, para que los ecosistemas puedan obtener la humedad que no les fue proporcionada meses antes.

La sequía de 1982 tuvo una extensión espacial de escala casi nacional, sin que las fronteras naturales como la orografía o el tipo de vegetación tuvieran influencia. El SPI-3 y las aNDVI no tienen una relación exacta con los elementos que regulan la salud de los ecosistemas ajenos a la lluvia. Aun así, por medio de las series de tiempo se puede determinar qué: el desfase entre uno y dos meses de las condiciones de lluvia (SPI-3) y el estrés hídrico de la vegetación (aNDVI) en un período de sequía intenso se identifica una relación espacial importante (Figura 3.5).

Las aHS reflejan la distribución de la sequía a nivel de superficie. Este déficit de humedad se distribuyó de forma extensa en el territorio nacional en septiembre de 1982. El patrón se ve reflejado en estrés hídrico de los ecosistemas para octubre de 1982 (Figura 3.6).

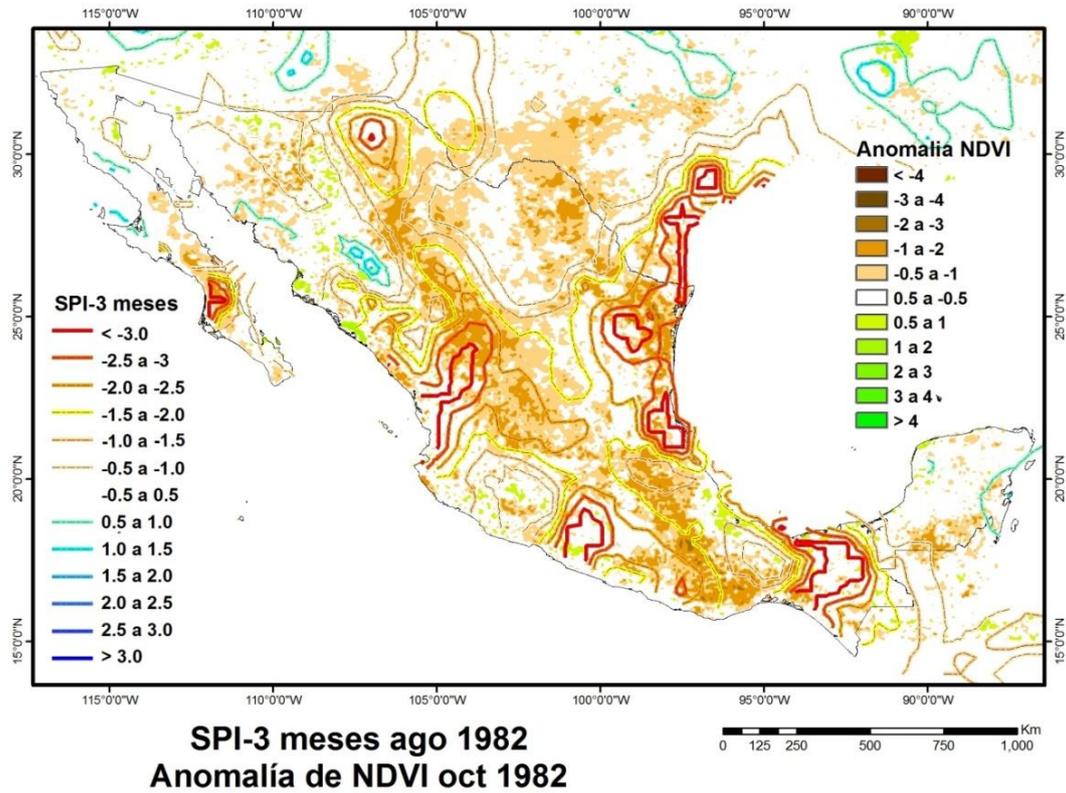


Figura 3.5. Distribución del SPI-3 para agosto 1982. Los colores sólidos corresponden a las aNDVI para octubre 1982, es decir con un desfase de dos meses.

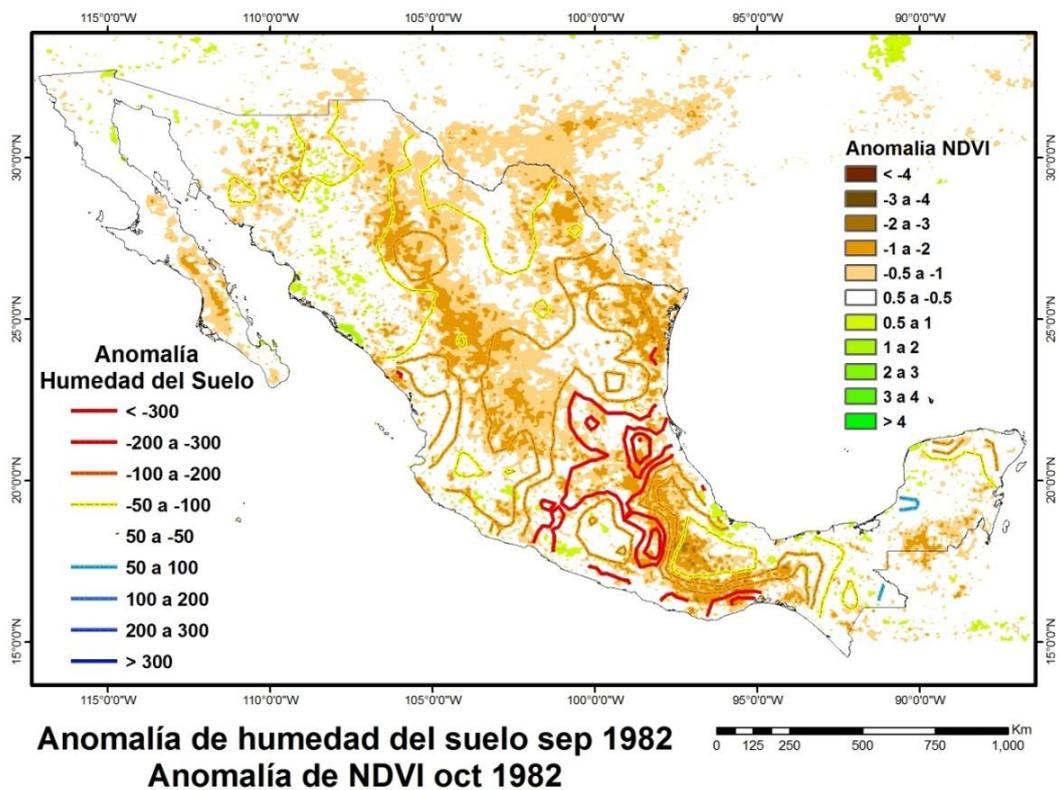


Figura 3.6. Distribución de las aHS para septiembre 1982. Los colores sólidos corresponden a las aNDVI para octubre 1982, es decir con desfase de un mes.

