



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**RIESGO A LA SEQUÍA EN ECOSISTEMAS
FORESTALES DE MÉXICO**

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

NOÉ SAN AGUSTÍN CANALES

Bajo la supervisión de: DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS



APROBADA



Chapingo, Estado de México, septiembre de 2023.

RIESGO A LA SEQUÍA EN ECOSISTEMAS FORESTALES DE MÉXICO

Tesis realizada por **NOÉ SAN AGUSTÍN CANALES** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

ASESORA:



DRA. MA. AMPARO MÁXIMA BORJA DE LA ROSA

ASESORA:



DRA. MA. ROSA GONZÁLEZ TEPALE

ASESORA:



M.C. YADIHRA CRUZ SÁNCHEZ

CONTENIDO

<i>Índice de Cuadros</i>	<i>iii</i>
<i>Índice de Figuras</i>	<i>iii</i>
<i>Abreviaturas utilizadas</i>	<i>iv</i>
<i>Dedicatoria</i>	<i>vi</i>
<i>Agradecimientos</i>	<i>vii</i>
<i>Datos Biográficos</i>	<i>viii</i>
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	11
1.1 Antecedentes.....	13
1.2 Planteamiento del problema de investigación	14
1.3 Justificación	15
1.4 Objetivos	17
1.5 Hipótesis.....	18
1.6 Contenido temático.....	18
1.7 Referencias	19
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO Y DE REFERENCIA	22
2.1 La sequía y su medición	22
2.2 Vulnerabilidad climática	28
2.3 Sequía en ecosistemas forestales	32
2.4 Sequía en México	37
2.5 Referencias	42
CAPITULO 3. DROUGHT AND VULNERABILITY IN MEXICO'S FOREST ECOSYSTEMS	48
Abstract:	48
1. Introduction	49
2. Materials and Methods	51
3. Results.....	55

4. <i>Discussion</i>	61
5. <i>Conclusions</i>	66
6. <i>References</i>	67
SUPPLEMENTARY MATERIAL 1. ANNUAL DROUGHT MAPPING FROM 2000 TO 2020. ...	72
CAPITULO 4. CONCLUSIONES GENERALES	79

Índice de Cuadros

TABLE 3.1. SPATIAL CORRELATION CLASSES OF MUNICIPALITIES ACCORDING TO VULNERABILITY AND DROUGHT WITH NEIGHBORING MUNICIPALITIES.	59
---	----

Índice de Figuras

FIGURA 1.1. CONTENIDO ESTRUCTURAL DE LA PRESENTE TESIS.....	19
FIGURE 3.1 PRESENCE OF A) CUMULATIVE DROUGHT FOR 21 YEARS STUDIED (2000-2020) B) DROUGHT IN THE MOST SEVERE YEAR 2011 AND C) DROUGHT IN THE LEAST AFFECTED YEAR 2015.....	57
FIGURE 3.2 A) VULNERABILITY IN MUNICIPALITIES AND DIMENSIONS THAT COMPOSE IT: B) SOCIAL DIMENSION, C) ECONOMIC DIMENSION AND D) INFRASTRUCTURE DIMENSION.	58
FIGURE 3.3 A) CLASSES OF VULNERABILITY TO DROUGHT IN MUNICIPALITIES OF MEXICO AND B) TYPES OF DOMINANT FOREST COVER. RED COLORS REFER TO HIGH-HIGH CORRELATION BETWEEN DROUGHT AND VULNERABILITY (HH), GREEN TO HIGH DROUGHT AND LOW VULNERABILITY CORRELATION (HL), PURPLE TO LOW DROUGHT AND HIGH VULNERABILITY CORRELATION (LH) AND GRAY TO NO SIGNIFICANCE BETWEEN DROUGHT AND VULNERABILITY (NS).	60
FIGURE 3.4 TYPE OF DROUGHT (TOP) AND TYPE OF VULNERABILITY (BOTTOM) IN FOREST AREAS OF MEXICO ACCORDING TO REGION: (A) AND (D) TEMPERATE, (B) AND (E) TROPICAL, (C) AND (F) SEMIARID.....	61

Abreviaturas utilizadas

Abreviatura	Significado
SPI-12	Standardized Drought Index 12 months
DVI	Drought Vulnerability Index
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ETP	Evapotranspiración Potencial
SPI	Standardized Drought Index
WMO	World Meteorological Organization
CDMX	Ciudad de México
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification
CDI	Crop Drought Index
SDI	Soja Drought Index
VCI	Vegetation Condition Index
SPEI	Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index
PDSI	Palmer Drought Severity Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
LAI	Leaf Area Index
BT	Brightness Temperature
LST	Land Surface Temperature
SSM	Surface Soil Moisture
DSM	Deep Soil Moisture
ESI	Evaporative Stress Index
VHI	Vegetation Hydric stress Index
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
CMORPH	CPC MORPHing technique
RDI	Recognition Drought Index
DiCaSM	Distributed Catchment Scale Model
eRDI	Effective Recognition Drought Index
SPEI-H	Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index - Hargraves potential
SPEI-P	Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index - Penman Monteith
MOVE	Methods for the Improvement of Vulnerability Assessment in Europe
AHP	Analytical Hierarchical Process
SC/ST	Scheduled Castes/Scheduled Tribes

KBDI	Keetch-Byram Drought Index
EVI	Enhanced Vegetation Index
NEX-GDDP	NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections
ESA CCI	Iniciativa de Cambio Climático de la Agencia Espacial Europea
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectrometer
NCEP	National Center for Environmental Prediction
SST	Sea Surface Temperature
ENIGH	Encuesta de Ingresos y Gastos de los Hogares
CPT	Climate Predictability Tool
UNISDR	UN International Strategy for Disaster Reduction
CPC-NOAA	Climate Prediction Center - National Oceanic and Atmospheric Administration
VHI	Vegetation Health Index
PRONACOSE	Programa Nacional Contra la Sequía
OMM	Organización Meteorológica Mundial
IDW	Inverse Distance Weighting
CONEVAL	Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social
NADM	North American Drought Monitor
GDP	Gross Domestic Product
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
IVS	Índice de Vulnerabilidad a la Sequía
hm ³	Hectometro cubico

Dedicatoria

A mis padres Miguel San Agustín García y Gregoria Canales Santos por su apoyo incondicional, enseñanzas y ejemplo de vida que me permitió ser la persona que ahora soy. Gracias por ser parte de mí.

A mis hermanas Karina y Carolina por su gran apoyo y consejo en diversas situaciones del mundo real que me es difícil para mí observar.

A mis amistades que estuvieron cerca de este proceso, por sus palabras, apoyo y conocimiento.

A mi mismo, por demostrarme que siempre puedo salir adelante ante lo que me proponga.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo por forjarme como profesionista.

A la Coordinación del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales por el apoyo que me permitió finalizar mis estudios de posgrado.

A la División de Ciencias Forestales y al Departamento de Suelos por brindarme las herramientas y el apoyo para desarrollarme a lo largo de la maestría.

Al Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas por compartirme los conocimientos necesarios, las herramientas, por su trabajo, tiempo y sobre todo su paciencia para instruirme en el camino de la investigación.

A el Ing. Carlos Andrés Vivanco Sosa y a la Ing. Beatriz Valencia Contreras, por su desempeño en la investigación y por su arduo trabajo, además de su amistad y apoyo a lo largo del tiempo que trabajamos.

A las Dra. Leticia Citlaly López Teloxa, Dra. Patricia Ruiz García, y la MC. Yadihra Cruz Sánchez, por su apoyo, por su sabiduría y sobre todo, su amistad.

A mi comité por el tiempo, el conocimiento y la paciencia a lo largo de la maestría.

Datos Biográficos



Datos Personales

Nombre	Noé San Agustín Canales
Fecha de nacimiento	7 de julio de 1993
Lugar de nacimiento	Ermita, Iztapalapa, Distrito Federal
No. Cartilla militar	D-2089403
CURP	SACN930707HDFNNX00
Profesión	Ingeniero en Recursos Naturales Renovables
Cedulas profesionales	
Técnico Agropecuario	7496963
Licenciatura en ingeniería en recursos naturales renovables	12557525

Desarrollo académico

Bachillerato:	Centro de bachillerato tecnológico agropecuario No. 35 “Leona Vicario”. Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México. Adquirió el título de “técnico agropecuario” en el año 2011.
Licenciatura	Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México. “Ingeniero en Recursos Naturales Renovables”, 2018.

RESUMEN

RIESGO A LA SEQUÍA EN ECOSISTEMAS FORESTALES DE MEXICO ¹

La vulnerabilidad de los ecosistemas forestales en México frente a condiciones de sequía ha aumentado en frecuencia e intensidad en los últimos años. La sequía ha impactado a los ecosistemas naturales, la industria y la población que de ellos vive. Por ello, el presente estudio cuantificó la vulnerabilidad de las áreas forestales nacionales a partir de información de 21 años. Se identificaron las zonas más vulnerables y establecieron estrategias de mitigación y adaptación. El método consistió en aplicar el Standard Precipitation Index (SPI-12), calcular el Drought Vulnerability Index (DVI) e identificar patrones con el índice de Moran Local Bibariado, para ser aplicados sobre las áreas forestales del país. Los resultados muestran que la sequía ha afectado a casi el 90% de los bosques en México. En detalle, 16% de superficie forestal ha sufrido sequía extrema dentro de 728 municipios; así como 33% ha sufrido sequía grave en 1402 municipios. Los bosques, agrupados en tres hábitats: tropical, templado y semiárido, han sido afectados con sequía extrema y grave en 44%, 45% y 55% de la superficie forestal, respectivamente. La afectación por sequía, desde moderada a extrema, ha sido del 88%, 85% y 95% para los bosques tropicales, templados y regiones semiáridas. Se observó una mayor concentración de las clases de DVI más graves sobre las coberturas de bosque templado, seguido del bosque tropical y la vegetación de zonas semiáridas.

Palabras clave: Standard Precipitation Index; Drought Vulnerability Index; Moran; Bosque templado; Bosque tropical; Vegetación de zonas semiáridas.

¹ Tesis de Maestría en Ciencias, Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Noe San Agustín Canales

Director de Tesis: Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

ABSTRACT

DROUGHT RISK IN MEXICAN FOREST ECOSYSTEMS ²

The vulnerability of Mexico's forest ecosystems to drought conditions has increased in frequency and intensity in recent years. Drought has impacted natural ecosystems, industry and the population that lives from them. Therefore, this study quantified the vulnerability of national forest areas based on 21 years of information. The most vulnerable areas were identified and mitigation and adaptation strategies were established. The method consisted of applying the Standard Precipitation Index (SPI-12), calculating the Drought Vulnerability Index (DVI) and identifying patterns with Moran's Local Bivariate, to be applied to the country's forest areas. The results show that drought has affected almost 90% of Mexico's forests. In detail, 16% of forest area has suffered extreme drought within 728 municipalities; as well as 33% has suffered severe drought in 1402 municipalities. Forests, grouped into three habitats: tropical, temperate and semi-arid, have been affected by extreme and severe drought in 44%, 45% and 55% of the forest area, respectively. The drought affectation, from moderate to extreme, has been 88%, 85% and 95% for tropical, temperate and semiarid regions. A higher concentration of the most severe DVI classes was observed in temperate forest cover, followed by tropical forest and semi-arid vegetation.

Keywords: Standard Precipitation Index; Drought Vulnerability Index; Moran; Temperate forest; Tropical forest; Semiarid zone vegetation.

² Thesis, Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Noe San Agustín Canales
Advisor: Tesis: Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El cambio climático causado por las actividades humanas es debido al aumento en la emisión de gases efecto invernadero (GEI). Estos, atrapan el calor en la atmósfera que está directamente relacionada con el aumento del calentamiento de la superficie. En consecuencia, existe una alta probabilidad de un incremento general en la evaporación potencial (ETP). Lo anterior resulta en un aumento de la evaporación real, es decir, el agua consumida por las plantas. Así, se prevé un aumento en la sequedad del ambiente que se magnifica durante la presencia de sequías. Durante una sequía, parte de la energía adicional que llega a la superficie terrestre se destina a elevar las temperaturas, lo que intensifica el calentamiento en las áreas secas. Desde los años 1900, otras variaciones, incluyendo cambios naturales no provocados en la humedad superficial y la velocidad del viento, han sido estudiadas para predecir una tendencia de la carencia de humedad. Sin embargo, las proyecciones de los modelos climáticos indican que se espera un aumento de la sequía en muchas áreas de latitudes bajas y medias debido al incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (Trenberth et al., 2014).

Se reconoce que además de la escasez de precipitación existen diversos factores que pueden contribuir al desequilibrio hidrológico. Uno de los aspectos más relevantes es la temperatura, ya que tiene una influencia significativa en la demanda de humedad del medio en cuestión. Otros factores ambientales que desempeñan un papel importante incluyen la velocidad del viento, la disponibilidad de recursos hídricos y la cobertura del suelo. Además, los factores antropogénicos también intervienen en la aparición de las sequías, como el nivel de demanda de agua, la presencia de infraestructuras hidráulicas, como presas, e incluso la alteración de los patrones de lluvia debido a la creciente emisión de

gases de efecto invernadero y el cambio de uso del suelo (Báez Ponce et al., 2022). Dada la compleja interacción de factores tanto biológicos como humanos en la manifestación de la sequía, algunos han propuesto considerarla como un fenómeno inherentemente multifactorial. Además, la interacción entre los procesos naturales y antropogénicos es compleja y multidireccional, lo que significa que los procesos antropogénicos también pueden influir en los procesos naturales y viceversa (Van Loon et al., 2016).

Por otro lado, evaluar la vulnerabilidad significa atender causas y factores similares a los que propician la sequía, dentro de ellos, actividades antropogénicas e infraestructurales, por lo que, en la actualidad, dicha evaluación se enfoca en la reducción de los impactos sociales, ambientales y económicos de las sequías. También, se buscan caminos hacia sociedades resilientes a este fenómeno, que continúa siendo una prioridad a nivel mundial (Yildirim et al., 2022). Es fundamental contar con un entendimiento compartido de los impulsores del riesgo de sequía y cómo se manifiestan sus impactos, para mejorar las evaluaciones y poder identificar y planificar opciones específicas de reducción y adaptación al riesgo de sequía en diferentes escalas espaciales y temporales. En las últimas dos décadas, ha habido un aumento en las evaluaciones del riesgo de sequía que se basan en diversos fundamentos conceptuales y enfoques metodológicos (Hagenlocher et al., 2019).

Bajo estas premisas, el objetivo de esta investigación fue determinar el riesgo a la sequía en tierras forestales de México, mediante el análisis del índice estandarizado de precipitación (SPI) para que sirva como referencia para planes de acción nacional de mitigación y adaptación a este fenómeno.

1.1 Antecedentes

La sequía tiene diversas definiciones, dentro de las cuales se encuentran, sequía agrícola, la cual se refiere a la falta de humedad del suelo que afecta negativamente el crecimiento y la producción de los cultivos. La sequía hidrológica que se enfoca a la falta de agua en los cuerpos de agua, como ríos, lagos y acuíferos. La sequía socioeconómica que hace referencia a los efectos negativos de la sequía en la sociedad y la economía. Y por último, la sequía meteorológica, que es un tipo de sequía que se define en función del grado de aridez en comparación con un promedio a largo plazo de precipitaciones (D. A. Wilhite & Glantz, 1985). Para la realización presente tesis, se ha tomado como base, la definición de sequía meteorológica, ya que toma como referencia, el promedio de precipitación cada región, por lo que representa la variabilidad climática de nuestro país.

En las últimas décadas se han impulsado y desarrollado diversos índices de caracterización de la sequía. De forma general, un índice de sequía es una aproximación utilizada para evaluar el impacto y definir diferentes parámetros ante la presencia de una sequía, como la intensidad, duración, gravedad y extensión espacial. Es importante destacar que la medición de sequía debe ser capaz de cuantificarla en diferentes escalas de tiempo, para lo cual se requiere una serie temporal extensa. La escala de tiempo más comúnmente empleada en el análisis de sequías es el año, seguida por el mes. Aunque la escala anual abarca un periodo prolongado, también puede proporcionar información sobre el comportamiento regional de las sequías. Por otro lado, la escala mensual resulta más apropiada para monitorear los efectos de una sequía en situaciones relacionadas con la agricultura, el suministro de agua y la extracción de aguas subterráneas (Panu & Sharma, 2009).

