

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio  
Facultad de Informática Culiacán  
Posgrado en Ciencias de la Información



**“Monitoreo de zonas áridas mediante técnicas de análisis geoespacial a través de la implementación de una plataforma geotecnológica para la región Noroeste de México”**

**Presenta**

Lidia Yadira Pérez Aguilar

**Para obtener el grado de:  
Doctor en Ciencias de la Información**

Directores:

Dr. Wenseslao Plata Rocha

Dr. Sergio Alberto Monjardin Armenta

Culiacán, Sinaloa, junio del 2022

# **“Monitoreo de zonas áridas mediante técnicas de análisis geoespacial a través de la implementación de una plataforma geotecnológica para la región Noroeste de México”**

LIDIA YADIRA PÉREZ AGUILAR

Directores:

Dr. Wenseslao Plata Rocha, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio.

Dr. Sergio Alberto Monjardin Armenta, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio.



Tesis de Doctorado

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio

Facultad de Informática Culiacán

Posgrado en Ciencias de la Información

Universidad Autónoma de Sinaloa

Bld. Universitarios y Av. de las Américas S/N Ciudad Universitaria

Teléfono +52 (667) 716 13 61

Culiacán, Sinaloa, México 2022



Dirección General de Bibliotecas



U n i v e r s i d a d   A u t ó n o m a   d e   S i n a l o a

## REPOSITORIO INSTITUCIONAL

UAS- Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

## CARTA CESION DE DERECHOS



En la Ciudad de Culiacán, Sinaloa el día 16 del mes Junio del año 2022, el (la) que suscribe Lidia Yadira Pérez Aguilar alumno (a) del Programa de Doctorado en Ciencias de la Información con número de cuenta 14676516 de la Unidad Académica Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Wenseslao Plata Rocha y de Dr. Sergio Alberto Monjardin Armenta y cede los derechos del trabajo titulado “**Monitoreo de zonas áridas mediante técnicas de análisis geoespacial a través de la implementación de una plataforma geotecnológica para la región Noroeste de México**”, a la Universidad Autónoma de Sinaloa para su difusión, con fines académicos y de investigación por medios impresos y digitales.

La Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México) protege el contenido de la presente tesis. Los usuarios de la información contenida en ella deberán citar obligatoriamente la tesis como fuente, dónde la obtuvo y mencionar al autor intelectual. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Lidia Yadira Pérez Aguilar".

Lidia Yadira Pérez Aguilar

---

Nombre completo y firma



## DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y ANTIPLAGIO

A través de la presente Yo: **LIDIA YADIRA PEREZ AGUILAR**, con número de cuenta: **14676516** y alumno del Programa de **Doctorado en Ciencias de la Información**, con sede en la Facultad de Informática Culiacán y Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

### DECLARO QUE:

El trabajo de tesis que presento para su defensa y el cual se titula: **“Monitoreo de zonas áridas mediante técnicas de análisis geoespacial a través de la implementación de una plataforma geotecnológica para la región Noroeste de México”**

- 1.- Es el resultado de un trabajo personal y constituye un documento original e inédito.
- 2.- Los documentos, artículos, informes, etc. Utilizados para la realización del trabajo están referenciados de forma clara, tanto en el texto principal como en el apartado de bibliografía de la presente tesis.
- 3.- Que las citas de las obras que aparecen reflejadas de forma literal y entre comillas, presentan clara especificación de la fuente (autor, año) d la que ha sido extraídas.
- 4.- Tengo conocimiento que no puedo asumir como propio el trabajo de tesis de otra persona, la copia de frases, párrafos e ideas de otro trabajo sin citar autoría, o cualquier otra acción de similares características conlleva a la realización fraudulenta del manuscrito de tesis y podrá implicar la suspensión del examen de grado en tanto no se corrija o bien la suspensión definitiva, esto acorde con el nivel en que se pudiese incurrir.
- 5.- Soy consciente de que pretender ser el autor de un trabajo, en parte o en su totalidad, escrito por otra persona constituye un delito con base en los artículos 424 y 427 del código penal federal, título vigesimosexto de los delitos en materia de derechos de autor en la República Mexicana.