Los impactos en la vegetación de la sequía meteorológica de 1982, resultado de uno de los eventos de *El Niño* más intensos del siglo XX, son identificados en los patrones de las aNDVI, lo que determina en gran medida las dimensiones en extensión e intensidad de una de las sequías más importantes que se registraron en décadas recientes, considerada solo por debajo de la ocurrida en 1998.

3.3. Impacto de la sequía de 1998

Se considera que *El Niño* 1997-98 fue el más intenso del siglo XX (Figura 1.3). Las anomalías de temperatura para diciembre de 1997 fueron por encima de 5 °C (Figura 3.7).

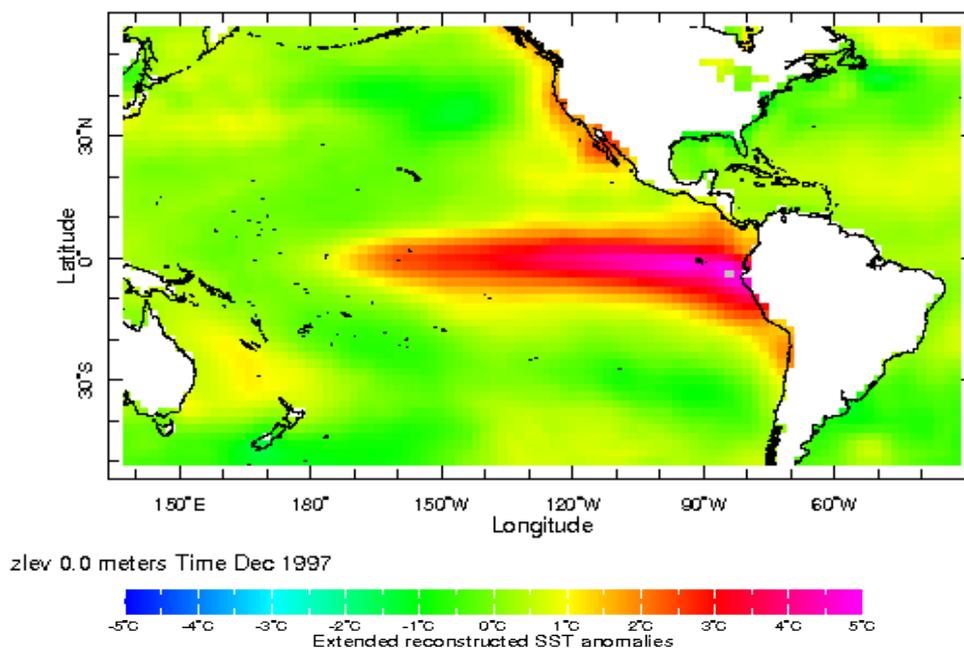


Figura 3.7. Anomalía de temperatura superficial del mar (SST). Evento de *El Niño* diciembre 1997 (tomado de IRI en: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.ERSST/.version3b/.anom/>).

Los impactos de la sequía en la temporada de lluvia de 1998, se presentaron en las cuatro grandes regiones climáticas de México y afectaron a todos los tipos de vegetación. Los efectos causados por la sequía se analizan por medio de series de tiempo del período enero 1998 a noviembre 1998 y son mostrados en la figura 3.8.