Existen diversos índices para cuantificar la sequía, cada uno con sus ventajas y limitaciones. Estos incluyen el índice de severidad de sequía de Palmer, el índice de anomalía de lluvia, los deciles, el índice de humedad de cultivos, el índice de sequía de Bhalme y Mooley, el índice de suministro de agua superficial, el índice de lluvia nacional, el índice de precipitación estandarizado y el índice de sequía de recuperación (Meteorological Organization & Water Partnership, 2016). Además de estos índices, se han utilizado en casos limitados los índices de Penman, Thornthwaite y Keetch y Byram (Mishra & Singh, 2010a). Según los estudios realizados sobre los índices de sequía, la gran mayoría de ellos emplea la precipitación, ya sea de manera individual o en combinación con otros elementos meteorológicos, en función de los requisitos específicos, tal como fue recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) en 1975. Por ejemplo, se utilizan combinaciones de variables hidrometeorológicas como la temperatura y la precipitación como los índices de Marcovitch, índice de Palmer, índice de humedad de cultivos, la precipitación y la humedad del suelo en el índice de adecuación de humedad, índice de sequía Keetch-Bryam, y únicamente la precipitación como en el SPI (Mishra & Singh, 2010a).

1.2 Planteamiento del problema de investigación

La pregunta de investigación que se planteó al inicio de la investigación es, si México es un país expuesto, ¿Es posible identificar espacialmente el índice de precipitación estandarizado (SPI) y el índice de vulnerabilidad a la sequía considerando 21 años para los ecosistemas forestales de México? ¿Cuál es el riesgo a la sequía en los ecosistemas forestales?

1.3 Justificación

Actualmente, la mayor parte de los estudios de la sequía, se centran en conocer la distribución espacial del fenómeno, además de que, no hay mucha investigación enfocada a la vulnerabilidad en diferentes sectores que se ven impactados. Otra vertiente importante, de la cual no se tiene conocimiento, es la parte de los ecosistemas, a pesar de que se tiene registro de efectos de la sequía, en los inventarios forestales nacionales. En ellos, se registran individuos en los que hay un evidente daño por este fenómeno. Cabe señalar que este tipo de observaciones cuenta con mucho margen de error, ya que, la sequía puede manifestarse tanto en los anillos de crecimiento, disminución de poblaciones, cambios en la estructura del bosque, así como un aumento o disminución de coberturas que son sensibles o se pueden ver beneficiadas por los cambios de temperatura.

La disminución de los bosques y matorrales está relacionada, entre otros, con condiciones climáticas anómalas de sequía, lo que sugiere que estos ecosistemas podrían ser especialmente vulnerables a la escasez de agua. La fragilidad de un ecosistema se refiere a su susceptibilidad a sufrir daños o modificaciones significativas debido a perturbaciones externas, y la sequía puede considerarse una de estas perturbaciones (Lloret, 2012). Según Cisneros-González et al., (2018), en México, se han realizado estudios recientes que establecen una relación alta entre los casos de incendios forestales y eventos climáticos, en lo cual, analizando datos del 2005 al 2016, se ha detectado un incremento del 56% en la ocurrencia de casos y la superficie afectada aumentó en 68%, por lo que concluye es mas frecuente y mas severa.

En la actualidad, se ha visto un aumento en el impacto de la sequía a nivel nacional, estos impactos, se han visto en diferentes sectores, siendo los

productivos, como la agricultura y la ganadería, los más sensibles. En los últimos dos años, se ha observado una tendencia a afectar sectores menos sensibles, como lo es la industria y la población, ya que se han presentados casos, donde los vasos reguladores, de las principales urbes como lo son CDMX (Sistema Cutzamala), Monterrey (Presa de la Boca) y Guadalajara (Lago de Chapala), han llegado a estar en sus niveles más bajos históricos, a estar completamente secos.

Por lo cual, se requiere conocer y cuantificar la sequía y como se distribuye espacialmente. Con ello, construir un índice de vulnerabilidad que estime las áreas en las cuales hay mayor presencia de sequía y que tienen una mayor vulnerabilidad con el fin de establecer los grupos de vegetación e identificar las zonas donde las cubiertas forestales son más vulnerables a la sequía. Con lo anterior, se tendrá información detallada de las áreas forestales nacionales, que son más vulnerables a la sequía, con el fin de tener información crucial para la planificación y la implementación de medidas de mitigación y adaptación. Al identificar las áreas más vulnerables, se pueden priorizar los recursos y las acciones en esas regiones para reducir los impactos negativos de la sequía en los bosques y matorrales. Con esta información técnica, se pueden desarrollar planes de gestión forestal específicos que incluyan estrategias de conservación, restauración y manejo sostenible, así como la implementación de prácticas adecuadas de manejo del agua. También se pueden establecer sistemas de alerta temprana y monitoreo para detectar y responder rápidamente a los efectos de la sequía en áreas vulnerables.

1.4 Objetivos

General

Determinar el riesgo a la sequía en tierras forestales de México, mediante el análisis del índice estandarizado de precipitación (SPI) para que sirva como referencia para planes de acción nacional de mitigación y adaptación a este fenómeno.

Específicos

1. Obtener cartografía de sequía mediante aplicación del indicador SPI-12 para 21 años recientes, en el periodo 2000-2020, para observar la distribución de la sequía en el área de estudio.
2. Determinar la superficie que ha sido afectada por algún tipo de sequía en el país, así como los municipios y las zonas forestales de México, con el fin de cuantificar las áreas afectadas.
3. Calcular el riesgo a la sequía mediante métodos de la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD) que permita analizar el fenómeno en superficies forestales del país.
4. Identificar las zonas con patrones espaciales similares mediante la aplicación del índice de Moran Bivariado para observar las coberturas y municipios más vulnerables.

1.5 Hipótesis

- Habrá mayor frecuencia de sequía en tiempo más actual respecto a anteriores años.
- La clase de vegetación con mayor vulnerabilidad a sufrir sequías serán las correspondientes a zonas semidesérticas.
- Los estados de Oaxaca y Chiapas serán los más vulnerables a la sequía, ya que observan mayor rezago económico a nivel nacional.
- Las áreas forestales más vulnerables se encontrarán en el sur del país.

1.6 Contenido temático

La tesis está organizada de la siguiente forma (Figura 1): El primer capítulo de este documento, titulado "Introducción General", proporciona una visión global del tema de investigación, incluyendo conceptos generales necesarios para comprender el tema abordado. En esta sección se presentan los antecedentes del tema, se plantea el problema de investigación, se justifica el estudio, se establecen los objetivos a cumplir, se formulan las preguntas de investigación y se plantean las hipótesis. Por otro lado, en el Capítulo 2 se presenta un marco teórico y de referencia, que engloba una recopilación resumida de publicaciones relacionadas con el tema de estudio, destacando los aspectos más relevantes de dichas investigaciones. Esto permite obtener una visión general del progreso en el estudio del tema.

El Capítulo 3 muestra los principales resultados del estudio en forma de artículo científico. Finalmente, en el Capítulo 4 se hacen manifiestas las conclusiones generales alcanzadas.

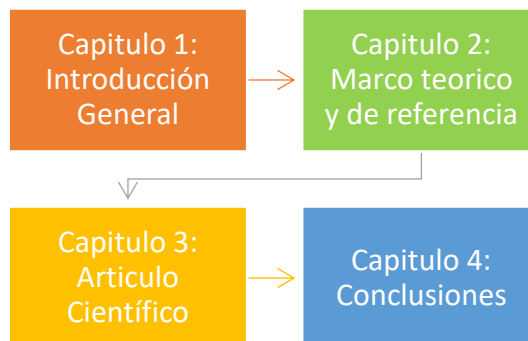


Figura 1.1. Contenido estructural de la presente Tesis.

1.7 Referencias

- Báez Ponce, M., Barajas Alcalá, A. G., Berry, M. K., Cariño Olvera, M. M., Carlón Allende, T., Castillo Galindo, S., Cerón González, A., Chant, E. C., Cuvi, J. N., de Carvalho Cabral, D., De los Reyes Patiño, R., Dobler Morales, C. E., Dutra e Silva, S., Favila Vázquez, M., Fernandes, V., Fernández de Castro Martínez, G., Fernández Repetto, F. J., Franch Pardo, I., Gándara Chacana, N. L., ... Lefebvre, K. A. T. (2022). Historia Ambiental de América Latina. *Editorial Del CIGA*. <https://doi.org/10.22201/CIGA.9786073057882E.2022>
- Cisneros-González, D., Zúñiga-Vásquez, J. M., Pompa-García, M., Cisneros-González, D., Zúñiga-Vásquez, J. M., & Pompa-García, M. (2018). Actividad del fuego en áreas forestales de México a partir de sensores remotos y su sensibilidad a la sequía. *Madera y Bosques*, 24(3). <https://doi.org/10.21829/MYB.2018.2431687>
- Hagenlocher, M., Meza, I., Anderson, C. C., Min, A., Renaud, F. G., Walz, Y., Siebert, S., & Sebesvari, Z. (2019). Drought vulnerability and risk assessments:

state of the art, persistent gaps, and research agenda. *Environmental Research Letters*, 14(8), 083002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AB225D>

Lloret, F. (2012). Vulnerability and resilience of forest ecosystems to extreme drought episodes. *Ecosistemas*, 21(3), 85–90.
<https://doi.org/10.7818/ECOS.2012.21-3.11>

Meteorological Organization, W., & Water Partnership, G. (2016). *Integrated Drought Management Programme Handbook of Drought Indicators and Indices*. Drought Management. www.droughtmanagement.info

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2010.07.012>

Panu, U. S., & Sharma, T. C. (2009). Challenges in drought research: some perspectives and future directions.
<https://doi.org/10.1080/02626660209493019>, 47(S), S19–S30.
<https://doi.org/10.1080/02626660209493019>

Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17–22. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2067>

Van Loon, A. F., Gleeson, T., Clark, J., Van Dijk, A. I. J. M., Stahl, K., Hannaford, J., Di Baldassarre, G., Teuling, A. J., Tallaksen, L. M., Uijlenhoet, R., Hannah, D. M., Sheffield, J., Svoboda, M., Verbeiren, B., Wagener, T., Rangelcroft, S., Wanders, N., & Van Lanen, H. A. J. (2016). Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience*, 9(2), 89–91. <https://doi.org/10.1038/NGEO2646>

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111–120.
<https://doi.org/10.1080/02508068508686328>

Yildirim, G., Rahman, A., & Singh, V. P. (2022). A Bibliometric Analysis of Drought Indices, Risk, and Forecast as Components of Drought Early Warning Systems. *Water (Switzerland)*, 14(2), 253. <https://doi.org/10.3390/W14020253/S1>

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO Y DE REFERENCIA

En el presente capítulo, se muestra bibliografía obtenida a partir de palabras clave referentes al tema de investigación, permitiendo realzar una búsqueda de las principales investigaciones, metodologías y manuales, a través de bibliotecas digitales, como Scopus, Sciencedirect, Google Académico y plataformas como ReserchRabitt y PapersConected. De las cuales, se obtuvo las referencias más relevantes de acuerdo con el tema de investigación. Las palabras clave elegidas fueron *Drought*, *Drought Risk*, *Drought Vulnerability*, *Droughth forest* y *Drought ecosystem*.

El Objetivo de este capítulo es mostrar y establecer las principales investigaciones de carácter mundial y nacional acerca de la sequía en ecosistemas forestales. Se muestran temas relacionados con la medición de la sequía, vulnerabilidad climática, sequía en ecosistemas forestales y la sequía en México, todos estos relacionados con el tema principal, riesgo a la sequía en ecosistemas forestales de México.

2.1 La sequía y su medición

La sequía es uno de los fenómenos mundiales más complejos del planeta, lo que ha dificultado encontrar una definición precisa. Según Wilhite & Glantz (1985) crearon una variedad de definiciones, dependiendo la diciplina que la estudia por lo que se ha subdividido en cuatro conceptos diferentes: sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica. Todas las sequías, a excepción de la meteorológica, hacen referencia a la escases de agua para su uso por diferentes sectores. En lo que se refiere a la sequía meteorológica hace referencia a la disminución de la precipitación comparando con la media del lugar.

A finales del siglo XX, McKee et al., (1993) desarrollaron una forma de análisis de la sequía utilizando el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI). El SPI se basa en la precipitación y se utiliza para medir la anomalía de esta en diferentes escalas de tiempo. Además, conceptualizó la definición de sequía mediante la escala de tiempo, que se define como una condición de insuficiente humedad causada por un déficit de precipitación durante un período de tiempo determinado. En su investigación aborda varias cuestiones prácticas relacionadas con el análisis de la sequía, incluyendo la escala de tiempo, la probabilidad, el déficit de precipitación, la aplicación de la definición de sequía y la relación de la definición de sequía con los impactos de la sequía. El SPI se utiliza para identificar y cuantificar la sequía en diferentes escalas de tiempo y se puede utilizar para responder preguntas sobre la frecuencia, duración e intensidad de la sequía.

Hacia el año 2000, D. Wilhite, (2000) uniformizó una definición conceptual más precisa sobre la sequía, estableciendo que es un periodo de tiempo donde se tiene una deficiencia de precipitación con base en lo esperado, lo cual resulta deficiente para el desarrollo de actividades humanas, dando como resultado en impactos sociales, económicos y ambientales. Además de que se establecen características esenciales para su medición, las cuales son su intensidad, duración y distribución espacial. Por último, se establece que este fenómeno, se presenta en todos los regímenes climáticos, desde los desiertos, hasta las selvas, donde, dependerá principalmente de la media que recibe el lugar en cuestión.

Con la fundación del monitor de sequía de Estados Unidos en Norte América, se abrió la pauta para dar un seguimiento constante en el estudio de la sequía en el continente. Este se fundó en agosto de 1999 con el objetivo de proporcionar información oportuna y precisa sobre la sequía en los Estados Unidos. El sistema ayuda a los tomadores de decisiones a comprender la intensidad, la extensión

espacial y los posibles impactos de la sequía en diferentes regiones del país. El sistema se basa en datos de precipitación, temperatura, humedad del suelo y otros factores para evaluar la sequía en diferentes regiones. El Monitor de Sequía es utilizado por agricultores, ganaderos, hidrólogos, meteorólogos y otros profesionales para tomar decisiones informadas sobre la gestión de la sequía (Svoboda et al., 2002).

A lo largo de últimos dos siglos, los índices han evolucionado desde enfoques simplistas hasta modelos más complejos. Tomando ideas de Heim, (2002), el índice de sequía de Palmer ha sido ampliamente utilizado, pero ha recibido críticas por su enfoque simplificado. El Soil Water Supply Index (SWSI) complementa el índice de Palmer al abordar factores adicionales. Sin embargo, lograron avances significativos con el establecimiento del Monitor de Sequía, que combina múltiples indicadores para evaluar el estado total de la humedad ambiental. Aunque existieron oportunidades para mejorar la incorporación de indicadores adicionales, como los niveles de embalses y agua subterránea, la distribución temporal de la precipitación y las mediciones in situ de la humedad del suelo, uno de los principales desafíos relacionados fue la disponibilidad y el procesamiento de datos para un monitoreo efectivo de sequías.

Para principios del siglo XXI, ya se habían desarrollado, una amplia variedad de índices de sequía, los cuales en algunos casos se diferencian, dependiendo el enfoque. Según la revisión hecha por Mishra & Singh, (2010b), destacaron que existen diferentes índices de sequía utilizados en estudios históricos, como el Índice de Palmer, el Índice de Keetch-Bryam, el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y el Índice de Marcovitch, entre otros. Además, se mencionan índices más recientes, como el Índice de Sequía de Cultivos (CDI), el Índice de Sequía de Soja (SDI) y el Índice de Condición de la Vegetación (VCI). Se destaca la importancia de elegir el índice de sequía adecuado para el propósito y las

características específicas de la región en estudio. Además, se mencionan las fortalezas y debilidades de cada índice de sequía. De los cuales, el más común es que solo reflejan las condiciones de sequía basadas en variables hidrometeorológicas, como la precipitación y la humedad del suelo, pero no pueden cuantificar las pérdidas económicas asociadas a la sequía.