Culiacán, Sinaloa a 16 de junio de 2022

  
Lidia Yadira Pérez Aguilar

Nombre y Firma del alumno

## Agradecimientos

Esta Tesis, es producto del esfuerzo de diversas personas e instituciones que de manera directa e indirecta han participado:

Un agradecimiento especial a mis directores de tesis, el Doctor Wenseslao Plata Rocha y al Doctor Sergio Alberto Monjardin Armenta, por su apoyo, opiniones, críticas, sugerencias, correcciones, entre otros aspectos más que se involucraron en este trabajo.

Al posgrado de Ciencias de la Información de la Universidad Autónoma de Sinaloa, por brindarme la oportunidad de superarme, así como a los maestros de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio y de la Facultad de Informática, que me impartieron clases y me asesoraron en las diversas temáticas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haberme otorgado una beca para realizar mis estudios de Doctorado.

A mi esposo Fernando, a mi mamá Maya por su apoyo incondicional y darme ánimos para lograr este gran reto en mi vida, a mis hijas Iris y Alisson por ser mi motivación en este camino. A mis hermanas y hermanos, quienes me brindaron su apoyo siempre.

A mis amigos y compañeros por su contribución en forma de conocimiento y amistad.

# Índice general

Capítulo I. Introducción .....	15
1.1 Introducción .....	15
1.2 Justificación .....	20
1.3 Hipótesis .....	21
1.4 Objetivos .....	21
1.4.1 General.....	21
1.4.2 Específicos .....	21
Capítulo II. Antecedentes .....	22
2.1 Importancia del monitoreo de la aridez.....	22
2.2 La aridez a nivel mundial y nacional.....	30
2.2.1 Nivel mundial .....	30
2.2.2 Nivel nacional .....	31
2.3 Factores que causan la aridez .....	33
2.4 Programas de atención de carácter Internacional y Nacional para las zonas áridas.....	34
2.4.1 Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (CNULD).....	37
2.5 Objetivos de desarrollo sostenible 2030 (ODS 2030) .....	38
2.6 Monitoreo de zonas áridas mediante evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica.....	40
2.7 Modelo de simulación geoespacial de zonas áridas .....	42
2.8 Sistema de Ayuda a la Toma de Decisiones Espacial Web (SADEW) .....	44
Capítulo III. Descripción y contexto geográfico de la región noroeste de México .....	47
3.1 Ubicación del área de estudio .....	47
3.2 Caracterización de la Región .....	48
3.2.1 Localización y demarcación administrativa .....	49
3.2.2 Aspectos ambientales.....	54
3.2.3 Precipitación media anual.....	55
3.2.4 Fenómeno de la sequía .....	58
3.2.5 Cambio climático .....	59
3.2.6 Aspectos sociales .....	60

3.2.7 Aspectos económicos.....	61
Capítulo IV. Metodología general para el monitoreo espacial, de tendencia y web de zonas áridas.....	63
4.1 Datos .....	63
4.1.1 Datos utilizados para el monitoreo de zonas áridas mediante EMC y SIG y para el Sistema de Ayuda a la Toma de Decisiones Espacial Web (SADEW) .	63
4.1.2 Datos utilizados para el modelo de simulación geoespacial de zonas áridas	66
4.1.3 Descripción y Especificaciones técnicas de herramientas computacionales utilizadas.....	68
4.2 Metodologías .....	71
4.2.1 Metodología para el Sistema Geoespacial de zonas áridas.....	74
4.2.2 Metodología para el modelo de simulación geoespacial de zonas áridas	86
4.2.3 Metodología para SADEW.....	91
Capítulo V. Resultados .....	100
5.1 Resultados del Sistema de Geoespacial de zonas áridas .....	100
5.1.1 Factores normalizados .....	102
5.1.2 Ponderación de pesos .....	103
5.1.3 Sumatoria lineal ponderada .....	104
5.1.4 Mapa de regiones áridas .....	105
5.1.5 Indicadores cuantitativos y geoespaciales de aridez 2020.....	107
5.2 Resultados del modelo de simulación Geoespacial de zonas áridas.....	113
5.2.1 Tasas Anuales para las variables utilizadas .....	113
5.2.2 Variables obtenidas para los años 2030 y 2050.....	115
5.2.3 Factores normalizados .....	117
5.2.4 Indicadores cuantitativos y geoespaciales de tendencia a aridez años 2030 y 2050.....	119
5.3 Resultados del Sistema de Apoyo a la Toma de Decisión Espacial Web (SADEW).....	128
5.3.1 Funcionalidades de SADEW.....	129
Capítulo VI. Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	139
Referencias.....	144
Anexos.....	158

# Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Nuevo Atlas Mundial de Desertificación. ....	23
<b>Figura 2.</b> Distribución de las tierras secas de México. ....	32
<b>Figura 3.</b> Objetivos de desarrollo Sostenible. ....	39
<b>Figura 4.</b> Área de estudio Noroeste de México (RHA Pacifico Norte, RHA Baja California y RHA Noroeste). ....	48
<b>Figura 5.</b> Límites municipales. ....	53
<b>Figura 6.</b> Mapa de Climas. ....	54
<b>Figura 7.</b> Precipitación media anual. ....	56
<b>Figura 8.</b> Temperatura media anual ....	57
<b>Figura 9.</b> Niveles de Sequía en el Noroeste de México ....	59
<b>Figura 10.</b> Esquema metodológico general. ....	72
<b>Figura 11.</b> Máscara de restricción del área de estudio ....	74
<b>Figura 12.</b> Esquema metodológico del sistema estático (modelo geoespacial de zonas áridas).....	76
<b>Figura 13.</b> Esquema para obtener el mapa de temperatura.....	77
<b>Figura 14.</b> Esquema para obtener el mapa de precipitación, humedad, evapotranspiración y orientaciones. ....	79
<b>Figura 15.</b> Esquema metodológico del sistema estático (modelo geoespacial de zonas áridas).....	80
<b>Figura 16.</b> Función difusa de tipo lineal. ....	81
<b>Figura 17.</b> Escala de jerarquías de importancia para la construcción de la matriz de comparación entre pares de factores o variables (Saaty, 1977).....	84
<b>Figura 18.</b> Representación de la técnica sumatoria lineal ponderada.....	85
<b>Figura 19.</b> Esquema metodológico para el modelo geoespacial de tendencia a zonas áridas. ....	87
<b>Figura 20.</b> Esquema metodológico del sistema dinámico (Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones Espacial Web).....	93
<b>Figura 21.</b> Variables utilizadas para el modelo de zonas áridas año 2020. Simbología: a) Precipitación, b) Temperatura, c) NDVI, d) Evapotranspiración, e) Humedad, f) Pendientes, g) Orientaciones. ....	102
<b>Figura 22.</b> Factores obtenidos como resultado de la normalización año 2020. Leyenda: a) Precipitación, b) Temperatura, c) NDVI, d) Evapotranspiración, e) Humedad, f) Pendientes, g) Orientaciones. ....	103
<b>Figura 23.</b> Mapa de vulnerabilidad a aridez.....	105
<b>Figura 24.</b> Mapa de vulnerabilidad a aridez año 2020. ....	106
<b>Figura 25.</b> Mapa de regiones áridas por RHA año 2020.....	108
<b>Figura 26.</b> Mapa de regiones áridas a nivel estatal año 2020.....	109
<b>Figura 27.</b> Mapas de aridez a nivel Municipal. Representación porcentual de municipios más áridos año 2020. ....	111