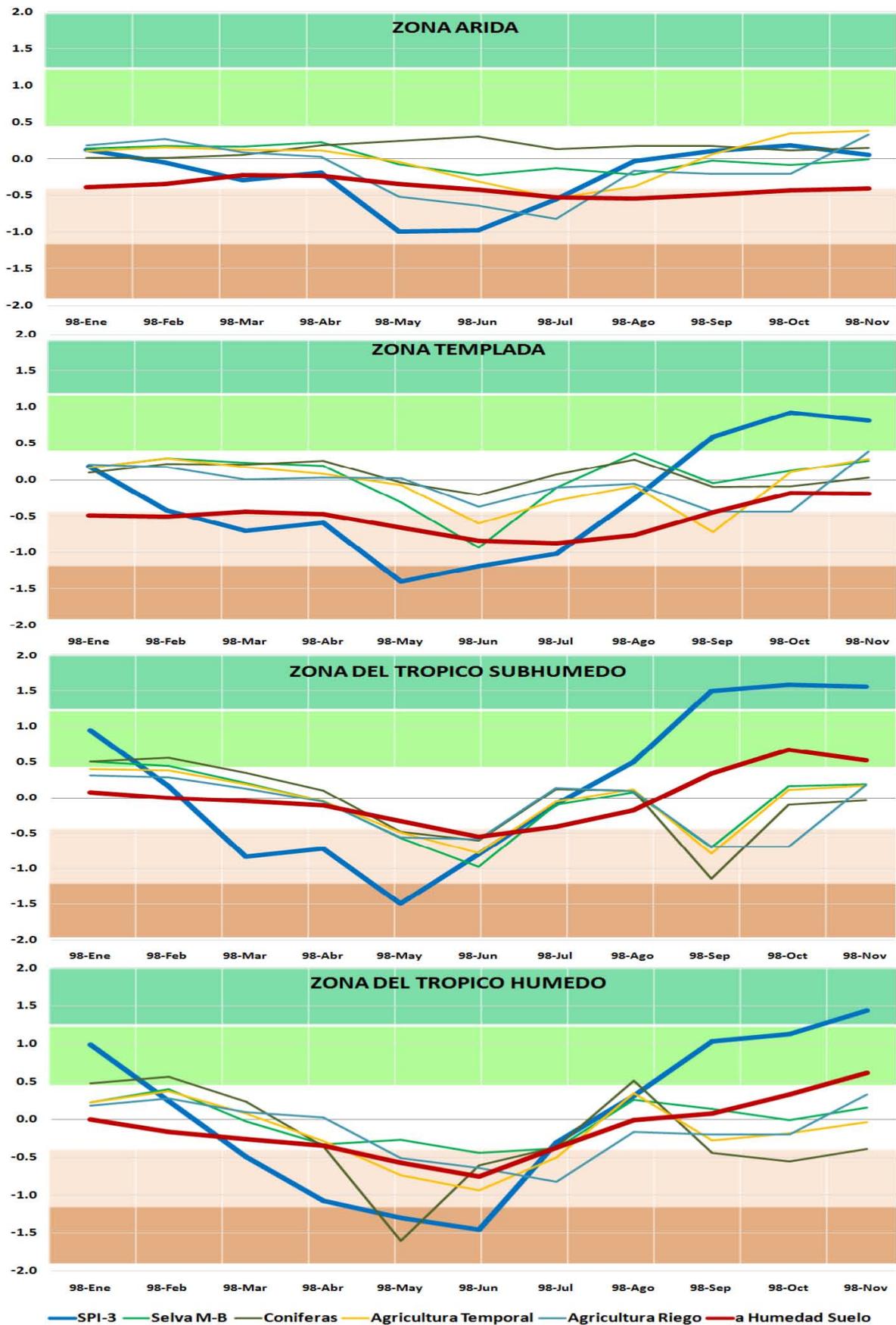


Figura 3.8. Series de tiempo por zona climática de las aNDVI/1000 de diferentes tipos de vegetación, SPI-3, y aHS/100 (enero 1998 a noviembre 1998).

La sequía de mediados de 1998, para la zona árida fue intensa desde mayo (-1 SPI-3 en promedio), los impactos en los ecosistemas se presentan dos meses después (julio) principalmente para la agricultura (temporal y riego), esto puede deberse al manejo que tienen las zonas agricultoras a diferencia de las selvas y los bosques de coníferas.

A diferencia de la sequía de 1982 las lluvias de abril y mayo en 1998 fueron por debajo de lo normal, esto no permitió que la agricultura tuviera los reservorios de agua suficientes para afrontar los meses de sequía (mayo, junio y julio). La humedad del suelo durante todo el período de sequía se presentó por debajo de las condiciones normales (-0.5 en promedio), lo que intensificó el efecto de la sequía. Las lluvias regresaron a condiciones normales en agosto permitiendo que, un mes después, todos los ecosistemas regresen a condiciones normales, no así la agricultura que se recuperó dos meses después.

En la zona templada la sequía se presenta desde principios del año (febrero a julio), esto propicia que los ecosistemas no cuenten con ningún aporte de humedad y sean afectados en mayor proporción. En esta zona el mínimo de valores SPI-3 se dieron en mayo y los efectos se percibieron un mes después en junio para todos los tipos de ecosistemas especialmente las selvas y la agricultura de temporal.

El trópico subhúmedo estuvo bajo sequía intensa de marzo a junio con el mínimo en lluvias durante mayo (-1.5 SPI-3 en promedio) y el mayor estrés hídrico un mes después en junio, todos los tipos de ecosistemas resultaron dañados. Debido a lo anterior, se registraron incendios en gran parte de la zona del trópico húmedo afectando cerca de 230,000 ha (CONAFOR, 2006). Las lluvias empiezan a recuperarse en junio y para el mes de julio todos los tipos de ecosistemas regresan a condiciones normales, lo que indica una alta resiliencia en esta zona climática, pero los impactos en incendios, pérdidas agrícolas y escases de agua fueron importantes. A pesar que de julio a septiembre las condiciones de lluvia son normales e incluso por arriba de lo normal, se

presenta nuevamente estrés hídrico en los ecosistemas, estas condiciones no se pueden explicar por medio de la lluvia ni la humedad del suelo, lo que indica que existen otros procesos ajenos a las condiciones climáticas que influyeron para generar tales condiciones.

La zona del trópico húmedo resultó afectada por sequía intensa en la mayor parte del territorio desde marzo hasta julio, el mínimo en las lluvias (-1.5 SPI-3 en promedio) se presentó en junio, al igual que el mayor estrés hídrico en la vegetación, esto debido a que al acumularse el déficit de lluvia desde marzo los ecosistemas reaccionaron de forma más rápida (menos de un mes), como se ha visto en todas las zonas climáticas, esto es determinante para estimar el tiempo en que los ecosistemas reaccionen a un déficit intenso de sequía (< -1 SPI-3 en promedio por zona). Los bosques de coníferas en la zona de trópico húmedo resultaron ser los más afectados en el mes de mayo. Las lluvias se recuperan y los ecosistemas regresan a valores normales en julio casi inmediatamente que las precipitaciones regresan a la normalidad, lo que habla de la gran resiliencia de la vegetación en el trópico húmedo, con excepción de la agricultura de riego, que regresa a condiciones normales hasta agosto.

La sequía de 1998 se presentó en todas las zonas climáticas de México. En el mes de junio el déficit de precipitación fue intenso, menor de -2 SPI-3, considerado por el *National Drought Mitigation Center* (2006) como valores de sequías excepcionales, los efectos en el estrés hídrico de la vegetación se percibe un mes después (julio), por efecto de la sequía acumulada desde febrero y marzo (Figura 3.9).

Los valores más críticos durante el periodo de estudio de las aHS, se presentaron principalmente en el centro-este del territorio nacional, en estados como: Tamaulipas, Veracruz Tlaxcala y Puebla (Figura 3.10).