Basándose en estudios de Vicente-Serrano et al., (2010), el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) fue desarrollado para detectar y evaluar la sequía en diversas escalas espaciales y temporales. Comparando el SPEI con el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI) y el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), se encontró que el SPEI presenta varias ventajas. El SPEI supera al PDSI y al SPI al capturar de manera más efectiva la variabilidad interanual y multianual de la sequía. Además, el SPEI es más sensible al calentamiento global y tiene una mayor capacidad para detectar cambios en la frecuencia y magnitud de la sequía. Se observó que el SPEI es más adecuado para evaluar la sequía en diferentes escalas espaciales y temporales. Una de las principales desventajas de este índice, radica en la dependencia de datos de alta calidad.

Una revisión elaborada por AghaKouchak et al., (2015) establecen el uso de nuevas tecnologías para la detección y medición de la sequía, el cual se basa en teledetección con imágenes de satélite. Además, se establecen los enfoques para monitorear la sequía. Uno de los enfoques está basado en la vegetación, la temperatura de la superficie y la humedad del suelo. El uso de modelos de simulación que combinan datos de satélite con datos terrestres y modelos hidrológicos para generar información sobre la sequía. El uso de técnicas de teledetección avanzadas, como la teledetección de microondas y la teledetección de radar, para medir la humedad del suelo y otros factores relevantes. El uso de nuevas misiones satelitales para proporcionar información sobre el CO₂

atmosférico y otros factores relevantes. El desarrollo de nuevos indicadores que cuantifiquen los efectos de la sequía en el ciclo del carbono y del nitrógeno. La integración de los datos de satélite con otros datos terrestres y modelos de simulación para mejorar la precisión y la resolución espacial de las observaciones de satélite. Los principales indicadores derivados de estos enfoques utilizados fueron, los basados en la vegetación, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de área foliar (LAI). Indicadores basados en la temperatura de la superficie, como la temperatura de brillo (BT) y la temperatura de la superficie terrestre (LST). Indicadores basados en la humedad del suelo, como la humedad del suelo superficial (SSM) y la humedad del suelo profundo (DSM). Indicadores basados en la evaporación y la transpiración, como el índice de estrés por evaporación (ESI) y el índice de estrés hídrico de la vegetación (VHI).

En la actualidad se usan con mayor regularidad sistemas más complejos para la detección de las sequías, tal es el caso del método CHIRPS (Funk et al., 2015), que es un conjunto de datos diseñado para monitorear la sequía y el cambio del medio ambiente global. Utiliza datos de estaciones meteorológicas y productos satelitales, como las estimaciones de precipitación por microondas 2B31 de TRMM y las estimaciones de precipitación basadas en microondas e infrarrojos CMORPH. CHIRPS se valida utilizando tres métodos principales: validación cruzada, validación espacial y validación temporal. CHIRPS se puede utilizar para predecir eventos hidrológicos extremos, como sequías, mediante la simulación de condiciones hidrológicas iniciales en tiempo real. La información hidrológica, como el estado de la humedad del suelo, las aguas subterráneas y la nieve, se ha demostrado que contribuye a la habilidad de predecir sequías utilizando este método.

Los cambios en el clima y el uso del suelo pueden tener un impacto significativo en los recursos hídricos de la cuenca. El estudio de Afzal & Ragab, (2019), utilizaron el SPI para identificar la sequía en diferentes niveles, desde la sequía agrícola hasta la sequía hidrológica, además de cuantificar la gravedad de los eventos secos y húmedos. El RDI se utiliza para identificar eventos de sequía y cuantificar su gravedad. El estudio utiliza el modelo hidrológico DiCaSM (Distributed Catchment Scale Model), que es un modelo basado en procesos físicos que considera procesos hidrológicos comunes como la interceptación de lluvia, la infiltración, la evapotranspiración, el escurrimiento superficial hacia los arroyos, la recarga de aguas subterráneas, la absorción de agua por las plantas, la dinámica de la humedad del suelo y el flujo de los arroyos. Los resultados mostraron que, bajo escenarios de emisiones altas, se espera un aumento en la severidad de los eventos de sequía futuros, lo que podría reducir la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca. Además, se encontró que el aumento en la superficie de bosques de hoja ancha podría disminuir el flujo de los arroyos y la recarga de las aguas subterráneas, mientras que la expansión urbana podría aumentar el escurrimiento superficial.

En la actualidad, elegir un método adecuado es crucial para representar las condiciones u objetivo de estudio para la correcta medición de la sequía. Liu et al., (2022) revisaron varios índices de sequía, incluyendo el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI), el Índice de Precipitación y Evapotranspiración Estandarizada (SPEI), el Índice de Condición de la Vegetación (VCI), el Índice de Condición de la Temperatura (TCI), el Índice de Sequía de Reconocimiento (RDI) y el Índice de Sequía de Reconocimiento Efectivo (eRDI). Se encontró que el SPEI-H es una alternativa adecuada para lugares con escasez de datos, mientras que el SPEI-P tiene una mayor capacidad predictiva comparativa.

2.2 Vulnerabilidad climática

El trabajo de Cutter, (1996) ayuda a entender qué es la vulnerabilidad en relación con los peligros ambientales. Se refiere a la capacidad de una comunidad o sistema para resistir, adaptarse y recuperarse de los efectos de un peligro ambiental. En otras palabras, la vulnerabilidad muestra cuán propensa es una comunidad o sistema para sufrir daños o pérdidas debido a un peligro ambiental. Comprender la vulnerabilidad es muy importante porque ayuda a desarrollar estrategias adecuadas para reducir los riesgos asociados con esos peligros. Al entender la vulnerabilidad de una comunidad o sistema, es posible identificar las áreas críticas y los grupos más vulnerables que necesitan protección y apoyo. Esto guía en la planificación y toma de decisiones para reducir los riesgos relacionados con los peligros ambientales. Además, conocer la vulnerabilidad también puede ayudar a encontrar las causas subyacentes, como la pobreza, la falta de acceso a recursos y la desigualdad social, para así poder abordar esos problemas y disminuir la vulnerabilidad a largo plazo.

La vulnerabilidad a la sequía se refiere a la capacidad de una persona o grupo para anticipar, hacer frente, resistir y recuperarse del impacto de una sequía (D. Wilhite, 2000). Además, se discute, el riesgo asociado con la sequía en cualquier región proviene de dos factores fundamentales: la exposición de la región al evento de sequía, que se refiere a la probabilidad de que ocurra en distintos niveles de severidad; y la vulnerabilidad de la sociedad frente a dicho evento. La sequía, como evento natural, se desencadena por perturbaciones persistentes a gran escala en el patrón de circulación global de la atmósfera, y su exposición afecta a diferentes áreas de manera variada, sin que exista un control significativo sobre su ocurrencia. Por un lado, la exposición a la sequía es determinada por factores climáticos y geográficos, y su distribución espacial es difícil de modificar. Por otro lado, la vulnerabilidad frente a la sequía es influenciada por factores

sociales como la densidad de población, características demográficas, tecnología disponible, políticas implementadas y comportamiento social.

Una visión multidisciplinaria de la vulnerabilidad indica que no existe un concepto único de la misma, si no que existen diferentes enfoques que destacan características de interés o de impacto. En el trabajo de Alwang et al., (2001), señalan las diferentes definiciones de la vulnerabilidad, que dependen de la disciplina que se esté abordando, por tendencia a enfocarse en diferentes componentes del riesgo, las respuestas de los hogares al riesgo y los resultados del bienestar. Medir la vulnerabilidad de un lugar o población, es complejo, ya que se deben definir las métricas que caractericen de forma correcta, el lugar a evaluar. Otra forma de lidiar con el problema de medición es reconocer la incomparabilidad inherente de diferentes formas de vulnerabilidad y medir, por ejemplo, la vulnerabilidad nutricional, la inseguridad física, la vulnerabilidad a la pobreza, etc. en métricas que tengan sentido para cada forma de vulnerabilidad.

El marco de vulnerabilidad de Turner et al., (2003), determinan la importancia de considerar varios elementos clave. Estos incluyen la interacción de múltiples perturbaciones y tensiones estresantes en el sistema, evaluar cómo se ve afectado por peligros y eventos estresantes, entender la sensibilidad del sistema ante la exposición, evaluar su capacidad de afrontar y su resiliencia, observar cómo se reestructura y adapta tras enfrentar perturbaciones, y considerar cómo las amenazas y respuestas se relacionan en distintas escalas de tiempo y espacio (escalas anidadas y dinámica escalar). Todos estos elementos son fundamentales para comprender y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas vulnerables para afrontar y recuperarse, considerando riesgos asociados a una resiliencia lenta o deficiente. Se señala la importancia de observar cómo el sistema se adapta después de enfrentar perturbaciones (adaptación y ajustes). Además, infieren que el análisis de vulnerabilidad se

vuelve más útil cuando consideramos diferentes perspectivas, factores impredecibles y no lineales, el papel de las instituciones, relaciones de causa y efecto, métricas adecuadas y estructuras institucionales para la toma de decisiones informada y relevante.

Como señalan Wisner et al., (2004) la vulnerabilidad es una medida de la exposición de una persona o grupo a los efectos de un peligro natural, incluyendo el grado en que pueden recuperarse del impacto de ese evento. Es posible desarrollar una medida cuantitativa de la vulnerabilidad en términos de la probabilidad de que ocurra un peligro de una intensidad, frecuencia y duración particular. Estas características variables del peligro afectarán el grado de pérdida dentro de un grupo, en relación con su nivel de vulnerabilidad a varios peligros específicos de diferentes intensidades. Donde se concluye que la vulnerabilidad es un término hipotético y predictivo que solo se puede "demostrar" observando el impacto del evento cuando y si ocurre.

En el trabajo de Smit & Wandel (2006), discuten diferentes enfoques para evaluar la vulnerabilidad. Uno de los enfoques mencionados es el uso de indicadores, puntuaciones, calificaciones o procedimientos de clasificación para evaluar la vulnerabilidad relativa de los países o regiones. En este enfoque, se estiman medidas sustitutas de la exposición o sensibilidad y los elementos de la capacidad adaptativa para cada sistema y luego se agregan para generar una puntuación general de vulnerabilidad para cada sistema. Además, propone otro enfoque es la evaluación participativa de la vulnerabilidad, que implica la participación activa de las comunidades locales en la identificación de las exposiciones, sensibilidades y capacidades adaptativas relevantes.

La conceptualización de la vulnerabilidad suele enfocarse en diferentes objetivos o focos de estudio, para Eakin & Luers, (2006) lo refieren a la perspectiva de la

vulnerabilidad y la comprensión de los factores que hacen que un sistema socioambiental sea más o menos vulnerable a los impactos del cambio ambiental y social. Donde los principales puntos a considerar son, la exposición a riesgos ambientales, la sensibilidad a esos riesgos y la capacidad de adaptación y respuesta a los impactos. La vulnerabilidad socioambiental puede variar según la ubicación geográfica, la cultura, la economía y otros factores sociales y ambientales. La evaluación de la vulnerabilidad socioambiental es importante para identificar las áreas y poblaciones más vulnerables y para desarrollar estrategias de adaptación y reducción de riesgos. Algunos otros enfoques que se han utilizado en la evaluación de la vulnerabilidad incluyen el conocimiento experto, la participación de los interesados y un enfoque coevolutivo que utiliza escenarios cualitativos de estrés climático y no climático en combinación con modelos de cambio climático.

En el contexto del informe "Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability" (Parry et. al. 2007), la vulnerabilidad se definió como la susceptibilidad de un sistema natural o humano a sufrir daños debido al cambio climático. Es afectada por factores como la exposición al cambio climático, la sensibilidad del sistema y su capacidad de adaptación. El informe evalúa la vulnerabilidad en diversas regiones y sectores, identificando áreas más susceptibles a los impactos del cambio climático. También analiza las características que aumentan la vulnerabilidad y explora estrategias de adaptación para reducir la vulnerabilidad en sistemas naturales y humanos. Para evaluar la vulnerabilidad, se consideran varios factores para determinar la vulnerabilidad frente al cambio climático, como la exposición que se refiere a la probabilidad de que un sistema natural o humano sufra un impacto debido al cambio climático. Define la sensibilidad del sistema que se relaciona con su capacidad de sufrir daños, como ocurre en ecosistemas frágiles. La capacidad

de adaptación que se centra en ajustarse al cambio climático y reducir la vulnerabilidad; comunidades con recursos y tecnología son menos vulnerables. Para finalizar, las características socioeconómicas como pobreza y desigualdad también pueden aumentar la vulnerabilidad, exponiendo a las comunidades pobres a impactos negativos.

Una metodología en donde el marco conceptual integral y holístico para sistematizar y evaluar la vulnerabilidad, el riesgo y la adaptación es el presentado por Birkmann et al., (2013), donde proponen el marco denominado “MOVE”, en el cual se busca proporcionar una conceptualización mejorada de la naturaleza multifacética de la vulnerabilidad, teniendo en cuenta factores causales clave como la exposición, la susceptibilidad, la falta de resiliencia (falta de capacidades de respuesta social) y las diferentes dimensiones temáticas de la vulnerabilidad: física, social, ecológica, económica, cultural e institucional. El marco MOVE considera que cada una de estas dimensiones temáticas interactúa con diferentes factores causales, como la exposición, la susceptibilidad y la falta de resiliencia, y que todas deben ser consideradas en una evaluación integral y holística de la vulnerabilidad.

2.3 Sequía en ecosistemas forestales

La sequía puede tener un impacto significativo en los bosques. Durante las condiciones de sequía extrema, el contenido de humedad de la vegetación viva, como los arbustos y las copas de los árboles, puede disminuir, lo que hace que los incendios forestales se propaguen más fácilmente. Además, la curación del material herbáceo durante la temporada de crecimiento está asociada con períodos de poca o ninguna lluvia, lo que aumenta el riesgo de incendios forestales. Por lo cual Keetch & Byram, (1968) proponen el Índice de Sequía para el Control de Incendios Forestales, el cual consiste la medición y monitoreo de la

sequía que se utiliza para prevenir y controlar los incendios forestales. El índice se basa en la relación entre la humedad del suelo y la precipitación, y se utiliza para evaluar la sequía en un área determinada.

La vegetación herbácea en los sotobosques de diferentes especies de pinos es sensible a cambios climáticos estacionales y corto plazo, por lo cual Dimitrakopoulos & Bemmerzouk, (2003) observaron que su crecimiento depende de la humedad del suelo superficial, y la falta de esta puede acortar su período de crecimiento y aumentar el riesgo de incendios forestales. Se realizó el estudio en bosques de *Pinus brutia* en Creta, Grecia, usando el índice de sequía Keetch-Byram (KBDI) para predecir el contenido de humedad de las plantas herbáceas vivas en el sotobosque. Durante el verano, el KBDI se correlacionó con la humedad de las plantas, pero en otoño, las etapas fenológicas de las plantas tuvieron más influencia en el contenido de humedad. El KBDI no reflejó el estado de agua en árboles de raíces profundas y capas de suelo más profundas.

La sequía puede tener efectos negativos en la producción agrícola y ganadera, aumentar el riesgo de incendios forestales y la erosión del suelo en las Grandes Llanuras del norte de los Estados Unidos. Ji & Peters, (2003) utilizaron una metodología que combinó datos de NDVI y SPI para evaluar la relación entre la vegetación y la humedad. Los resultados muestran una significativa relación entre la condición de la vegetación y la disponibilidad de humedad en todas las áreas de estudio. El NDVI se destaca como un buen indicador para detectar y monitorear la sequía en la región, mejorando la comprensión de la interacción entre la vegetación y el clima y permitiendo técnicas más efectivas para emplear datos satelitales en la detección de sequías y otros impactos climáticos.

El trabajo de Saleska et al., (2007) examinan el impacto de la sequía en la vegetación, centrándose en la selva amazónica. La sequía puede limitar la

disponibilidad de agua, reduciendo la fotosíntesis y la transpiración en las plantas, lo que podría resultar en una disminución en la producción de biomasa e incluso la muerte de las plantas. El estudio utilizó datos satelitales, en particular el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) para rastrear las variaciones en la fotosíntesis de la selva amazónica durante la sequía de 2005. También se compararon datos de precipitación para evaluar cómo la sequía afectó diferentes partes de la selva amazónica. Los hallazgos revelan que la selva amazónica es más resistente a la sequía de lo que se pensaba anteriormente. A pesar de la severidad de la sequía de 2005, la vegetación intacta de la Amazonía no mostró una disminución significativa en la fotosíntesis como se esperaba. En su lugar, los datos satelitales indicaron un aumento en la "verdor", lo que sugiere que la vegetación utilizó mecanismos fisiológicos para acceder y mantener la disponibilidad de agua durante la sequía.