<b>Figura 28.</b> Mapas de aridez a nivel Municipal. Representación porcentual de municipios más semiáridos año 2020. ....	112
<b>Figura 29.</b> Líneas de tendencia de las variables años 2030-2050. ....	115
<b>Figura 30.</b> Variables obtenidas del modelo de tendencia a aridez. Año 2030. Leyenda: (a) Precipitación, (b) Temperatura, (c) NDVI, (d) Evapotranspiración, (e) Humedad, (f) Pendientes, (g) Orientaciones .....	116
<b>Figura 31.</b> Variables obtenidas del modelo de tendencia a aridez. Año 2050. Leyenda: (a) Precipitación, (b) Temperatura, (c) NDVI, (d) Evapotranspiración, (e) Humedad, (f) Pendientes, (g) Orientaciones .....	117
<b>Figura 32.</b> Factores obtenidos como resultado de la estandarización. Año 2030. Leyenda: (a) Precipitación, (b) Temperatura, (c) NDVI, (d) Evapotranspiración, (e) Humedad, (f) Pendientes, (g) Orientaciones .....	118
<b>Figura 33.</b> Factores obtenidos como resultado de la estandarización. Año 2050. Leyenda: (a) Precipitación, (b) Temperatura, (c) NDVI, (d) Evapotranspiración, (e) Humedad, (f) Pendientes, (g) Orientaciones .....	119
<b>Figura 34.</b> Mapas de tendencia a aridez. a) Año 2030. b) Año 2050. ....	120
<b>Figura 35.</b> Mapas de tendencia a aridez por RHA. a) Año 2030. b) Año 2050.....	122
<b>Figura 36.</b> Mapas de tendencia a aridez a nivel estatal. a) Año 2030. b) Año 2050	123
<b>Figura 37.</b> Mapas de tendencia a aridez a nivel Municipal. Representación de municipios más áridos. a) Año 2030. b) Año 2050. ....	125
<b>Figura 38.</b> Mapas de tendencia a aridez a nivel Municipal. Representación de municipios más semiáridos. a) Año 2030. b) Año 2050.....	126
<b>Figura 39.</b> Acceso principal de la plataforma web. ....	129
<b>Figura 40.</b> Vista general y acceso a la tabla de contenido del geoportal web. ....	130
<b>Figura 41.</b> Mapas base.....	130
<b>Figura 42.</b> Búsqueda por año .....	131
<b>Figura 43.</b> Mapas de vulnerabilidad a aridez. ....	132
<b>Figura 44.</b> Muestra de variables del año consultado .....	132
<b>Figura 45.</b> Panel para generar mapas de tendencia a aridez. ....	133
<b>Figura 46.</b> Indicadores cuantitativos y geospaciales de aridez de la región Noroeste de México en PDF.....	134
<b>Figura 47.</b> Indicadores cuantitativos y geospaciales de aridez a nivel RHA de la región Noroeste de México en PDF. ....	135
<b>Figura 48.</b> Indicadores cuantitativos y geospaciales de aridez a nivel estatal de la región Noroeste de México en PDF. ....	136
<b>Figura 49.</b> Indicadores cuantitativos y geospaciales de aridez a nivel Municipal de la región Noroeste de México en PDF. ....	137

# Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Revisión de investigaciones realizadas sobre zonas áridas, sequía y desertificación (parte 1).....	28
<b>Tabla 2.</b> Revisión de investigaciones realizadas sobre zonas áridas, sequía y desertificación (parte 2).....	29
<b>Tabla 3.</b> Municipios de la RHA-I PBC .....	49
<b>Tabla 4.</b> Municipios de la RHA-II NOR.....	50
<b>Tabla 5.</b> Municipios de la RHA-III PN.....	52
<b>Tabla 6.</b> Datos geoespaciales requeridos. ....	63
<b>Tabla 7.</b> Matriz de pesos de factores. Fuente (Perez-Aguilar et al., 2021). URL: <a href="https://www.mdpi.com/2220-9964/10/11/720">https://www.mdpi.com/2220-9964/10/11/720</a> .....	66
<b>Tabla 8.</b> Datos utilizados como referencia para generar el escenario de tendencia de zonas áridas.....	67
<b>Tabla 9.</b> Datos utilizados para generar indicadores cuantitativos y geoespaciales de aridez. ....	68
<b>Tabla 10.</b> Software, Lenguajes de programación, librerías y servidores utilizados para el monitoreo de zonas áridas. ....	69
<b>Tabla 11.</b> Tabla de factores normalizados. ....	82
<b>Tabla 12.</b> Nivel de importancia de los factores que intervienen en el proceso de aridez .....	84
<b>Tabla 13.</b> Clasificación del Índice de Aridez del PNUMA .....	86
<b>Tabla 14.</b> Datos históricos obtenidos para realizar el cálculo de la tasa de cambio años 1985-2020 y 2000-2020. ....	88
<b>Tabla 15.</b> Estandarización de los factores año 2030 y 2050. ....	89
<b>Tabla 16:</b> Matriz de los pesos generados para cada factor.....	104
<b>Tabla 17.</b> Superficie en km <sup>2</sup> y porcentajes de regiones áridas por RHA.....	106
<b>Tabla 18.</b> Superficie en km <sup>2</sup> y porcentajes de regiones áridas por RHA.....	108
<b>Tabla 19.</b> Superficie en km <sup>2</sup> y porcentajes de regiones áridas a nivel estatal.....	110
<b>Tabla 20.</b> Superficie en km <sup>2</sup> y porcentajes de regiones áridas a nivel de uso de suelo. ....	113
<b>Tabla 21.</b> Tazas de cambio desde el año 1985 hasta 2020 .....	114
<b>Tabla 22.</b> Superficies y porcentajes de cambio por periodo de tendencia respecto al año base 2020. ....	121
<b>Tabla 23.</b> Superficies y porcentajes de cambio por RHA para los años 2030 y 2050. ....	122
<b>Tabla 24.</b> Superficies y porcentajes de cambio por estado para los años 2030 y 2050. ....	124
<b>Tabla 25.</b> Superficie en km <sup>2</sup> y porcentajes de tendencia de regiones áridas a nivel de uso de suelo año 2030.....	127
<b>Tabla 26.</b> Superficie en km <sup>2</sup> y porcentajes de tendencia de regiones áridas a nivel de uso de suelo año 2050.....	128