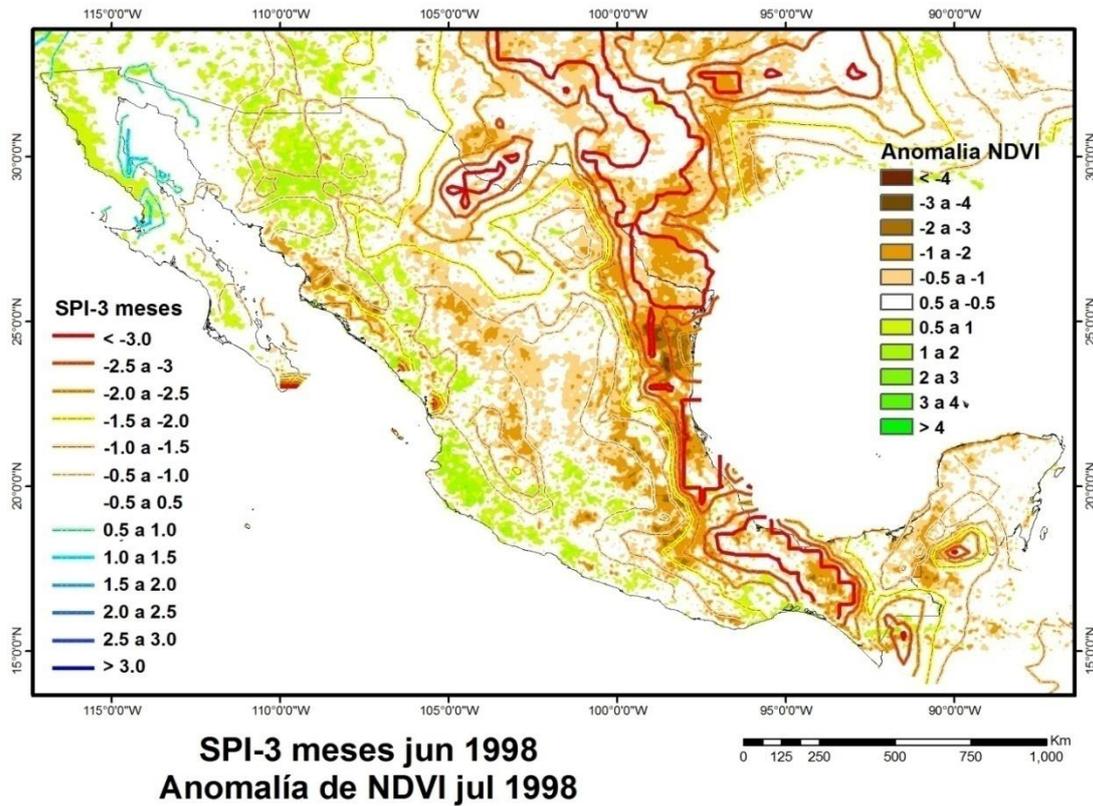


Figura 3.9. Distribución nacional del SPI-3 (junio 1998) y desfase de un mes de las aNDVI (julio 1998).

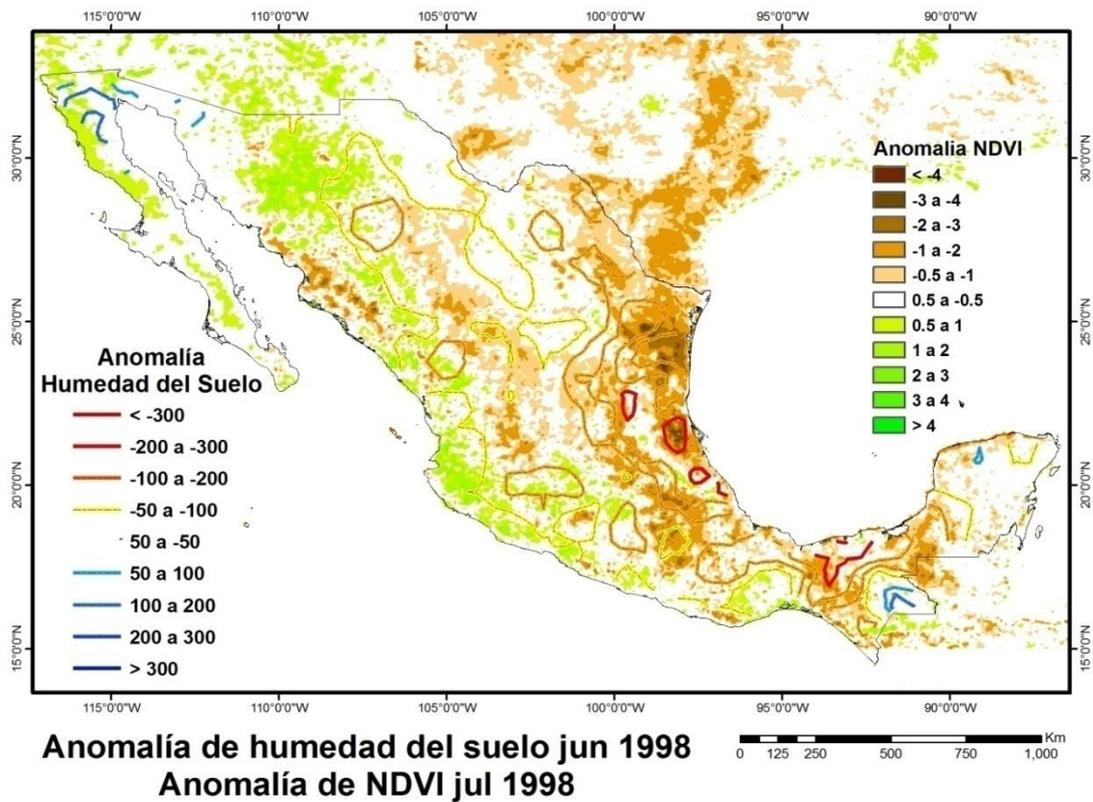


Figura 3.10. Distribución nacional de las aHS junio 1998) y desfase de un mes de las aNDVI (julio 1998).

Al terminar la sequía de 1998 se presentaron meses anormalmente húmedos al final del año, debido a que las lluvias de invierno se intensifican durante años de *El Niño*, aunque esto ocurrió en este año no siempre se debe esperar esta respuesta, principalmente cuando se analizan los cambios a nivel regional (Magaña et al., 1997). Inclusive, durante *El Niño* de 1982-83, aunque se presentaron lluvias invernales por encima de lo normal, el evento tuvo un impacto aparentemente menor al del invierno de 1998-99.

Capítulo 4

Análisis de resultados y conclusiones

4.1. Discusión. La sequía en México

La combinación de las sequías meteorológicas (resultado de las variaciones naturales del clima) con el crecimiento de las actividades económicas de alto impacto negativo al ambiente, generan un riesgo que con frecuencia se convierte en desastre ambiental. Cuando los efectos negativos se dan en forma encadenada, el riesgo se materializa en pérdidas de cosechas, disminución de los recursos hídricos (ríos, lagos, embales, mantos acuíferos, etc.), aumento en incendios forestales y degradación de los ecosistemas esto lleva a conflictos sociales.