Los incendios forestales que ocurrieron en la región de Knysna, Sudafrica, en 2017 fueron causados por una sequía prolongada. La combinación de la sequía con otros factores contribuyó a que este incendio fuera uno de los peores registrados. Kraaij et al., (2018) estimaron que los incendios quemaron alrededor de 15,000 hectáreas. Para evaluar la gravedad del incendio, se emplearon imágenes satelitales para comparar la cobertura vegetal antes y después del siniestro, permitiendo estimar la cantidad de biomasa consumida. Se analizaron índices de sequía históricos de más de 70 años para contrastar las condiciones climáticas que afectaron el fuego en 2017 con eventos pasados. Se encontró que la extrema sequedad previa al incendio, junto con condiciones climáticas altamente peligrosas, intensificó la gravedad de los incendios en Knysna en 2017. Además, la conversión de matorrales de Fynbos en plantaciones y la invasión de especies exóticas agravaron la situación. La histórica supresión de incendios

también condujo a un aumento en la biomasa combustible, dificultando aún más el control del fuego.

En el trabajo de Anderson et al., (2018), analizaron a la sequía frecuente, afecta negativamente a los bosques amazónicos, disminuyendo la fotosíntesis y la productividad primaria neta, aumentando la mortalidad de los árboles debido al efecto directo de la sequía y al impacto de los incendios en el sotobosque. Además, la intensidad de los impactos negativos de la sequía en los bosques amazónicos ha ido aumentando con el tiempo, lo que indica que estos bosques se están volviendo más vulnerables a las sequías en el siglo XXI. Se describe que se utilizó la temperatura de la superficie terrestre (LST, por sus siglas en inglés) para analizar los impactos de la sequía en los bosques amazónicos. Se generaron anomalías mensuales y anuales de la temperatura máxima, y se llevaron a cabo análisis para toda el área y por regiones, según el inicio y el final de la temporada seca. Se concluye que los bosques amazónicos son vulnerables a las sequías repetidas, y que los impactos negativos de la sequía en estos bosques han ido aumentando con el tiempo. Además, se encontró que la vulnerabilidad de los bosques amazónicos a las sequías está influenciada por la cobertura vegetal, siendo los bosques secundarios y degradados más vulnerables que los bosques densos.

El comportamiento de la dinámica de la vegetación durante la sequía puede variar significativamente según el tipo de vegetación, la intensidad y duración de la sequía, y las condiciones hidrogeológicas. Según Zhang & Zhang, (2019) en algunos casos, la tasa de fotosíntesis puede disminuir durante la sequía, mientras que en otros casos puede mantenerse o incluso aumentar en comparación con una temporada húmeda. Utilizaron datos meteorológicos y de vegetación para analizar esta relación compleja. Se evaluaron 839 estaciones meteorológicas en China durante un período de 52 años y se utilizó el índice de vegetación de

diferencia normalizada (NDVI) para rastrear los cambios en la vegetación. Se encontró que la relación entre la dinámica de la vegetación y la sequía depende de diversos factores, incluyendo el tipo de vegetación y la aridez local.

El cambio climático está afectando la frecuencia, intensidad y duración de los incendios forestales en todo el mundo, y cómo estas herramientas pueden ayudar a predecir su potencial. Gannon & Steinberg, (2021) analizaron el potencial de incendios forestales a nivel global bajo el cambio climático, utilizando el índice de sequía Keetch-Byram y clasificaciones de cobertura terrestre. Se utilizaron datos de precipitación y temperatura modelados del proyecto *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP), junto con datos de cobertura terrestre de la Iniciativa de Cambio Climático de la Agencia Espacial Europea (ESA CCI) y datos históricos de áreas quemadas del *Moderate Resolution Imaging Spectrometer* (MODIS) Collection 6. La metodología incluyó el uso del índice de sequía Keetch-Byram (KBDI) y un modelo de regresión logística para evaluar la probabilidad de incendios forestales. Además, se aplicaron técnicas de clasificación de imágenes para evaluar la relación entre la cobertura terrestre y la probabilidad de incendios. Los resultados destacan que el cambio climático está aumentando el potencial de incendios forestales en todo el mundo, con un aumento en los días de alto riesgo en varias regiones, y una mayor probabilidad de incendios en áreas antes no propensas.

Wei et al., (2022) analizaron cómo la sequía afecta la dinámica de la vegetación y su papel en el ciclo del agua, la materia y la energía en los ecosistemas terrestres. La falta de agua puede reducir la fotosíntesis y la transpiración de la vegetación, afectando su capacidad para regular el intercambio de agua y gases con la atmósfera. También puede impactar la estructura y composición de la vegetación, afectando la biodiversidad y estabilidad del ecosistema. Para evaluar esto, se utilizaron datos de índice de vegetación de diferencia normalizada

(NDVI) para analizar la respuesta de la vegetación a diferentes niveles de sequía en Xinjiang. Se emplearon tres índices de sequía para representar diferentes tensiones: el índice de precipitación estandarizado (SPI), el índice de precipitación-evapotranspiración estandarizado (SPEI) y el índice de humedad del suelo estandarizado (SSMI). Se aplicó un marco de evaluación probabilístico basado en cópulas para evaluar la vulnerabilidad de la vegetación, y se encontró que la sequía y la expansión de la agricultura de regadío han aumentado la vulnerabilidad de la vegetación en Xinjiang en las últimas décadas. El transporte ecológico de agua mostró efectos mixtos, aliviando el estrés por sequía en algunas áreas, pero generando conflictos con el uso del agua para la agricultura.

2.4 Sequía en México

En la revisión de O'Hara & Metcalfe, (1997) cuando los aztecas entraron en la cuenca de México prevalecían condiciones de sequía. Sin embargo, poco después de este tiempo, el clima se volvió más húmedo y el período de 1345 a 1640 parece haber sido relativamente húmedo. A partir de 1640 hasta 1915, el país experimentó una serie de sequías prolongadas y devastadoras que fueron extremadamente graves a mediados y finales del siglo XVIII y a finales del siglo XIX. Destacando severas inundaciones en el periodo de 1604 y 1607 en la Ciudad de México y las sequías y plagas de langostas en la década de 1550.

El fenómeno de El Niño afecta la precipitación en diferentes regiones de México de manera variada, V. O. Magaña et al., (2003) indican que, durante los inviernos de El Niño, la precipitación aumenta en el noroeste del país y disminuye en el Istmo de Tehuantepec. En verano, se observa un déficit de precipitación en la mayoría de México debido a El Niño. Estos cambios están asociados con mecanismos como la subsidencia reforzada, alisios intensos, menor número de

ciclones tropicales y reducción de la humedad relativa, lo que puede llevar a condiciones de sequía severa. El estudio utilizó datos de reanálisis del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) para analizar las circulaciones atmosféricas durante el período 1958-1999, y datos de temperatura de la superficie del mar (SST). Se encontró que El Niño y la precipitación pueden explicar hasta el 40% de la variabilidad estacional total en la lluvia, especialmente en el sur del país, y se destacó una correlación significativa entre la precipitación de verano en la región sur de Oaxaca y el índice de El Niño. Se discutió la utilidad de esquemas de regresión múltiple basados en predicciones globales de SST para predecir la precipitación estacional en México. En conclusión, El Niño es un factor importante en la variabilidad climática de México, con impactos económicos y sociales significativos, y se sugiere el uso de predicciones estacionales para la planificación socioeconómica.

El trabajo de Skoufias & Vinha, (2013) examinaron cómo los choques climáticos, como la variabilidad en la lluvia y la temperatura, afectan el consumo per cápita de alimentos y no alimentos de los hogares rurales en México. Los resultados sugieren que estos choques climáticos tienen un impacto significativo en la capacidad de los hogares para suavizar el consumo, lo que potencialmente afecta la salud y el bienestar de la población rural y puede influir en las decisiones de migración de los hogares. Además, el estudio destaca que la variabilidad climática asociada con el cambio climático es probable que reduzca aún más la efectividad de los mecanismos de adaptación actuales y aumente la vulnerabilidad de los hogares rurales en todo el mundo. El artículo utiliza datos de la Encuesta de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) de México para estimar el impacto de los choques climáticos en el consumo per cápita de los hogares. Los autores definen los choques climáticos como lluvias o días de crecimiento más de una desviación estándar de sus respectivas medias a largo

plazo. Luego, utilizan un modelo econométrico para estimar el impacto de estos choques en el consumo per cápita de alimentos y no alimentos de los hogares. Además, los autores realizan análisis de subgrupos para examinar cómo los efectos varían según el nivel de pobreza y la región geográfica. Los resultados del estudio sugieren que los choques climáticos tienen un impacto significativo en el consumo per cápita de alimentos y no alimentos de los hogares rurales en México. En particular, los autores encuentran que tanto los choques de lluvia como los de temperatura afectan el consumo de alimentos y no alimentos. Además, los autores encuentran que los hogares más pobres son más vulnerables a los choques climáticos que los hogares más ricos.

La sequía en México, especialmente en la región norte, donde ha habido escasez de agua, ha tenido a lo largo de la historia, conflictos de asignación de uso del recurso del río Bravo con Estados Unidos. Esto ha afectado gravemente sectores clave como agricultura, silvicultura y medio ambiente, aumentando el estrés hídrico en cultivos y vegetación, lo que incrementa el riesgo de incendios forestales. Para observar esto, V. Magaña et al., (2012) utilizaron datos climáticos y técnicas estadísticas para proyectar cambios en el clima, previendo una disminución de precipitación y aumento de temperatura debido al cambio climático. La metodología empleada combinó el análisis de datos climáticos globales con técnicas de "downscaling" estadístico para producir proyecciones climáticas regionales. Se utilizó previsibilidad climática (CPT) para corregir errores en los modelos de circulación general y se evaluó la incertidumbre en las proyecciones climáticas para el presente siglo. Además, se realizó un análisis de vulnerabilidad para evaluar cómo los impactos del cambio climático afectarán a diferentes sectores y comunidades, considerando factores socioeconómicos como la pobreza y desigualdad que aumentan la vulnerabilidad de ciertas comunidades. Por último se empleó el índice de sequía estandarizado (SPI) para

analizar la sequía en la región. Se prevé que el cambio climático tendrá un fuerte impacto en la disponibilidad de agua en el norte de México, con una disminución proyectada de precipitación y aumento de temperatura. Esto afectará negativamente a la agricultura, silvicultura y medio ambiente, y se espera un incremento en la frecuencia e intensidad de sequías y eventos climáticos extremos.

Ravelo et al., (2014) se centraron en un estudio realizado en la región de la cuenca Pacífico Norte en México, que tiene como objetivo detectar, evaluar y pronosticar sequías en esa zona. El estudio emplea diversos índices como el SPI, PDSI y el NDVI, para identificar y prever condiciones hídricas extremas que afectan la agricultura y otras actividades socioeconómicas. Utiliza datos de precipitación, evapotranspiración potencial, imágenes satelitales de MODIS y capacidad de retención hídrica del suelo de 54 estaciones meteorológicas de la región. Como resultados se observó que durante las últimas décadas, la región de la Cuenca Pacífico Norte en México ha enfrentado sequías recurrentes y prolongadas, lo que ha tenido un impacto significativo en la disponibilidad de agua para la agricultura y otras actividades socioeconómicas. Según los resultados del estudio, las sequías más severas se registraron en los períodos de 1995-1996, 2001-2002, 2009-2010 y 2011-2012.

El estudio de Ortiz-Gómez et al., (2018) se enfocaron en el análisis de las sequías meteorológicas en Zacatecas, México, utilizando tres índices multiescalares: SPI, RDI y SPEI. El objetivo principal es identificar y caracterizar las sequías en la región, buscando formas de mitigar sus efectos. Los resultados muestran la detección de periodos secos en la zona mediante los tres índices multiescalares. Se compararon los índices utilizando coeficientes de correlación de Pearson y de Spearman, destacando una alta correlación entre SPI y SPEI en la mayoría de

las estaciones meteorológicas. Además, se identificaron las estaciones con correlaciones más bajas y altas en escalas de 3 y 6 meses.

Medir la vulnerabilidad es un proceso complejo y sin un consenso metodológico a seguir, por lo cual Neri & Magaña, (2016) abordaron la estimación de la vulnerabilidad y el riesgo relacionados con la sequía meteorológica en México. Se propone una metodología que considera aspectos físicos, económicos y sociales que hacen que ciertas áreas del país sean más susceptibles a experimentar sequías hidrológicas y agrícolas. Para lograr este propósito, se presenta un enfoque que define el objeto de estudio, la amenaza natural y los factores de vulnerabilidad mediante el uso de indicadores. Estos indicadores pueden cubrir aspectos relacionados con la población, la economía y las condiciones físicas, entre otros. Es fundamental seleccionar indicadores claros, robustos, representativos y fáciles de entender para aquellos responsables de formular políticas públicas. El estudio sigue el enfoque de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR), que define la vulnerabilidad como las condiciones determinadas por factores físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de un sistema o comunidad al impacto de las amenazas. Este enfoque amplía el espectro de factores de vulnerabilidad que se pueden evaluar mediante indicadores y transformar en índices. La metodología propuesta permite identificar las regiones más vulnerables a la sequía meteorológica en México y evaluar el riesgo asociado a este fenómeno. Los resultados del estudio demuestran que la vulnerabilidad y el riesgo de sequía varían significativamente en todo el territorio mexicano, y las regiones más vulnerables son aquellas que presentan una combinación desfavorable de factores físicos, económicos y sociales.

2.5 Referencias

- Afzal, M., & Ragab, R. (2019). Drought Risk under Climate and Land Use Changes: Implication to Water Resource Availability at Catchment Scale. *Water*, 9, 1–29. <https://doi.org/10.3390/w11091790>
- AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F. S., Teixeira, J., Anderson, M. C., Wardlow, B. D., & Hain, C. R. (2015). Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 452–480. <https://doi.org/10.1002/2014RG000456>
- Alwang, J., Siegel, P. B., & Jorgensen, S. L. (2001). *Vulnerability : a view from different disciplines* (Issue 23304). <https://ideas.repec.org/p/wbk/hdnspu/23304.html>
- Anderson, L. O., Neto, G. R., Cunha, A. P., Fonseca, M. G., De Moura, Y. M., Dalagnol, R., Wagner, F. H., & De Aragão, L. E. O. E. C. (2018). Vulnerability of Amazonian forests to repeated droughts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1760). <https://doi.org/10.1098/RSTB.2017.0411>
- Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreño, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Kienberger, S., Keiler, M., Alexander, D., Zeil, P., & Welle, T. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: The MOVE framework. *Natural Hazards*, 67(2), 193–211. <https://doi.org/10.1007/S11069-013-0558-5/TABLES/1>
- Cutter, S. L. (1996). Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, 20(4), 529–539. <https://doi.org/10.1177/030913259602000407>

- Dimitrakopoulos, A. P., & Bemmerzouk, A. M. (2003). Predicting live herbaceous moisture content from a seasonal drought index. *International Journal of Biometeorology*, 47(2), 73–79. <https://doi.org/10.1007/S00484-002-0151-1>
- Eakin, H., & Luers, A. L. (2006). Assessing the vulnerability of social-environmental systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 31, 365–394. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.ENERGY.30.050504.144352>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). *The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes*. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gannon, C. S., & Steinberg, N. C. (2021). A global assessment of wildfire potential under climate change utilizing Keetch-Byram drought index and land cover classifications. *Environmental Research Communications*, 3(3), 035002. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/abd836>
- Heim, R. R. (2002). A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149–1166. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1149>
- Ji, L., & Peters, A. J. (2003). Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 85–98. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00174-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00174-3)
- Keetch, J. J., & Byram, G. M. (1968). A Drought Index for Forest Fire Control. *Res. Pap. SE-38*. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. 35 p., 038. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/40>