# Lista de anexos

<b>Anexos 1.</b> Fragmento del algoritmo en Python para aplicar el factor escala y la conversión de °K a °C de la variable temperatura. ....	158
<b>Anexos 2.</b> Fragmento del algoritmo en Python para aplicar el factor escala a la variable NDVI. ....	158
<b>Anexos 3.</b> Fragmento del algoritmo en Python para realizar el mosaico del área de estudio. ....	159
<b>Anexos 4.</b> Fragmento del algoritmo en Python para realizar el corte al área de estudio. ....	159
<b>Anexos 5.</b> Fragmento del algoritmo en Python para realizar las correcciones por el método de vecino más cercano.....	160
<b>Anexos 6.</b> Fragmento del algoritmo en Python para realizar el promedio mensual de las variables temperatura y NDVI.....	160
<b>Anexos 7.</b> Fragmento del algoritmo en Python para realizar el promedio anual de las variables temperatura y NDVI. ....	161
<b>Anexos 8.</b> Fragmento del algoritmo en Python para realizar la reproyección de las variables. ....	161
<b>Anexos 9.</b> Fragmento del algoritmo en Python para aplicar las propiedades técnicas de la máscara de restricción del área de estudio. ....	162
<b>Anexos 10.</b> Fragmento del algoritmo en Python para la normalización de las variables. ....	162
<b>Anexos 11.</b> Fragmento del algoritmo en Python para el método de evaluación multicriterio.....	163
<b>Anexos 12.</b> Algoritmo en Python para clasificación del mapa de vulnerabilidad. ....	163
<b>Anexos 13.</b> Algoritmo en Python para incorporar los mapas a la base de datos. ...	164
<b>Anexos 14.</b> Algoritmo en Python para incorporar los mapas al servidor de mapas.	164
<b>Anexos 15.</b> Fragmento del algoritmo para visualización de datos en el geoportal web. ....	165
<b>Anexos 16.</b> Fragmento del algoritmo para la búsqueda de zonas áridas por año en el geoportal web. ....	165
<b>Anexos 17.</b> Fragmento del algoritmo para la búsqueda de mapas de tendencia de zonas áridas en el geoportal web.....	166
<b>Anexos 18.</b> Fragmento del algoritmo para generar indicadores a nivel estatal. ....	167
<b>Anexos 19.</b> Fragmento del algoritmo para generar indicadores a nivel RHA.....	167

## Resumen

En México, más de la mitad del territorio está cubierto por regiones áridas y semiáridas, uno de los ecosistemas más abundantes a nivel global, mismo que sigue en aumento y que alberga millones de personas que dependen directamente de los servicios de estas tierras para su sustento, no obstante, estas regiones se ven amenazadas por eventos ambientales, climáticos y antrópicos que, además de poner en riesgo el medio ambiente y el suelo, también afecta el abastecimiento humano.

Al respecto, el gobierno mexicano ha tomado una fuerte consideración sobre los temas de aridez, en las últimas décadas ha participado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (CNUCLD), a través de programas de atención de carácter Internacional y Nacional para las zonas áridas como lo es el documento "Desarrollo sostenible de tierras áridas y lucha contra la desertificación", y además, atendiendo los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) donde se aborda el problema respecto a las políticas, manejo y gestión de los recursos hídricos.