México es un país altamente vulnerable a condiciones climáticas extremas en sus actividades socioeconómicas y en el manejo de recursos naturales por el nulo uso de información climática en la planeación. La ausencia de precipitaciones pluviales en el territorio nacional ha producido a lo largo de los años diversos perjuicios, lo que repercute en el deterioro económico de la población afectada y en casos extremos, induce a la pauperización de la población (Bitrán, 2001). Disminuir los impactos negativos de fenómenos naturales como las sequías es fundamental si se aspira a crecer sustentablemente. La sustentabilidad o sostenibilidad requiere que lo económico, lo social y lo ambiental tengan el mismo peso. El cuidado de los recursos naturales debe considerarse prioritario en un mundo de cambio global por los servicios ambientales que ofrecen los ecosistemas los cuales son garantía de calidad de vida.

El presente estudio ha mostrado que con análisis básicos es posible aprovechar los avances en materia de monitoreo de clima y ecosistemas para realizar un manejo que reduzca desastres. El conocimiento sobre desfases

entre precipitaciones, cambios de humedad de suelo y estrés hídrico en la vegetación permite que con la vigilancia del clima se pueda analizar el riesgo en ecosistemas y actuar preventivamente. El desfase de uno a dos meses debiera permitir diseñar e implementar acciones cuando se diagnostican condiciones de sequía por ejemplo. Si se usa información de pronóstico climático, las posibilidades de manejo de agroecosistemas se amplían enormemente, sobre todo cuando se trabaja bajo el principio de precautoriedad.

Algunos de los potenciales impactos del cambio climático descritos en el Cuarto Informe del IPCC (2007), corresponden a cambios en los patrones biológicos de la vegetación como son la época de la floración y crecimiento, corrimiento espacial de las especies y aumento en el estrés hídrico de la vegetación. Tanto a escalas locales como regionales, los mecanismos de estrés de los ecosistemas asociados con cambios en el clima se hacen más evidentes cuando no se usa la información climática en la gestión de riesgo. Aun con un manejo más adecuado de los ecosistemas, la comunidad científica mexicana se plantea cómo serán los impactos del cambio climático en ecosistemas mexicanos. Las pruebas de su resiliencia se tienen en eventos de sequías de gran magnitud del pasado (sequía de los años cincuenta). Sin embargo, la vulnerabilidad actual aumenta y por tanto los impactos son de mayor magnitud.

En esta investigación se mostró que en México los ecosistemas reaccionan más lentamente al déficit de lluvias (entre uno y dos meses), sí a principios de año son normales o por encima de lo normal. Los efectos de una sequía intensa en la época de lluvias son suavizados durante los primeros meses, debido a la humedad que se conserva en el suelo y esto aumenta la resistencia de cada ecosistema. Sin embargo, si se presenta un déficit de lluvias continuo desde finales de verano hasta los primeros meses del año se llega a una sequía antes del periodo de lluvia con efectos más rápidos e intensos. Tal es el caso del 2011 en gran parte de México.

Por lo general, al presentarse sequía de verano por el desarrollo de condiciones *El Niño*, aumentan las probabilidades de lluvias invernales, principalmente en el norte, que compensan en alguna medida las condiciones secas previas. Durante *La Niña*, por el contrario, las lluvias de verano tienden a ser abundantes pero el invierno en el norte tiende a ser muy seco (Magaña, 1999). Sin embargo, los efectos de cambio climático parecen manifestarse en un ciclo anual intensificado con lo que el periodo seco o lluvioso de invierno o de verano se puede convertir en condición climática extrema al combinar variabilidad natural del clima de escalas interanuales, interdecadales y tendencias de cambios en el clima.

Aunque el discurso oficial hace con frecuencia referencia a la necesidad de prevenir los desastres, es claro que el “paradigma naturalista” constituye aun la forma de respuesta más común entre responsables de sectores o de gobierno, que no considera adecuadamente el concepto de riesgo. Si bien los estudiosos del ambiente han señalado la falta de prevención de desastres como un problema serio en nuestro país es necesario analizar en dónde están algunas de las causas de la falta de acción. Así, uno puede preguntarse el por qué no se han aprovechado los avances en materia de pronóstico del tiempo y del clima de décadas recientes. Sin duda, se trata de la falta de desarrollo de capacidades para realizar una verdadera gestión de riesgo en donde se tomen en cuenta las características de la amenaza y de la vulnerabilidad. El trabajo en esta dirección requiere de la participación de diversos especialistas, desde aquellos encargados de elaborar los diagnósticos y pronósticos, pasando por los especialistas del sector, los medios de comunicación e incluso diversas organizaciones de la sociedad civil.

Es bien sabido que el fenómeno de *El Niño* o *La Niña* es recurrente por lo que debiera ser parte de la gestión de riesgo en cualquier sector dependiente del clima. Aunado a estudios de sus impactos, el manejo de pronósticos climáticos estacionales y una adecuada planeación basada en estrategias preventivas (no solo reactivas), debe formar parte de las acciones de reducción de la vulnerabilidad en diferentes socioecosistemas ante sequías.

Con frecuencia, los gobiernos consideran a las sequías fenómenos raros y casuales, intrínsecamente impredecibles, encontrándose así, no preparados para afrontarlas cuando suceden. Una valoración y reacción eficaz a las sequías requiere una planificación de gran alcance; un difícil cometido para la mayor parte de los gobiernos (Wilhite, 1992). La sociedad y el gobierno deben generar la capacidad de enfrentar un evento de sequía intenso integrando un conjunto de estrategias preventivas lo que paulatinamente permitiría transitar al desarrollo de una sociedad mejor preparada y adaptada a las condiciones variantes del clima (Landa, Magaña y Neri 2008).

Independientemente de la comprensión de la dinámica de la sequía, se deben implementar medidas para disminuir sus impactos las cuales pueden incluir: implementación de una política sustentable de manejo de los recursos hidráulicos para mejorar las condiciones socioeconómicas de la población, que incluya reducción de la vulnerabilidad a períodos secos, regulación de los procesos de urbanización y la promoción de la investigación científica sobre este fenómeno y sus impactos.