- Kraaij, T., Baard, J. A., Arndt, J., Vhengani, L., & van Wilgen, B. W. (2018). An assessment of climate, weather, and fuel factors influencing a large, destructive wildfire in the Knysna region, South Africa. *Fire Ecology*, 14(2), 4. <https://doi.org/10.1186/s42408-018-0001-0>
- Liu, W. C., Bravo De Guenni, L., Lee, H., Tsun, J., Yang, H., Ndayiragije, J. M., & Li, F. (2022). Effectiveness of Drought Indices in the Assessment of Different Types of Droughts, Managing and Mitigating Their Effects. *Climate 2022*, Vol. 10, Page 125, 10(9), 125. <https://doi.org/10.3390/CLI10090125>
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313–330. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56842304>
- Magaña, V., Zermeño, D., & Neri, C. (2012). Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Climate Research*, 51(2), 171–184. <https://doi.org/10.3354/CR01080>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). THE RELATIONSHIP OF DROUGHT FREQUENCY AND DURATION TO TIME SCALES. *Department of Atmospheric Science*. <https://doi.org/null>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2010.07.012>
- Neri, C., & Magaña, V. (2016). Estimation of Vulnerability and Risk to Meteorological Drought in Mexico. *Weather, Climate, and Society*, 8(2), 95–110. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-15-0005.1>

- O'Hara, S. L., & Metcalfe, S. E. (1997). The climate of Mexico since the Aztec period. *Quaternary International*, 43–44, 25–31. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(97\)00017-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(97)00017-7)
- Ortiz-Gómez, R., Cardona-Díaz, J. C., Ortiz-Robles, F. A., & Alvarado-Medellin, P. (2018). Caracterización de las sequías mediante la comparación de tres índices multiescales en Zacatecas, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 09(3), 47–91. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-03>
- Parry, M. L., Canziani, O., Palutikof, J. P., van der Linden, P., & Hanson, C. E. (2007). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. In *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Ravelo, A. C., Sanz Ramos, R., & Douriet Cárdenas, J. C. (2014). Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. *AgriScientia*, 31(1), 11–24. <https://doi.org/10.31047/1668.298X.V31.N1.9836>
- Saleska, S. R., Didan, K., Huete, A. R., & Da Rocha, H. R. (2007). Amazon forests green-up during 2005 drought. *Science (New York, N.Y.)*, 318(5850), 612. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1146663>
- Skoufias, E., & Vinha, K. (2013). The impacts of climate variability on household welfare in rural Mexico. *Population and Environment*, 34(3), 370–399. <https://doi.org/10.1007/s11111-012-0167-3>
- Smit, B., & Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 282–292. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2006.03.008>

Svoboda, M., LeComte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., & Stephens, S. (2002). The Drought Monitor. *Drought Mitigation Center Faculty Publications*.
<https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/166>

Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matsone, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A., & Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14), 8074–8079.
<https://doi.org/10.1073/PNAS.1231335100/ASSET/2E9EB157-660D-4672-985F-EB8D3F7127F5/ASSETS/GRAPHIC/PQ1231335004.JPEG>

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718.
<https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Wei, X., Huang, S., Huang, Q., Liu, D., Leng, G., Yang, H., Duan, W., Li, J., Bai, Q., & Peng, J. (2022). Analysis of Vegetation Vulnerability Dynamics and Driving Forces to Multiple Drought Stresses in a Changing Environment. *Remote Sensing*, 14(17), 4231. <https://doi.org/10.3390/rs14174231>

Wilhite, D. (2000). Chapter 1 Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. *Drought Mitigation Center Faculty Publications*.
<https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/69>

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111–120.
<https://doi.org/10.1080/02508068508686328>

Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2004). *At Risk: Natural Hazards*.

Zhang, X., & Zhang, B. (2019). The responses of natural vegetation dynamics to drought during the growing season across China. *Journal of Hydrology*, 574, 706–714. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.084>

CAPITULO 3. DROUGHT AND VULNERABILITY IN MEXICO'S FOREST ECOSYSTEMS ³

Abstract: In Mexico, some regions have frequent droughts, while others are beginning to experience their presence and impacts. Therefore, the objective of this work was to characterize drought in the last twenty-one years and evaluate the vulnerability of forests to this phenomenon. The method consisted of applying the standard precipitation index (SPI-12), calculating the drought vulnerability index (DVI) and applying it to the country's forest areas. The results confirm that forests are vulnerable to drought for five main reasons. First, geographically, the country has large arid and semiarid areas with little natural precipitation. Second, droughts frequently occur and are present in the national territory, covering from 25% to 75% of the surface in recent years. Third, the socio-economic characteristics of the population living in municipalities and forest territories increases the vulnerability of these areas to drought. Fourth, drought can trigger other catastrophes, such as fires or forest pests. Fifth, the combination of two or more of the above in the same territory magnifies exposure to drought for both forests and people. Temperate forest ecosystems, in particular, have been subject to the prevalence of drought in recent years and thus should receive more attention. Finally, technical and cartographic elements such as those presented here are essential for supporting the formulation of proactive forest response plans to address droughts events.

Keywords: standard precipitation index; drought vulnerability index; Morans; temperate forest; tropical forest

³ Artículo sometido a la revista FORESTS, a la fecha se encuentra en revisión.

1. Introduction

Drought is a natural phenomenon that occurs in all regions of the world [1]. It occurs when the amount of precipitation decreases considerably in a given region and time. Droughts are a normal climatic condition that can occur anywhere in the world in areas with either humid or desert climates [2]. In addition to the lack of rain, other climatic factors, such as high temperatures, strong winds and low relative humidity, can contribute to the effects of drought and worsen its severity.

Each year, drought has unique climatic characteristics and impacts; drought is related to the effectiveness of rainfall in the region. A prolonged lack of rain results in a scarcity of water for human needs and natural ecosystems [3]. Thus, droughts can have significant and wide-ranging effects, affecting multiple economic sectors and people [4]. In 2022, two-thirds of the Earth's surface had river flows below the planet's average [5]. Additionally, losses and damages were approximately 100 billion dollars in the period from 2010 to 2019 [6].

Therefore, the World Meteorological Organization [7] has recommended measuring and monitoring the presence of droughts throughout the planet. The effects of drought are considerable and widespread, and each drought occurrence harms many economic sectors and people. Measuring and monitoring drought allows anticipating and preventing impacts, so the surveillance, early warning and management systems of droughts should be improved. However, drought monitoring requires robust methods that identify droughts early and quickly.

Different methods can be applied to measure drought. Some quantify the reduction in precipitation (known as meteorological drought), such as the Standard Precipitation Index (SPI). This measures the deviation of current precipitation compared to a reference period. Additionally, the normal precipitation percentage method [8] is used to evaluate the amount of precipitation received in

relation to the historical average. The water availability percentage assesses the supply and demand for water in a specific region. There are also methods based on quantifying the loss of soil moisture, such as the Palmer index [9] or Soil Moisture Leaking Bucket (Model CPC-NOAA), which assesses soil moisture in relation to its water holding capacity [10]. Methods that measure the degree of vegetation stress are becoming more frequent, such as the Satellite Vegetation Health Index (VHI) or the Normalized Vegetation Difference Index (NDVI) [11]. The VHI uses temperature and vegetation measurements to determine the condition of vegetation. The NDVI uses the reflectance of the Earth's surface to assess the health of vegetation. Both the SPI and the NDVI have been shown to be adequate and have reliable results [12,13]. The above are used to monitor and evaluate drought conditions in terms of the amount of precipitation, vegetation, soil moisture, temperature, and water availability. In Mexico, they have been applied for monitoring droughts [6].

In Mexico, drought used to be reactively addressed, implementing emergency aid programs after the phenomenon manifested itself [14]. Programs sought to ensure the supply of water and food, preserve health, or support economic recovery. However, the drought of 2011-2012, considered to date the most severe since 1941 in the north-ern and central regions of Mexico, generated a radical change in the strategy of the Mexican government and society. Since then, greater anticipation of future drought has led to concrete local prevention plans to mitigate drought in advance [15]. For example, the National Program Against Drought (PRONACOSE) is currently being promoted, which attempts to adopt a comprehensive and participatory approach to face the phenomenon [16].

Due to its geographical position, Mexico is vulnerable to various climatic phenomena, such as hurricanes, cold fronts and droughts [17]. Although there is specialized cartography on drought, it is not yet applicable to forests. The most

recent maps of vulnerability to drought (<https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/mapas-de-vulnerabilidad-a-la-sequia-a-nivel-municipal?state=published>) are valuable products but do not link their presence to or impact on forest ecosystems. Thus, in Mexico, there are no cartography or studies that show the vulnerability of forest ecosystems to drought.

Therefore, this work aims to characterize drought in recent years and evaluate the vulnerability of forests to this phenomenon. The SPI-12 method was applied to quantify the presence of droughts spatially and temporally to more precisely understand drought patterns, including duration, intensity and frequency. In addition, the vulnerability of forestlands was evaluated considering social, economic and infrastructure aspects at the municipal level. This made it possible to identify areas more prone to the effects of drought, as well as regions with varying degrees of vulnerability that can direct mitigation and adaptation efforts toward those areas that require priority attention.

2. Materials and Methods

The method consisted of three stages: spatial mapping of drought in Mexico, calculation of the index of vulnerability to drought and calculation of the vulnerability of forest ecosystems. They are described below.

Drought mapping

The presence of drought was mapped using the SPI-12 or annual drought summary, which is recommended by the OMM [7] for monitoring and tracking meteorological droughts. For this, the database of 415 meteorological stations distributed throughout the Mexican territory was downloaded. The stations include the annual value of the SPI-12 for the period between 2000 and 2020 and were taken from the National Meteorological Service

(<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/spi>, June 2022). Afterward, drought mapping was obtained for each of the 21 years by interpolation. The method applied was the IDW tool with a pixel resolution of 200 meters. The annual maps were classified according to drought intensity following the recommendation of the “Guide of good practices for the preparation of national reports” of the United Nations Convention to Combat Desertification [18], which suggests the following values for SPI-12: from 0 to -0.99 mild drought; from -1 to -1.49 moderate drought; -1.5 to -1.99 severe drought and greater than -2 extreme drought. Positive values or values greater than 0 indicate the presence of moisture. Afterward, a 'compiled map' was made by joining the maps of the 21 years into a single map, accounting for the drought classes of each one. This map adds all the droughts of the period and thus reflects the greater severity of droughts in the period studied.

Vulnerability Indicator

A vulnerability indicator was constructed considering three dimensions: social, economic and infrastructure, following the recommendation of UNCCD. Five variables were included in the social dimension: 1) literacy rate (percentage of people over 15 years old), 2) rural population (percentage in municipalities), 3) life expectancy at birth (in years per municipality) and 4) population aged 15 to 64 (percentage of the municipality). All of the above were obtained from the INEGI Population and Housing Censuses for the years 2000, 2005, 2010 and 2020 (<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>, June 2022). Additionally, variable 5) government effectiveness (dimensionless) was obtained from [19].

The economic dimension included three variables: 1) population below the international poverty line (percentage of the municipality) taken from the CONEVAL

Poverty	Indicators	Concentrate
(https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobreza-municipio-2010-2020.aspx, July 2022), 2) the Gross Domestic Product per capita and contribution of agriculture to GDP obtained from the Gross Domestic Product by federal entity (PIBE) of INEGI, 1980-2021 (https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/default.aspx?pr=17&vr=7&in=2&tp=20&wr=1&cno=2, July 2022), and 3) energy consumption (kilograms of oil equivalent per capita) obtained from the World Bank (https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE, July 2022).		

The infrastructure dimension considered four variables: 1) population that has drinking water services (percentage of the municipality) obtained from the INEGI population and housing censuses for the years 2000, 2005, 2010 and 2020 (<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/> July, 2022), 2) total renewable water resources per capita (m³/inhab/year) obtained from CONAGUA in the “Water Statistics” (<https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/publicaciones-estadisticas-y-geograficas-60692>, July, 2022), 3) the cultivated area equipped with irrigation (percentage of the municipality) through the cartographic layers of land use and vegetation of INEGI (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>, July, 2022), and 4) infiltration (hm³/year) that contemplates a balance of water inlet and outlet in aquifers in the municipalities obtained from the “Water Statistics” of CONAGUA (<https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/publicaciones-estadisticas-y-geograficas-60692>, July, 2022).

With the information of the 12 variables, a database was developed at the municipal level. The data were standardized following Barker et al., [20]. For each dimension, an algebraic sum was made of its variables to obtain a value that was later divided by 3; it was included in the vulnerability index (VI) according to:

$$\text{Vulnerability Index} = (\text{Social} + \text{Economic} + \text{Infrastructure})/3 \quad (1)$$

where the social dimension was the sum of five variables, the economic dimension was the sum of three variables and the infrastructure dimension included four variables. Once the average was calculated, the values were standardized to later determine the vulnerability index (VI) classes. The k-means statistic was used in R [21] to generate four groups named 1 to 4, which were validated using the elbow method and the strength of the groups to validate if they were adequate, thus obtaining the classes of low, medium, high and very high vulnerability, respectively. The IV ranges were de-fined as follows: class 1 includes values from 0 to 0.35; class 2 includes values from 0.36 to 0.54; class 3 includes values from 0.55 to 0.71; and class 4 includes values from 0.72 to 1. The compiled drought map (D) was added to the database, which reflects the sum of the last 21 years, and Formula 2 was applied:

$$\text{DVI} = \text{VI} + \text{D} \quad (2)$$

Subsequently, the factor that causes the greatest effect in the municipality was added. If it is drought, letter D was assigned, if it is vulnerability, letter V was assigned, and if it is both drought and vulnerability, it was assigned B. In addition, a spatial analysis was carried out from the bivariate local Moran analysis (w in Formula 3). The analysis is based on Moran's Local index, which assesses the spatial autocorrelation of one or more variables. In this case, the correlation of two variables was sought based on their presence and spatial magnitude [22]. The analysis was performed with GeoDA (version 1.20) [23], where a weight matrix was created through the map of boundaries between municipalities. For this, the K-Neighbors method was applied with a value of 7 neighbors (national average of municipalities in Mexico). In this way, five groups or clusters were obtained according to the spatial correlation class between drought and

vulnerability: not significant for both (NS), high-high correlation between both (HH), high correlation drought and low vulnerability (HL), low correlation drought and high vulnerability (LH) and low-low correlation between the two (LL). Finally, the drought vulnerability index (DVI) was obtained, as shown in Formula 3:

$$\text{Municipal DVI} = w (\text{VI} + \text{D}) \quad (3)$$

Vulnerability of forest areas

The forest areas were obtained from the use of soil and vegetation of INEGI (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>) in 2018. The classes were grouped into forests of temperate zones, forests of tropical zones and vegetation of semiarid areas. Finally, a DVI intersection was carried out for each forest area of the country, and vulnerability analysis was carried out in these areas.

3. Results

Drought in Mexico

Mexico is a country that suffers from drought practically every year. The difference is the magnitude and how it is distributed in the territory (Figure 1). In Supplementary Material (SM1), the annual maps are presented. If we consider the years with the least presence of drought at the national level (25 and 30% of the surface), six years in the period studied are of note: 2004, 2008, 2010, 2013, 2014 and 2015. Drought that covered between 30 and 50% of the national territory was observed in another six years: 2003, 2006, 2007, 2016, 2017 and 2018.

Drought covered more than 50% of the national surface in nine years of the study period (2000, 2001, 2002, 2005, 2009, 2011, 2012, 2019 and 2020). The year of 2011 most affected the country, with 77% of the national surface covered. That year, extreme drought impacted 8% of the country, and 19% had a severe

drought. The year with the least impact was 2015, with 25% of the national surface covered.

Cumulatively for the 21 years studied, drought covered practically the entire national territory (Figure 1a). The class with the highest coverage is severe drought (37%), followed by moderate drought (36%), extreme drought (17%) and mild drought (9%). The most severe categories are concentrated in the regions of the north, west and in the central plateau of Mexico, while in the regions of the center, east, southeast and southwest, mild or moderate drought is present.

Extreme drought affected 368 municipalities countrywide, which is equivalent to 15% of the total number of municipalities in the country. Severe drought was manifested in 684 municipalities (28%), moderate drought in 924 municipalities (34%) and mild drought in 493 municipalities (20% of the total).

Vulnerability to drought

To determine the vulnerability of the municipalities to drought, three dimensions were integrated: social, economic and infrastructure. The statistical results are presented in supplementary material SM2 and SM3, and the cartographic results are presented in Figure 2.