En este orden de ideas, el Noroeste de México, es considerada una de las zonas con mayor superficie de regiones áridas y semiáridas, y donde ocurren eventos climáticos extremos, por consecuencia, impactos significativos en la vegetación, agua y suelo. Es por ello, que en la presente tesis doctoral se definió como objetivo general realizar un monitoreo de zonas áridas que incluye técnicas de análisis geoespacial a través de la implementación de una plataforma geotecnológica en esta región.

Para abordarlo, se realizó una búsqueda, recopilación y análisis de información geoespacial necesaria que intervienen en el proceso de aridez, seguidamente, se diseñó una metodología integral geoespacial para obtener zonas áridas, posteriormente, desarrolló un modelo de tendencia a zonas áridas a mediano y largo plazo y, por último, se Implementó un sistema integral para el análisis, procesamiento, visualización y publicación del comportamiento espacio – temporal de zonas áridas en web.

## Abstract

In Mexico, more than half of the territory is covered by arid and semi-arid regions, one of the most abundant ecosystems globally, which continues to grow and is home to millions of people who depend directly on the services of these lands for their livelihood. However, these regions are threatened by environmental, climatic and anthropic events that, in addition to putting the environment and the soil at risk, also affect human supply.

In this regard, the Mexican government has taken strong consideration of aridity issues in recent decades, participating in the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), through international and national care programs for arid zones such as the document "Sustainable development of arid lands and fight against desertification", through the Sustainable Development Goals (SDG) where the problem is addressed regarding the policies, management and management of water resources.

In this order of ideas, the Northwest of Mexico is considered one of the areas with the largest surface of arid and semi-arid regions, and where extreme climatic events occur, consequently with significant impacts on vegetation, water and soil. That is why, in this doctoral thesis, the general objective was defined to monitor arid zones that include geospatial analysis techniques through the implementation of a geotechnological platform.

To address it, a search, compilation and analysis was carried out of the necessary geospatial information that are part of the aridity process was carried out, then a comprehensive geospatial methodology was designed to obtain arid zones in the medium and long term, subsequently, a model of tendency to arid zones was developed in the medium and long time. And, finally, a comprehensive system was implemented for the analysis, processing, visualization and publication of the space-time behavior of arid zones on the web.

# Capítulo I. Introducción

## 1.1 Introducción

Las tierras secas son ecosistemas que ocupan grandes extensiones de la superficie de a nivel global (Maestre, Salguero-Gómez, et al., 2012), incluidas las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas que cubren aproximadamente el 40% de la superficie terrestre (FAO, 2020; Gaur & Squires, 2018b; Reed et al., 2012) y cuentan con aproximadamente 2,500 millones de personas que dependen directamente de los servicios de los ecosistemas de estas tierras para su sustento, apoyando así al 50% de la ganadería a nivel mundial, donde se cultiva el 44% de los alimentos del mundo (Gaur & Squires, 2018b).

Sin embargo, a pesar de que los ecosistemas en tierras áridas desempeñan un papel importante al mantener el equilibrio de los componentes atmosféricos ya que reflejan y absorben la radiación solar (Gaur & Squires, 2018b), la mayor parte de las tierras se encuentran sobre suelos degradados (FAO, 2007), siendo un problema global (UNEP, 1997), especialmente la desertificación en este tipo de ecosistemas, causada por factores relacionados a eventos climáticos y acciones humanas (Granados-Sánchez et al., 2013), tales como el uso del fuego, el pastoreo, la recolección de madera y productos forestales no madereros así como también el cultivo de la tierra (ONU, 2019).

Por su parte, las zonas áridas son consideradas como aquellas áreas que reciben una precipitación pluvial media anual menor a 350 mm, y semiáridas a las que reciben entre 350 y 600 mm anuales (Arámbula, 2005; González Medrano, 2012; Gaur & Squires, 2018a), en ambas, la precipitación promedio anual es menor a la evaporación potencial máxima anual en el cual existe un déficit hídrico, es decir, existe una escasez de agua o humedad en el aire y el suelo (Diéguez et al., 2014; Velasco & Pimentel, 2010), tanto en cantidad como en intensidad y regularidad, además de gran radiación solar, provocando altas temperaturas y una evapotranspiración superior al volumen de

agua disponible, además, una baja humedad atmosférica, provocado en algunos casos por barreras montañosas que impiden el paso de corrientes de aire húmedo (Mercado Mancera et al., 2010).