México cuenta con fondos para la reacción ante los impactos de fenómenos naturales como el FONDEN (Fondo de Desastres Naturales) y el FAPRACC (Fondo para Atender a la Población Rural Afectada por Contingencias Climatológicas). Aunado a los fondos anteriores el Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006 promueve la formación del Fondo de Prevención de Desastres Naturales (FOPREFEN) el cual prevé como una estrategia global, transitar de un sistema de protección civil reactivo a uno preventivo con la corresponsabilidad y participación de los tres órdenes de gobierno, población y sectores social y privado (SEGOB, 2003).

4.2. Algunas acciones de la gestión de riesgo ante sequía

Cualquier evaluación de sequía y sus impactos, requiere especificar la escala de tiempo en la que es considerada, extensión, intensidad y duración. La magnitud del impacto final es siempre dependiente de la escala de tiempo (McKee et al, 1993). La lógica que se tiene que seguir es, que en cuanto más tiempo la sequía persiste sin una recarga de agua, peor es la magnitud del impacto, debido que la evaporación se sigue produciendo. Para identificar la evolución de la sequía meteorológica en tiempo y espacio, su monitoreo es primordial, de esta manera se puede dar seguimiento al fenómeno desde su inicio para identificar la extensión, estimar la intensidad y dependiendo de la duración poner en marcha los planes de acción ante contingencia climática.

Un ejemplo del monitoreo de sequía es el Monitor de Sequía de América del Norte (NADM, por sus siglas en inglés), el cual es un esfuerzo cooperativo entre los expertos en sequía de Canadá, México y Estados Unidos para monitorear la sequía en todo el continente de manera permanente (Figura 4.1).

Monitor de Sequía de América del Norte

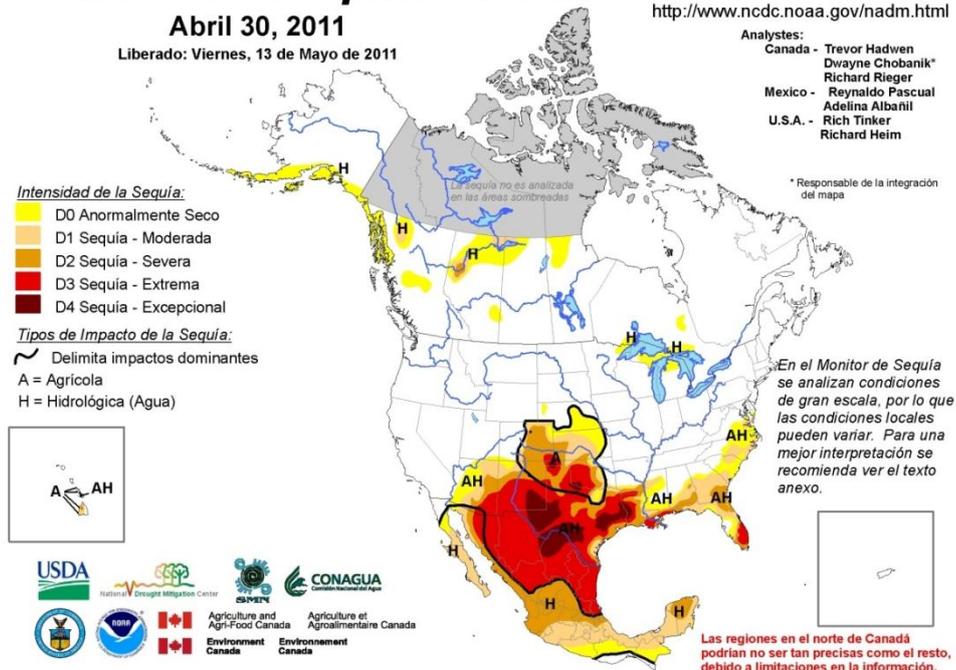


Figura 4.1. Ejemplo del Monitor de Sequía de América del Norte para el mes de abril de 2011.

El monitoreo de sequía es importante, pero de igual forma debería de serlo el monitoreo de las variables relacionadas con la sequía, como la humedad del suelo, el escurrimiento, las temperaturas, el verdor de la vegetación, los vientos, la nubosidad, etc., ya que de estas variables se pueden determinar los impactos potenciales de la sequía.

El monitoreo local de los efectos de la sequía en los ecosistemas vegetales a nivel de quincena es posible gracias a datos de NDVI, información que debe ser actualizada y estar no solo disponible de forma libre en internet (ejemplo la base de datos USGS LandDAAC MODIS version_005 SNA NDVI, 1km x 1km de resolución espacial proporcionada por el IRI mediante su página web), sino desplegada en el contexto de información para la toma de decisiones.

Es fundamental el monitoreo de sequía y de todas las variables involucradas, pero resulta ser más eficaz si se combina adecuadamente con los pronósticos climáticos estacionales, para así estructurar planes de acción con meses de anticipación a la presencia de sequía.

En resumen, la combinación de investigación de los impactos de una sequía para identificar la vulnerabilidad, el monitoreo y una adecuada alerta temprana con base en el pronóstico climático, puede ser una adecuada metodología para disminuir los efectos de las sequías.

En el trabajo de Neri (2010) se abarca ampliamente como se desarrolla un plan de acción para reducir los riesgos causados por sequías centrado en un Sistema de Alerta Temprana ante Sequías (SIATS) para México, la investigación incluye los mecanismos, procedimientos y acciones institucionales que permitirían avanzar en la gestión para la reducción del riesgo ante sequías.

4.3. Conclusiones

Los índices de sequía en paralelo con los índices de vegetación, son herramientas útiles para la caracterizar la sequía y sus efectos en los ecosistemas vegetales. Los patrones de las aNDVI reflejan en gran medida las condiciones de la humedad del suelo.

Paradójicamente el hecho de que el ciclo *ENOS* sea el principal causante de la presencia de sequías intensas en México durante el verano o invierno, también puede llevar a precipitaciones extremas (Magaña, 1999), lo que compensa de cierta forma la sequía, pero dejando a mitad del año efectos graves en los ecosistemas y las actividades socioeconómicas. Combinar esta información sobre variaciones interanuales con la de variaciones interdecadales y tendencias de cambio climático debe comenzar a ser parte de la estrategia de gestión de riesgo en ecosistemas.