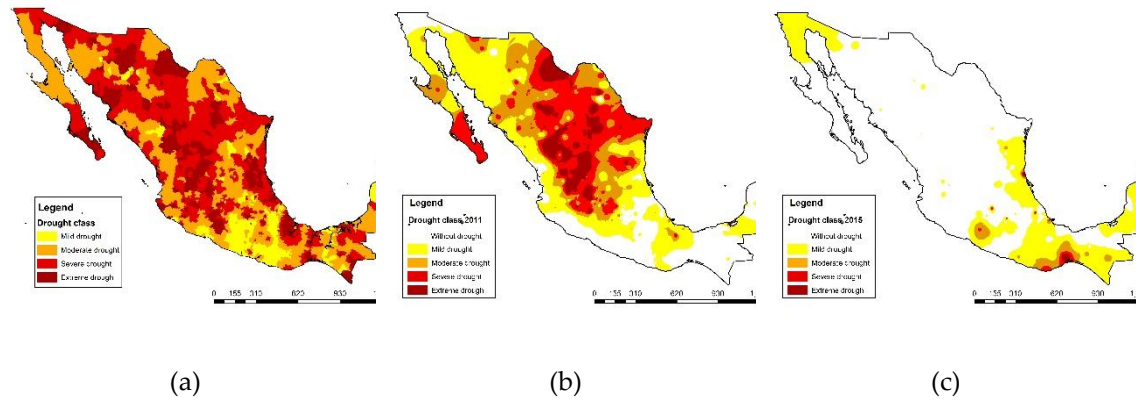


Figure 3.1 Presence of a) cumulative drought for 21 years studied (2000-2020) b) drought in the most severe year 2011 and c) drought in the least affected year 2015.

The social dimension shows that 553 municipalities (22%) have very high social vulnerability. High vulnerability defines 775 municipalities (31%), and medium vulnerability defines 703 municipalities (32%). Low social vulnerability defines 438 municipalities (18%). For the economic dimension, 1607 municipalities have very high economic vulnerability (65% of the national total). High vulnerability defines 688 municipalities (28%), and medium vulnerability defines 151 municipalities (6%). Low economic vulnerability is identified in 23 municipalities (0.26%). For the infrastructure dimension, 716 municipalities have very high infrastructural vulnerability (29% of the national total). There are 1,316 municipalities with high vulnerability (53%) and 142 or 6% with medium vulnerability.

Once the dimensions are integrated, vulnerability at the municipal level (Figure 2a) shows that 485 municipalities (20%) present very high vulnerability. High vulnerability is presented in 663 municipalities (27%), and medium vulnerability is presented in 768 municipalities (31%). Finally, 553 municipalities (22%) exhibit low vulnerability.

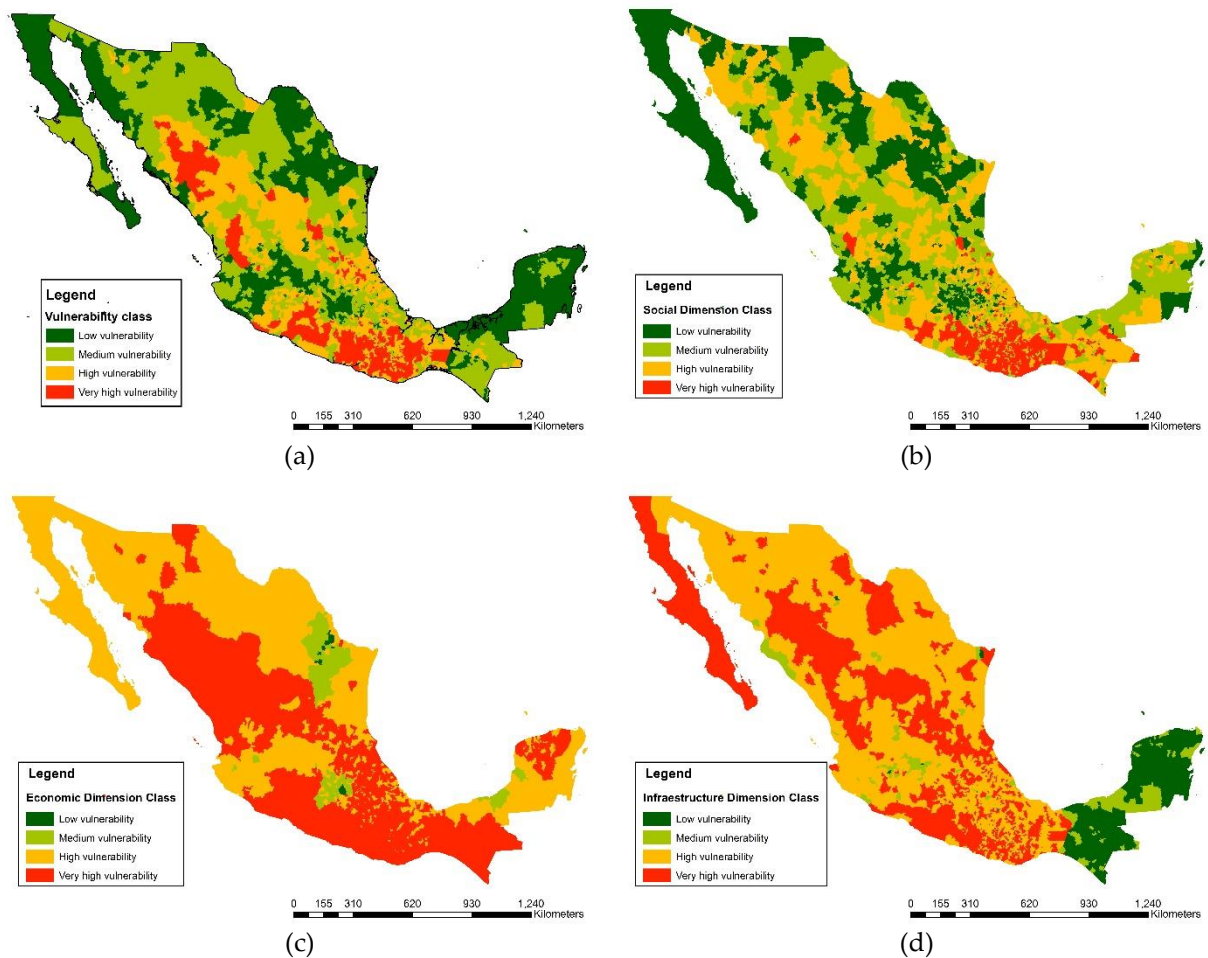


Figure 3.2 a) Vulnerability in municipalities and dimensions that compose it: b) social dimension, c) economic dimension and d) infrastructure dimension.

Vulnerability, drought or both

The spatial analysis of Morán bivariate [22] allowed us to know if drought or its internal characteristics that define its vulnerability have more weight in a municipality and also allow comparison with neighboring municipalities. The results are shown in Table 1 and in Figure 3a.

Table 3.1. Spatial correlation classes of municipalities according to vulnerability and drought with neighboring municipalities.

Class	Correlation		Policy / Management	Total municipalities
	Neighbors with drought	With vulnerable neighbors		
HH	High	High	Urgent attention	143
HL	High	Low	Early warning systems	383
LH	Low	High	Encourage adaptive capacity	510
LL	Low	Low	Monitoring	327
NS	Not significant		Monitoring	1106
Total municipalities in country				2469

Vulnerability of forest areas to drought

The forest areas of Mexico are presented in Figure 3b. In recent years, drought has affected almost 90% of the country's forests; for extreme drought, 16% of the forest area and 728 municipalities have been impacted. Severe drought has occurred in 33% of the area and in 1402 municipalities. Moderate drought was present in 40% of the surface of 1899 municipalities.

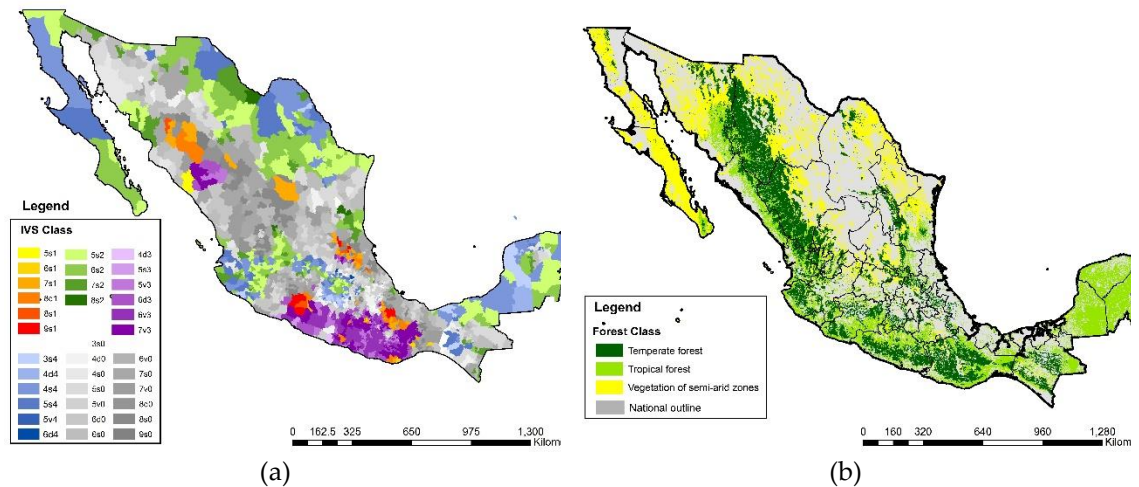


Figure 3.3 a) Classes of vulnerability to drought in municipalities of Mexico and b) types of dominant forest cover. Red colors refer to high-high correlation between drought and vulnerability (HH), green to high drought and low vulnerability correlation (HL), purple to low drought and high vulnerability correlation (LH) and gray to no significance between drought and vulnerability (NS).

According to their type of habitat, the forests were grouped into tropical, temperate and semiarid (Figure 4). If extreme and severe drought is considered, 44% of tropical forests have been affected, as have been 45% of temperate forests and 55% of semi-arid regions. Moderate drought has been present in practically 40% of the three types of forest. The above indicates that the effect of moderate to extreme drought in the forests of Mexico has been 88%, 85% and 95% for tropical, temperate and semiarid regions, respectively. Finally, a greater concentration of the most serious DVI classes (those with high-high correlation or HH) was identified for the total forest classes: 8.2% of the temperate forest was covered, followed by the tropical forest with 7.1% and the vegetation of semiarid zones with 1.34%.

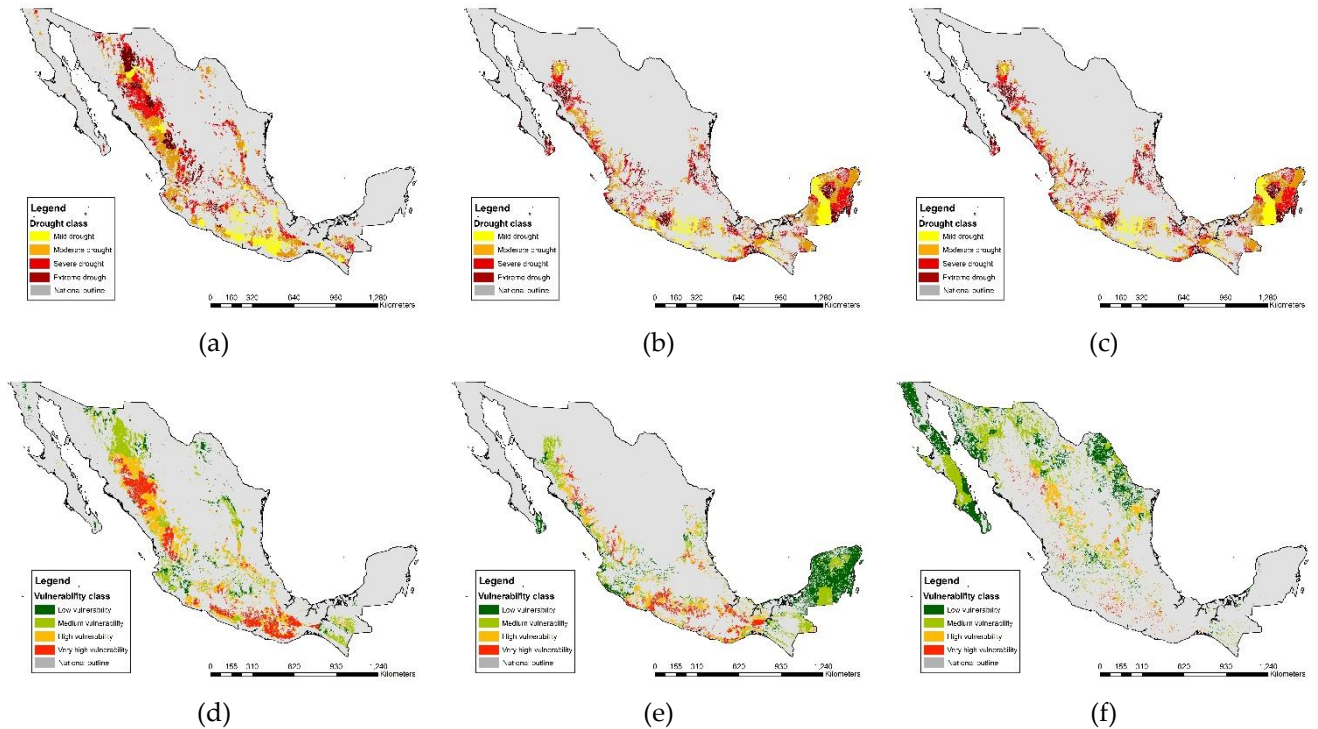


Figure 3.4 Type of drought (top) and type of vulnerability (bottom) in forest areas of Mexico according to region: (a) and (d) temperate, (b) and (e) tropical, (c) and (f) semi-arid.

4. Discussion

The results obtained show that drought has been present in practically the entire country for the last twenty years. The findings reported here are consistent with what was obtained in the last two national reports on land degradation and drought [24], which indicated an average of 32% and 46% of the country were affected by drought in 2018 and 2023, respectively, which is close to the 47.5% of the present study. Specifically, during 2011, 60% of the territory was declared to have some degree of drought [25], while our results indicate 77% of the national surface. The difference is mainly due to the drought estimation methods used.

In the case of CONAGUA, Mexico's official source of drought information, the SPI is used on a monthly basis and with a limited number of reference stations. However, the method used here contemplates a 12-month analysis, with 415 stations with data of more than 30 years per station, compared to the data available in Mexico in 2011 and processed by the North American drought monitor (NADM).

The geographical position of the country is a key element that defines the presence of droughts. The country is located between latitudes 14° and 32° north; this location coincides with areas of hot air descent that generate a humidity deficit. The Chihuahuan Desert, a representative ecosystem with little precipitation, is limited to the south at approximately 30°N. Thus, the northern region of the country is more prone to re-current droughts; however, it is worth noting other regions where the presence of drought has become more frequent.

During the twenty-year period studied, it was observed that the northern region and the central region of the country, where the greatest agricultural production and its derivatives are concentrated, experienced the most extreme types of droughts. Severe drought has affected 40% of the surface, and extreme drought has affected 27%, which demands attention. Drought costs are becoming increasingly serious. For example, it is estimated that for each month of severe, extreme and exceptional drought, in these regions, 0.22, 0.32 and 0.39 points in the national GDP could be lost, respectively [26].

In the north of the country, losses of crops and livestock have been reported in Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí, Sonora and Tamaulipas. These states suffered damage to 2,700,000 hectares of bean and corn crops due to the drought of 2011 [27]. In that year, the affectation meant 35% of the national surface (with extreme drought). Additionally, in that year, 2.7 million

hectares of crops were damaged due to drought in the states of Sinaloa, Zacatecas and Guanajuato [28]; furthermore, water and food shortages in 68% of the territory occurred in subsequent years [29]. Thus, drought occurs with different intensities and frequencies in different areas of the country. In the period studied, for at least nine years, drought has impacted more than 50% of the territory. However, the impacts and consequences have been diverse, socially, economically and environmentally.