Las medidas de reducción de riesgo ante sequías deben incluir apartados para reducir la vulnerabilidad de los sistemas sociales, debido a que las poblaciones marginadas son las que más sufren los efectos de eventos meteorológicos extremos. Sin embargo, resulta fundamental tener una idea de la resiliencia y de la resistencia de diversos socioecosistemas en México. Así, es válido preguntar cuánto estrés hídrico y por cuánto tiempo pueden resistir diversos tipos de vegetación (natural o antrópica) antes de sucumbir a los efectos de sequías prolongadas.

Los ecosistemas vegetales y la producción agrícola en México tiene una gran dependencia de los factores climáticos (principalmente la precipitación pluvial), lo que los hace altamente vulnerable al retraso, irregularidad o deficiencia persistente de la lluvia. La investigación en la materia tiene un gran reto, al tratar de descubrir los procesos de interacción entre clima y ecosistema en un clima cada vez más extremo, por lo que iniciar estrategias de monitoreo que lleven al entendimiento de procesos resulta un paso fundamental.

Referencias bibliográficas

- Agnew C. T., 2000: *Using the SPI to Identify drought*. Drought Network News. Winter 1999–Spring 2000. Vol. 12, No. 1, pp 6-12.
- Al-Bakri J.T. y Suleiman A.S., 2004: NDVI response to rainfall in different ecological zones in Jordan. *International Journal of Remote Sensing*. 19:3897–3912.
- Aseguradora Agrícola Mexicana (AGROASEMEX), 2006: *La experiencia mexicana en el desarrollo y operación de seguros paramétricos aplicados a la agricultura*. Documento preliminar para discusión.
- Bitrán B. D., 2001: *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99*. Serie impacto socioeconómico de los desastres en México. CENAPRED. México.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2002: *Sequías* Fascículo No. 14. México.
- Cervantes Z. Y., Cornejo O. S. L., Lucero M. R., Espinosa R. J. M., Miranda V. E. y Pineda V. A., 1990: *Clasificación de Regiones Naturales de México*. IV. 10. 2. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1: 4,000,000.
- Chen M., Xie P., Janowiak J. E. y Arkin P. A., 2002: *Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations*. *Journal of Hydrometeorology*. 3, 249-266.
- Comisión Nacional forestal (CONAFOR), 2006: *Serie histórica de incendios 1970-2005*. Informes históricos de incendios forestales.
- Comisión Nacional forestal (CONAFOR), 2008: *Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores*. Zapopan, Jal. 58 pp.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 1999: *Uso de suelo y vegetación modificado por CONABIO*. Escala 1: 1000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), 2010: *Estrategia de Cambio Climático para Áreas Protegidas*. Semarnat. México.
- Climate Research Unit (CRU), 2007: *High-resolution gridded datasets*. University of East Anglia. <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>
- De La Casa A. y Ovando G., 2006: *Relación entre la precipitación e índices de vegetación durante el comienzo del ciclo anual de lluvias en la provincia*

de Córdoba, Argentina. Revista de Investigaciones Agropecuarias. 35: 67-85.

Delgadillo M. J., Aguilar O. T. y Rodríguez V. D., 1999: *Los aspectos económicos y sociales de El Niño (1999)*. . En: Magaña V. (Editor), Los impactos de *El Niño* en México. Secretaría de Gobernación. México, D.F. pp 181-210.

Dracup J.A., Lee K. S. y Paulson E. G., 1980: *On the definition of droughts*. Water Resources Research. Vol.16 No. 2 pp. 297-302.

Erasmí S., Propastin P., Kappas M. y Panferov O., 2009: *Spatial Patterns of NDVI Variation over Indonesia and Their Relationship to ENSO Warm Events during the Period 1982–2006*. Journal of climate. Vol. 22, 6612-6623.

Fan Y., y van den Dool H., 2008: *A global monthly land surface air temperature analysis for 1948–present*. Journal of Geophysical Research, 113.

Galván O. L., 2007: *Aplicación del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) en la detección de sequías históricas en México (1920-2000)*. Tesis de Licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM.

García A. V., 2006: *Estrategias adaptativas y amenazas climáticas*. En: Urbina S. J. y Martínez F. J. (compiladores), Más allá del cambio climático. Las dimensiones psicosociales del cambio ambiental global.

Gómez M. L., 2007: *Variabilidad climática y cambio de uso de suelo en la sierra norte de Oaxaca: implicaciones en los escenarios de cambio climático*. Tesis de doctorado en Geografía. UNAM.

Gómez M. L., Galicia L., Cuevas F. M., Magaña V., Gómez G. y Palacio P. J., 2008: Assessing onset and length of greening period in six vegetation types in Oaxaca, Mexico, using NDVI-precipitation relationships. International Journal of Biometeorology. 52: 511-520.

Guttman N. B., 1999: *Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm*. Journal of the American Water Resources Association, Vol. 35, No. 2, 311- 323.

Gilabert M. A., González P. J. y García H. J., 1997: *Acerca de los Índices de Vegetación*. Revista de Teledetección. 8:1-10.

Hayes M. J., 1998: *Drought indices*. National Drought Mitigation Center, Lincoln, Nebraska.

Huang J., van den Dool H. y Georgakakos K.P., 1996: *Analysis of Model-Calculated Soil Moisture over the United States (1931-93) and*

Application to Long-Range Temperature Forecasts. Journal of Climate, Vol.9, No.6

Huete A. R., 1988: *A soil-adjusted vegetation index*. Remote Sensing of Environment. 25: 295-309.

Intergovernmental Panel on Climate Change (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.

Jackson R. D., Pinter P. J., Jr., Reginato R. J. y Inso S. B., 1980: *Hand-held radiometry*. United States Department of Agriculture ARM-W-19, 66 pp.

Jensen J. R., 1983: *Biophysical Remote sensing – Review Article*. Annals of the Associations of American Geographers, t. 73, nr 1, pp. 111-132.

Landa R., Magaña V. y Neri C., 2008: *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. SEMARNAT- UNAM, México. 133 pp.

McKee T. B., Doesken N. J. y Kleist J., 1993: *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston.

McKee, T. B., Doesken N. J. y Kleist J., 1995: *Drought monitoring with multiple time scales*. Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston.

Magaña R. V., Pérez J. L., Conde C., Gay C. y Medina S., 1997: *El fenómeno de El Niño y la oscilación del sur (ENOS) y sus impactos en México*. Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM.