The region of the Yucatan Peninsula has the highest concentration of municipalities with a low-low relationship between vulnerability and drought. This region is less affected by these variables. This is because it is located in a region with the highest aquifer recharge at the national level (25,316 hm³ / year). In addition, it has one of the largest renewable water reserves, 29,647 hm³ / year [30]. In contrast, the northeast and northwest regions of the country have been mostly affected by droughts but show low vulnerability. This coincides with the findings of Carrão et al.[31], who noted that the northern region has more socioeconomic capacity to manage problems and crises. Data from PNUD [32], indicates that the northern municipalities with the greatest development are in the state of Nuevo León, where San Pedro Garza García is of particular note, with high values in the human development, education, health and income indices.

According to data from CONEVAL [33], the states of Oaxaca and Guerrero show greater social lag at the national level, despite advances in the last 24 years in increasing basic electricity services or drinking water coverage. In these states, municipalities have the lowest values for the variables used to calculate the vulnerability indicator. These and other entities need to improve their communities services for population development purposes and to reduce vulnerability to drought.

Vulnerability refers to the characteristics and circumstances of a community or system that make it susceptible to the damaging effects of a threat [34]. This can include physical, social, economic and environmental factors that increase the risk of damage in the event of a disaster, such as the presence of a drought. The phenomenon can progress slowly until it affects natural ecosystems, including even the most resilient ones, such as forests. Although forests have deep root systems, the frequent presence of droughts can affect them or trigger other catastrophic events, such as forest fires or pests.

According to Cisneros González et al. [35], there is a direct relationship between drought events and the occurrence and spread of forest fires. In 2016, there was a 56% increase in the occurrence of forest fires compared to 2005. Additionally, the area affected by fires increased by 68%. An average of 7985 fires per year affected 317,441 hectares. The National Forest Information System [36] has recorded historical data on forest fires from 1970 to the present. The states with the greatest spread of forest fires are Jalisco, Chiapas, Chihuahua, Durango and Coahuila; more than 1 million hectares have been affected. These regions coincide with the presence of droughts in the period studied.

After the great drought of 2011, an increase in pests, mainly primary and secondary debarking, was detected in temperate forests, which were previously affected by droughts. These damages were located in the states of Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Durango, Guanajuato and Mexico City, with an affected area of more than twenty thousand hectares [37].

Thus, forest ecosystems are not exempt from the impacts of droughts. As the results show, 90% of the country's forests have suffered from some drought in recent years. Practically half of the forest area (49%) has experienced an extreme and severe drought. In the latest report of the 2015-2020 national forest inventory,

the presence of drought was reported in 26% of the sampled forest areas. Temperate forests represented 83% of the reports, tropical forests accounted for 7%, and the vegetation of semiarid zones accounted for 10% [38]. On many occasions, coping with drought is almost impossible due to a lack of forecasting and early warnings; however, in other cases, it is also due to the socioeconomic characteristics of the municipalities, as well as those of neighboring municipalities.

As previously presented, exposure to both drought and vulnerability (Figure 3a) are present in the country's municipalities. This double exposure affects forests but also prevents an adequate social response. If both a municipality and its neighboring municipalities have high socioeconomic vulnerability well, it is more difficult to anticipate drought or manage forest fires or pests. Temperate forests (mostly conifers) found in the states of Durango and Chihuahua are doubly exposed and should receive urgent attention due to the presence of both drought and greater socioeconomic vulnerability. The same situation can be found in other municipalities, though to a lesser degree, in the state of Michoacán and in the northern part of the state of Oaxaca.

However, there are also positive aspects of the presence of droughts. Notably, they can promote tree diversity in tropical forests, which in turn improves the system's ability to adapt to drier conditions [39]. Additionally, the diversity in species, traits and functional strategies to face drought is an important factor in regulating the vulnerability of ecosystems to drought. Mixed forests, with their greater diversity, have a lower vulnerability than monospecific forests during drought [40]. In other words, diversity strengthens the capacity of forests to resist and maintain stable operation in the face of extreme climatic events.

In summary, the results confirm that the forests and forest areas of Mexico are vulnerable to drought for five main reasons: 1) their geographical location that

results in wide arid and semiarid areas with little natural precipitation, 2) the frequent occurrence and presence of droughts in the national territory, which in recent years has been from 25% to 75% of the surface, 3) the socioeconomic characteristics of the population that lives in municipalities and forest territories, which makes them vulnerable and in some cases prevents them from having plans to prevent medium- and far-horizon droughts, 4) the ability of drought to trigger other catastrophes such as fires or forest pests, which are increasingly frequent due to climate change, and 5) the combination of two or more of the above in the same territory, which magnifies the drought exposure of forests and people.

Although the government had made important efforts, it is not prepared to face droughts and their consequences. Fenderman [41] establishes that traditionally the Mexican government has traditionally responded to drought by implementing emergency assistance programs that are activated once the phenomenon has occurred. These programs are aimed at guaranteeing the supply of water and food, maintaining the health of the population, recovering the affected economy and promoting relief projects. Palliative measures are considered until the rainy season returns, which ends the drought [27]. For this reason, technical and cartographic elements such as those presented here are essential for assisting in the formulation of proactive response plans for droughts.

5. Conclusions

Mexico has a complex territory and a geographic location conducive to droughts. The SPI-12 method was used to obtain annual cartography and accurately identified the presence of droughts in the country. This method is easy to apply and update with new data, and it can be replicated in other regions. Regarding the method to determine the vulnerability of the municipalities, it was a challenge

to limit the variables to the ones recommended by the UNCCD. Although the results can shed light on the state of the municipalities, it is essential to establish better variables that are more focused, specific and linked to drought. The allocation of weights to municipalities, according to their exposure to drought or vulnerability, is useful and innovative in our territory. The same is true when considering neighboring municipalities; thus, defining classes of vulnerability can advance the characterization of droughts and possible alternatives for their management. The impacts of this climatic phenomenon on municipalities and surrounding areas can be identified and jointly addressed. With regard to forest areas, the effect of drought is different throughout the country, but arid and semiarid areas have been affected more, as expected, due to their predominantly dry climate. However, the prevalence of drought in recent years in temperate ecosystems is striking. It is worth paying attention to the states of Durango, Oaxaca and Guerrero, which require urgent measures for drought adaptation and mitigation. Future work should focus on identifying new vulnerability variables, as well as projections for climate change. Both increased temperatures and decreased precipitation magnify the problem of drought in the country.

6. References

1. Wilhite, D.A. Chapter 1 as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. Drought: A Global Assessment 2000, 1, 3–19.
2. Meteorological Organization, W.; Water Partnership, G. Integrated Drought Management Programme Handbook of Drought Indicators and Indices; 2016; ISBN 978-91-87823-24-4.
3. SEMARNAT; CONAGUA SEQUÍA Available online: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/629223/CP_Presentaci_n_Sequ_u_a_Medios_14042021.pdf (accessed on 9 June 2023).

4. Diario Oficial de la Federación ACUERDO de Carácter General de Inicio de Emergencia Por Ocurrencia de Sequía Severa, Extrema o Excepcional En Cuencas Para El Año 2022. Available online: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5657697&fecha=12/07/2022#gsc.tab=0 (accessed on 9 June 2023).
5. WMO State of global water resources 2021; 2022;
6. WMO WMO ATLAS OF MORTALITY AND ECONOMIC LOSSES FROM WEATHER, CLIMATE AND WATER EX-TREMES(1970–2019); Switzerland, 2021;
7. OMM; SEMARNAT; Victor Magaña Fortalecimiento Del Manejo Integrado Del Agua En México (PREMIA); CDMX, 2015;
8. Mckee, T.B.; Doesken, N.J.; Kleist, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology 1993, 17–22.
9. Palmer, W.C. Meteorological Drought. US Weather Bureau 1965, Paper 45.
10. Marinescu, P.J.; Hilburn, K.; Abdi, D.; Jankov, I.; Marinescu, P.J. A Comparison of NOAA Modeled and In Situ Soil Moisture Estimates Across the Continental United States. Authorea Preprints 2022, doi:10.1002/ESSOAR.10511900.1.
11. Mishra, A.K.; Singh, V.P. A Review of Drought Concepts. J Hydrol (Amst) 2010, 391, 202–216, doi:10.1016/J.JHYDROL.2010.07.012.
12. Villazón Gómez, J.A.; Noris Noris, P.; García Reyes, R.A.; Villazón Gómez, J.A.; Noris Noris, P.; García Reyes, R.A. Uso Del Índice de Precipitación Estandarizado Para La Evaluación de La Intensidad de La Sequía En La Provincia de Holguín. Idesia (Arica) 2021, 39, 103–109, doi:10.4067/S0718-34292021000400103.
13. Olivares, B.O.; López-Beltrán, M.A.; Olivares, B.O.; López-Beltrán, M.A. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Aplicado al Territorio Indígena Agrícola de Kashaama, Venezuela. Cuadernos de Investigación UNED 2019, 11, 112–121, doi:10.22458/URJ.V11I2.2299.
14. Arreguín Cortés, F.I.; López Pérez, M.; Federman, D.K.; Ortega-Gaucin, D. The National Drought Policy in Mexico The Mexican Government through National Water Commission (CONAGUA, for Its Acronym in Spanish), Interested in

Changing the Paradigm for Preventive Actions to Cope with Droughts in Mexico in the Past, Decided to Launch in 2013 the National Pro-gram Against Drought (PRONACOSE, for Its Acronym in Spanish) and Created the Intersecretarial Commission on Droughts and Floods (CIASI, for Its Acronym in Spanish) To. 2016, 3, 157.

15. FAO Política Pública Nacional Para La Sequía Available online: <https://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC200989/> (accessed on 28 June 2023).
16. CONAGUA Programa Nacional Contra La Sequía (PRONACOSE) Available online: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-contra-la-sequia-pronacose-299759> (accessed on 28 June 2023).
17. Zepeda Gil, R.; Huerta Pineda, A.; Sánchez Correa, M.K.; Sánchez Ramírez, M.C. La Vulnerabilidad de México Ante El Cambio Climático: Una Revisión Del Sistema Nacional de Protección Civil; 2018; Vol. 1; ISBN 978-607-8620-05-0.
18. Barker, L.J.; ickards, N.J.; Sarkar, S.; Hnnaford, J. Good Practice Guidance for National Reporting on UNCCD Strategic Objective 3.; UNCCD.; Bonn, Germany, 2021; ISBN 978-92-95118-37-9.
19. Cid, A.; Cano, D.; Montalvo, V.; Ruíz-Bedolla, K.; Romero-Cazares, M.; Monterroso Rivas, A.I.; Caso, M.; García Meneses, P. Insights for Building Institutional Capacities for Climate Change Adaptation: Evidence from Mexico. In; 2020; pp. 1–21 ISBN 978-3-030-22759-3.
20. Barker, L.J.; ickards, N.J.; Sarkar, S.; Hnnaford, J. Good Practice Guidance for National Reporting on UNCCD Strategic Objective 3.; UNCCD.; Bonn, Germany, 2021; ISBN 978-92-95118-37-9.
21. RStudio RStudio (Versión 4.2.1) [Software de Computadora] 2022.
22. Siabato, W.; Guzmán-Manrique, J. La Autocorrelación Espacial y El Desarrollo de La Geografía Cuantitativa. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 2019, 28, 1–22, doi:10.15446/RCDG.V28N1.76919.
23. Anselin, L. GeoDa 2011.
24. CONAFOR-UACH Informe Nacional 2018 de Acciones Contra La Desertificación, Degradación de Tierras y Sequía En México; Texcoco, México, 2018;

25. SEMARNAT Fenómenos Meteorológicos Extremos: El Caso de La Sequía Available online: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/06_agua/recuadro1.html (accessed on 29 June 2023).
26. Banco de México Sequía En México y Su Potencial Impacto En La Actividad Económica; CDMX, 2022;
27. Esparza, M. Drought and Water Shortages in Mexico: Current Status and Future Prospects. *Secuencia* 2014, 89, 193–219.
28. Inegi estadísticas a propósito del día mundial de la lucha contra la desertificación y la sequía; Aguascalientes, 2012;
29. Dominguez, J. Historical Review of Drought in Mexico: From the Divine Explanation to the Incorporation of Science. *Tecnol.cienc. agua* 2016, 7, 77–93.
30. SEMARNAT; CONAGUA Estadísticas Del Agua En México 2019; CDMX, 2019;
31. Carrão, H.; Naumann, G.; Barbosa, P. Mapping Global Patterns of Drought Risk: An Empirical Framework Based on Sub-National Estimates of Hazard, Exposure and Vulnerability. *Global Environmental Change* 2016, 39, 108–124, doi:10.1016/J.GLOENVCHA.2016.04.012.
32. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) Informe de Desarrollo Humano Municipal 2010–2015. *Trans-formando México Desde Lo Local*; 2019; Vol. 1;.
33. CONEVAL, (National Council for Evaluation of Social Development Policy) Resultados de Pobreza En México 2020 a Nivel Nacional y Por Entidades Federativas Available online: <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/PobrezalInicio.aspx> (accessed on 11 May 2023).
34. Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño Definición de Riesgo Available online: <https://ciifen.org/definicion-de-riesgo/> (accessed on 18 July 2023).
35. Cisneros González, D.; Zúñiga Vázquez, J.M.; Pompa García Marin Actividad Del Fuego En Áreas Forestales de México a Partir de Sensores Remotos y Su

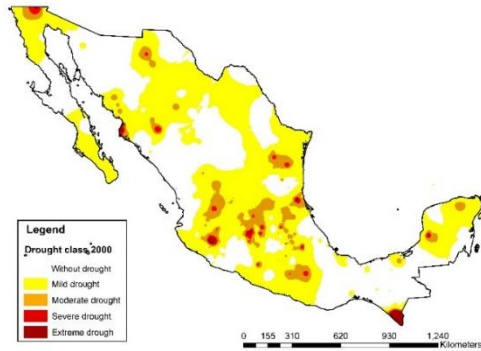
Sensibilidad a La Sequía. Madera y Bosques 2018, 24, doi:10.21829/MYB.2018.2431687.

36. Sistema Nacional de Información Forestal Manejo Del Fuego Available online: <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/> (accessed on 27 June 2023).
37. García Rodríguez, J.L.; CONAFOR La Sequía En Terrenos Forestales. In Proceedings of the Seminario de información estadística y geográfica para prevenir y mitigar los efectos de la sequia e inundaciones en la población y la economía; CONAFOR: CDMX, November 2012.
38. CONAFOR Principales Indicadores Forestales Ciclo 2015 – 2020 Available online: <https://snmf.cnf.gob.mx/principaleindicadoresforestalesciclo-2015-2020/> (accessed on 27 June 2023).
39. O'Brien, M.J.; Reynolds, G.; Ong, R.; Hector, A. Resistance of Tropical Seedlings to Drought Is Mediated by Neighbourhood Diversity. *Nat Ecol Evol* 2017, 1, 1643–1648, doi:10.1038/s41559-017-0326-0.
40. Chen, Q.; Timmermans, J.; Wen, W.; van Bodegom, P.M. Ecosystems Threatened by Intensified Drought with Divergent Vulnerability. *Remote Sens Environ* 2023, 289, doi:10.1016/J.RSE.2023.113512.
41. Federman, D.K.; Arreguín Cortés, F.I.; López Pérez, M. Constructing a Framework for National Drought Policy: The Way Forward in Mexico. *Weather Clim Extrem* 2014, doi:10.1016/j.wace.2014.04.003.

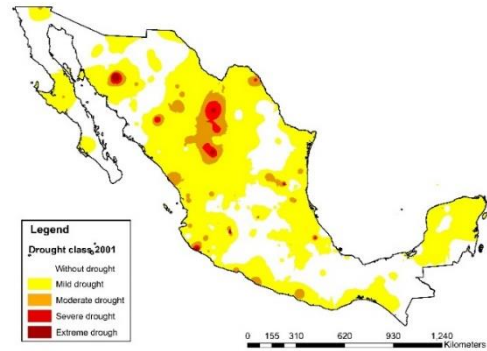
Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: www.mdpi.com/xxx/s1, Supplementary Material 1. Annual drought mapping from 2000 to 2020. Supplementary Material 2. Statistics of the variables. Supplementary Material 3. Value of variables and indices for all municipalities.