Magaña R. V., (Editor), 1999: *Los impactos de El Niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México. 229 p.

Magaña R. V. y Ambrizzi T., 2005: *Dynamics of subtropical vertical motions over the Americas during El Niño boreal winters*. Atmósfera, 18, 211-234.

Manzo, L., Aguirre R. y Alvarez R., 2004: *Multitemporal analysis of land surface temperature using NOAA-AVHRR: preliminary relationships between climatic anomalies and forest fires*. International Journal of Remote Sensing. Vol. 25. No. 20. pp. 4417-4423.

Méndez P. M., 2010: *Variabilidad espacio-temporal de la sequía meteorológica en México: aspectos dinámicos*. Tesis de Doctorado en Ciencias. Posgrado en Ciencias de la Tierra. UNAM.

- Méndez P. M. y Magaña R. V., 2010: Regional aspects of meteorological droughts over México and Central America. *American Meteorological Society*. 23: 1175-1188
- National Drought Mitigation Center (NDMC), 1991: *The Basics of Drought Planning: A 10- Step Process*. University of Nebraska-Lincoln.
- National Drought Mitigation Center (NDMC), 2000: *The standardized Precipitation Index*. Manual del programa para el cálculo de SPI. University of Nebraska-Lincoln.
- National Drought Mitigation Center (NDMC), 2006: *What is Drought? Understanding and Defining Drought*. University of Nebraska-Lincoln.
- Neri V. C., 2010: *Elementos para un sistema de alerta temprana ante sequías*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. Área de riesgos por fenómenos naturales. UNAM.
- Nightingale J. M, y Phinn S. R., 2003: *Assesment of relationship between precipitation and satellite derived by vegetation condition within South Australia*. *Australian Geographical Studies*. 2:180–195.
- Palacios, P. J., Luna L. y Macías M., 1999: *Detección de incendios en México utilizando imágenes AVHRR (temporada 1998)*. *Investigaciones Geográficas*. Boletín, núm. 38. Instituto de Geografía, UNAM. México. Pp. 7-14.
- Palmer, W. C., 1965: *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, D.C.
- Paruelo J. M. y Lauenroth W. K., 1998: *Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands*. *Journal of Biogeography*. 25:721–733.
- Pearson, R. L., and L. D. Miller, 1972, Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass Prairie, Pawnee National Grassland, Colorado: 8th international symposium on remote sensing of environment, p. 1357-1381.
- Pertovt L. E., Osmar G., Wöhl C., Juliano S. y Rivas R., 2007: *Análisis de condicionantes ambientales del stress hídrico de la vegetación en el sur de Brasil mediante imágenes NOAA – AVHRR*. *TELEDETECCIÓN Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Ed. Martin, 251-256 pp.
- Richardson A. J. y Wiewand C. L., 1977: *Distinguishing vegetation from soil background information*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 43: 1541-1552.

- Rousse J. W., Haas R. H., Schell J.A y Deering, D. W., 1974: *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Proceedings, Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Greenbelt: NASA SP-351, 3010-317.
- Salinas Z. C., Douglas A. V. y Díaz H. F., 2002: *Interannual variability of NDVI in northwest Mexico. Associated climatic mechanisms and ecological implications*. *Remote Sensing of Environment*. 82:417–430.
- Sánchez R. E., Torres C. M., Palacios C. A., Aguilar A. M., Pino S. I. y Granado R. L., 2000: *Comparación del NDVI con el PVI y el SAVI como Indicadores para la Asignación de Modelos de Combustible para la Estimación del Riesgo de Incendios en Andalucía*. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible*. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá, 164-174.
- Sarukhán J., et al. 2009: *Capital Natural de México, Síntesis Conocimiento actual, evaluación, y perspectivas de sustentabilidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Secretaría de gobernación (SEGOB), 2003: *Acuerdo que establece las Reglas del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN)*. Diario oficial.
- Suplee C., 1999: *El Niño y La Niña, el círculo vicioso de la naturaleza*. *National Geographic*. Marzo 3. 4: 73-95.
- Trenberth K. E., 1997: *The definition of El Niño*. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 78: 2771-2777.
- Tucker, C.J., Pinzon J.E. y Brown M.E. 2004: *Global Inventory Modeling and Mapping Studies*, NA94apr15b.n11-VIg, 2.0, Global Land Cover Facility, University of Maryland, College Park, Maryland, 04/15/1994.
- van den Dool h., Huang J. y Fan Y., 2003: *Performance and analysis of the constructed analogue method applied to U.S. soil moisture over 1981–2001*. *Journal of Geophysical Research*. vol. 108, no. d16, 8617.
- Verdin J., Funk C., Klaver R. y Roberts D., 1999: *Exploring the correlation between Southern Africa NDVI and Pacific sea surface temperatures: results for the 1998 maize growing season*. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 20 No. 10, 21117-2124.
- Wang W., Anderson B. T., Phillips N., Kaufmann R. K., Potter C. y Myneni R. B., 2006: *Feedbacks of Vegetation on Summertime Climate Variability over the North American Grasslands. Part I: Statistical Analysis*. *Earth Interactions*. Vol. 10 No. 17.
- Wilks D.S., 1995: *Statistical methods in the atmospheric sciences: An introduction*. Academic Press, San Diego, US.

- Wilhite, D. A., 1992: *Planificación de la sequía: interrumpir el ciclo hidro-ilógico*. STOP Disasters. Num. 9. Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales.
- Wilhite D. A., 1997: *Improving Drought Management in the West: The Role of Mitigation and Preparedness*. National Drought Mitigation Center, Lincoln, Nebraska U.S.A.
- Wilhite D. A. y Svoboda M. D., 2000: *Drought Early Warning Systems in the Context of Drought Preparedness and Mitigation*. National Drought Mitigation Center, Lincoln, Nebraska U.S.A.
- World Meteorological Organization (WMO), 1975: *Drought and Agriculture*. Technical Note No. 138. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 392:138:127 pp.
- Zaitchik B. F., Macalad A. K., Bonneau L. R. y Smith R.B., 2006: *Europe's 2003 heat wave: a satellite view of impacts and land-atmosphere feedbacks*. International Journal of Climatology. 26, 743–769.