**SUPPLEMENTARY MATERIAL 1. ANNUAL DROUGHT MAPPING FROM
2000 TO 2020.**

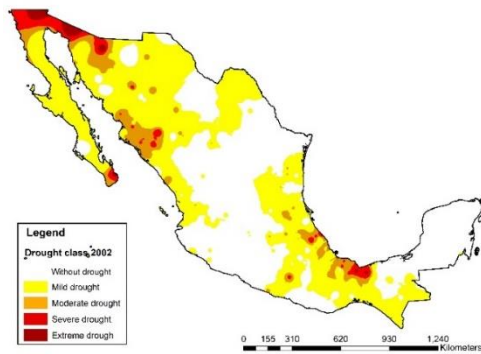
a)



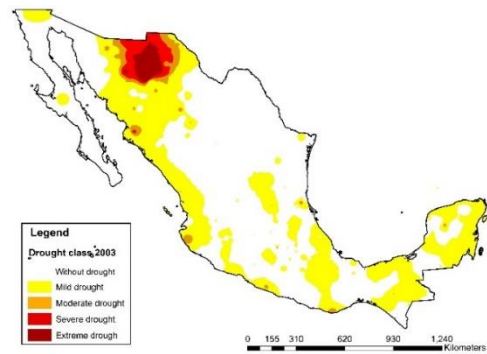
b)



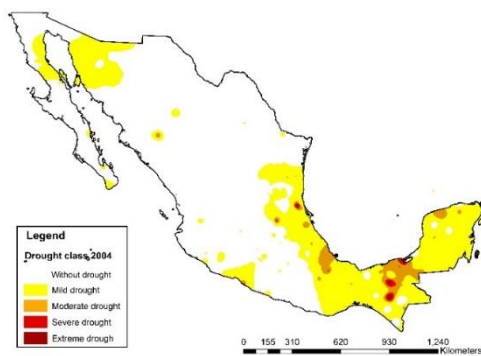
c)



d)



e)



f)

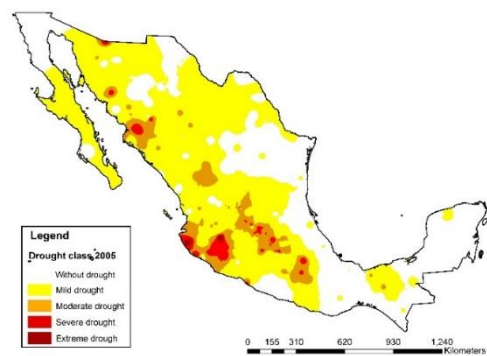
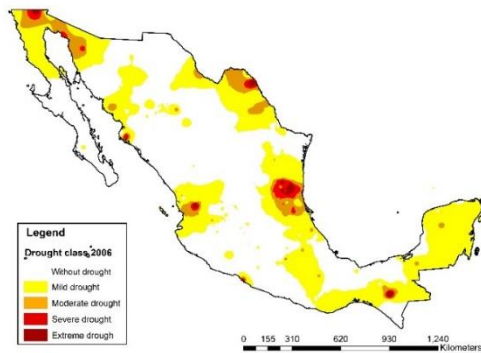
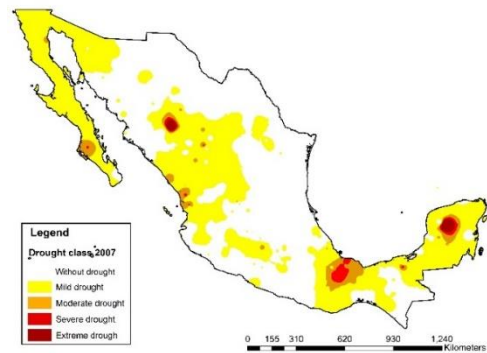


Figure SM1.1. Drought maps for years a) 2000, b) 2001, c) 2002, d) 2003, e) 2004 and f) 2005

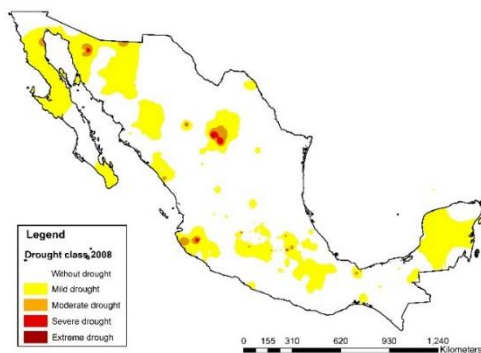
g)



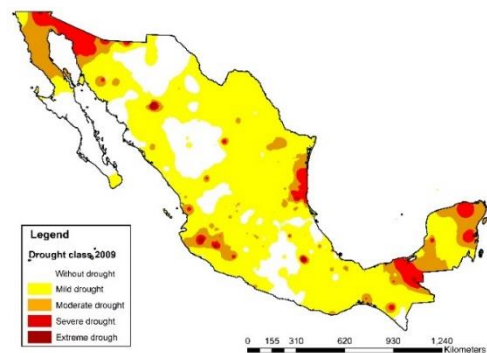
h)



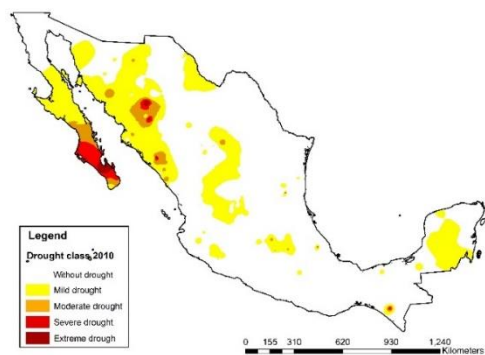
i)



j)



k)



l)

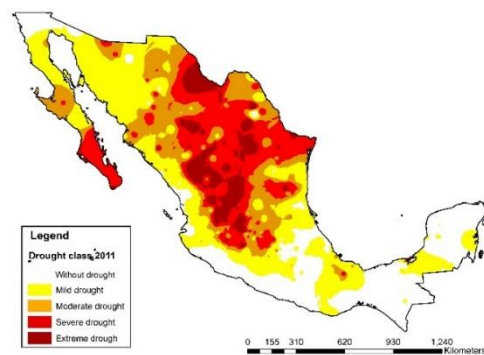
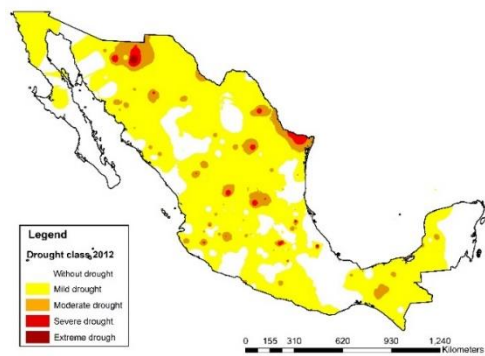
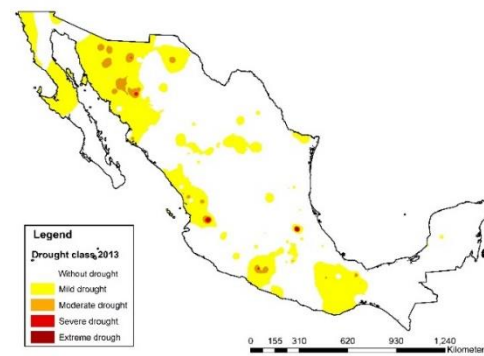


Figure SM1.2. Drought maps for years g) 2006, h) 2007, i) 2008, j) 2009, k) 2010 and l) 2011

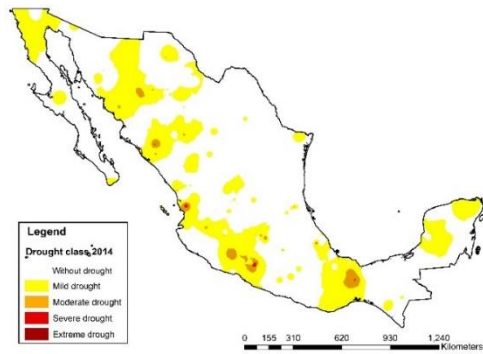
m)



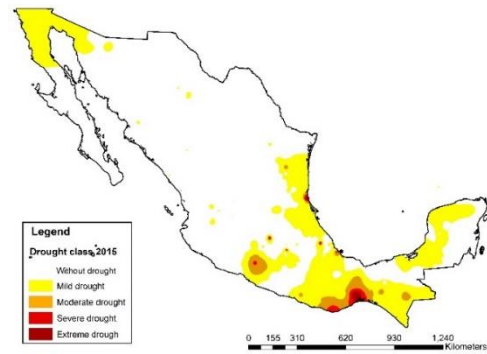
n)



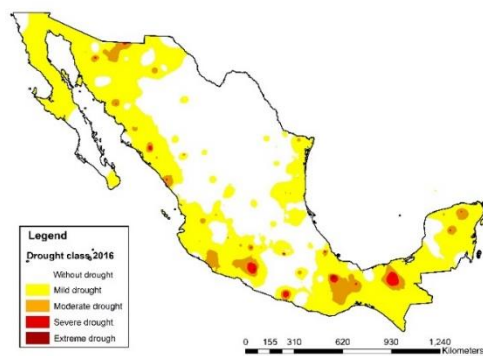
o)



p)



q)



r)

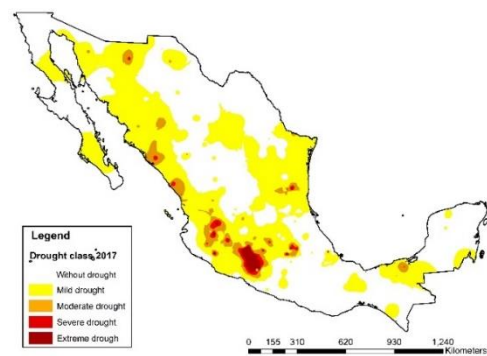
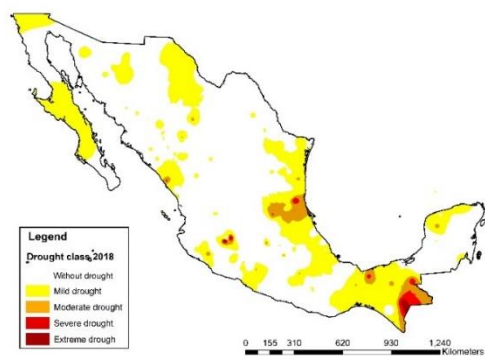
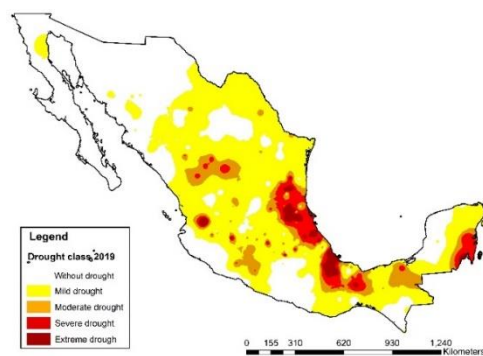


Figure SM1.3. Drought maps for years m) 2012, n) 2013, o) 2014, p) 2015, q) 2016 and r) 2017

s)



t)



u)

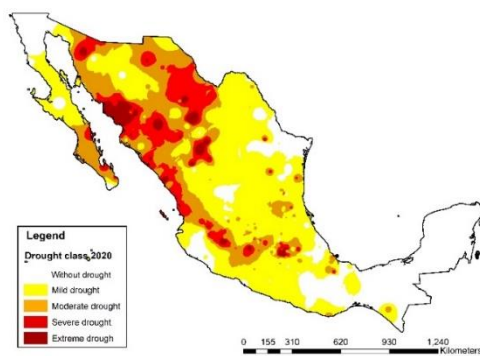


Figure SM1.4. Drought maps for years s) 2018, t) 2019 and u) 2020

Supplementary Material 2. Statistics of the variables

Variable	Min	Max	Mean	Standard deviation	Source
Literacy rate (percentage of people over 15 years old)	65%	100%	92.91%	5%	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/ , junio 2022)
Rural population (percentage in municipalities)	0%	100%	58%	36%	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/ , junio 2022)
Life expectancy at birth (in years per municipality)	73.32	76.6	74.8	0.6	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/ , junio 2022)
Population aged 15 to 64 (percentage of the municipality)	6%	74%	61%	4%	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/ , junio 2022)
Government effectiveness (dimensionless)	0.07	0.81	0.35	0.12	Cid et al., (2020).
Population below the international poverty line (percentage of the municipality)	5%	100%	62%	22%	CONEVAL (https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobreza-municipio-2010-2020.aspx , julio 2022)
Gross Domestic Product per capita	0.09	1.4	0.45	0.34	INEGI 1980-2021 (https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/default.aspx?pr=17&vr=7&in=2&tp=20&wr=1&cno=2 , julio 2022)
Contribution of agriculture to GDP	1%	14%	6%	3%	INEGI 1980-2021 (https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/default.aspx?pr=17&vr=7&in=2&tp

					=20&wr=1&cno=2, julio 2022)
Energy consumption (kilograms of oil equivalent per capita)	1559.119	1559.119	1559.119	0	Banco Mundial (https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE, julio, 2022).
Population that has drinking water services (percentage of the municipality)	0%	100%	73%	21%	Censos de población y vivienda de INEGI para los años 2000, 2005, 2010 y 2020 (https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/julio, 2022)
Total renewable water resources per capita (m3/inhab/year)	142	18375	4936.92	4375.3	CONAGUA en las "Estadísticas del agua" (https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/publicaciones-estadisticas-y-geograficas-60692, julio, 2022)
Cultivated area equipped with irrigation (percentage of the municipality)	0%	96.98%	8.25%	15.82%	INEGI (http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/, julio, 2022)
Infiltration (hm3/year)	1641	25316	6874.8	6463.13	CONAGUA (https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/publicaciones-estadisticas-y-geograficas-60692, julio, 2022)

CAPITULO 4. CONCLUSIONES GENERALES

Los objetivos planteados al inicio de la investigación fueron alcanzados. Fue posible identificar que los bosques en México han sido afectados a lo largo de los últimos 21 años. La variabilidad climática y presencia de sequías ha estado presente en diversas regiones y a diferentes intensidades.

La totalidad de nuestro país ha estado bajo sequía en algún momento del periodo de tiempo estudiado. Los municipios y las zonas forestales también se vieron afectados de diversas formas. Por ello, se considera que el método SPI-12 es adecuado para estimar y cartografiar la sequía, así como observar el impacto generado en escala anual.

La sequía ha sido uno de los factores importantes observados en la presente investigación, pero la vulnerabilidad analizada mediante el método de UNCCD, ayudó a observar la capacidad de respuesta que pudiera tener los municipios y en su caso, los potenciales daños que se pueden presentar a las cubiertas forestales. Por lo que se puede concluir que es un método adecuado para medir la vulnerabilidad.

El método de Moran Local Bivariado ayudó a analizar los patrones en el país para identificar las áreas con mayor efecto del IVS. Con lo anterior, es posible priorizar los municipios y las cubiertas que requieren acciones para mejorar su condición y así mejorar las condiciones, ante posibles eventos futuros. Por lo cual, es una herramienta estadística adecuada para observar el comportamiento de dos variables a lo largo del espacio geográfico.

Sobre las hipótesis se rechaza la planteada como *“Habrá mayor frecuencia de sequía conforme nos acercamos a la actualidad”*, ya que se observó que la frecuencia no aumenta, sino se mantiene constante. Se rechaza la que señala que *“La clase de vegetación con mayor vulnerabilidad serán las de zonas semidesérticas”*, ya que la clase de vegetación más vulnerable fue el bosque templado. Por último, se acepta *“Los estados de Oaxaca y Chiapas serán los más vulnerables, ya que tienen mayor rezago económico a nivel nacional”*, con adhesión de algunos municipios del estado de Durango, pero en general, los resultados han confirmado este punto.

Para futuras investigaciones se recomienda el uso de índices de sequía multivariados, ya que estos se adaptan a condiciones del medio estudiado, además de características del objeto de estudio, que en este caso sería las zonas forestales. La generación de un método característico, para medir la vulnerabilidad que se adapte a las condiciones del país, ya que el método usado se encontró con barreras de disponibilidad de datos, ya que se encontraron indicadores, los cuales no se tiene registro alguno a nivel nacional, pero si están disponibles en países con economías más sólidas o que cuentan con mucha disponibilidad de información.

De igual forma, desarrollar investigación centrada en la identificación de patrones, ya que así se pueden observar características del país, más focalizadas y esto puede ayudar en atender de manera más precisa o explotar potenciales en diversas regiones.