De este modo, la aridez es un concepto sinónimo de sequedad (Mercado Mancera et al., 2010), definida como la característica de un clima que se presenta en regiones donde existe poca y variable precipitación (Campos-Aranda, 2016), es decir, existe ausencia de humedad en el aire y suelo (Mainguet, 1999) y los periodos prolongados de sequías son muy comunes (Gutiérrez-Ruacho et al., 2012), siendo la escasez de agua el rasgo predominante de estas tierras (Gaur & Squires, 2018a; ONU, 2019), donde a su vez intervienen diversos factores climáticos, como lo son las altas temperaturas, escasez de precipitación y alta radiación solar, una evapotranspiración superior al volumen de agua disponible y una baja humedad atmosférica (Diéguez et al., 2014; Mercado Mancera et al., 2010). Siendo esta condición un riesgo con la amenaza de desertificación debido a la escasa precipitación y las sequías frecuentes (Gebremedhin et al., 2018).

Uno de los más graves problemas que afecta amplias extensiones de la superficie terrestre es la degradación de la tierra, que puede definirse como la reducción temporal o permanente en la capacidad productiva de ésta, debido a la acción humana, que ocurre en cualquier parte de la superficie terrestre, pero sólo es definida como desertificación cuando ocurre en las tierras secas (Díaz-Padilla et al., 2011), estos ecosistemas también son muy vulnerables al cambio ambiental global y la desertificación. Sin embargo, la relación entre la biodiversidad y el funcionamiento del ecosistema rara vez se ha estudiado en las tierras secas (Maestre, Salguero-Gómez, et al., 2012).

En general, las zonas áridas y semiáridas cuentan con ecosistemas frágiles, altamente susceptibles a la influencia de los factores climáticos y de las actividades humanas, por lo tanto, presenta un impacto ambiental negativo ya que ocasiona la pérdida de recursos naturales y la capacidad productiva de los suelos (Arámbula, 2005). Como ya se mencionó, en estas regiones la mayor parte del tiempo escasea el agua, existe una alta variabilidad climática y una sequía frecuente, por lo tanto, los asentamientos

humanos pueden agruparse en torno a fuentes disponibles de agua, como ríos, manantiales, pozos y oasis. La sostenibilidad de los medios de vida en estas regiones se ve amenazada por una serie de cambios sociales, económicos y ambientales que presentan desafíos significativos para los investigadores, los responsables políticos y, sobre todo, los usuarios de tierras rurales (Gaur & Squires, 2018b).

En las zonas áridas existe una rápida recuperación de la vegetación después de la precipitación y en la cual, la capacidad de regeneración depende de la variabilidad de las precipitaciones. A pesar de esto, el hombre puede ser la causa de los cambios en las zonas secas a través del cambio climático global, como resultado de los cambios en la humedad del suelo. Por otra parte, la desertificación en este tipo de ecosistemas se hace irreversible cuando ha desaparecido todo el elemento suave y en su lugar queda sólo roca desnuda, ya que no hay probabilidad de almacenar agua para el establecimiento y supervivencia de las plantas (Granados-Sánchez et. al, 2013). Además, los cambios en la disponibilidad de recursos pueden alterar el funcionamiento de los ecosistemas, especialmente, con respecto a la dinámica de la población, el ciclo de la materia orgánica y los nutrientes (Schwinning et al., 2004).

Por otro lado, en Los ecosistemas áridos y semiáridos la disponibilidad del agua constituye el principal factor limitante de la productividad primaria y tiene efectos directos e indirectos sobre los procesos económicos de la región (Villagra et al., 2013) y por lo tanto, cualquier mejoramiento permanente en la eficiencia del uso del agua se traduce en un inmediato aumento proporcional de la productividad de la zona (Astaburuaga G., 2004). Las zonas áridas no son tierras estériles como algunos piensan. Ése es el mensaje de la Unión Mundial Para la Naturaleza (UICN), que hace un llamado a revalorizar las contribuciones de las zonas áridas a la economía nacional y mundial. Los estudios de caso recientes muestran que las economías pastoriles tienen que ser mejor integradas en la planificación de desarrollo nacional (UICN, 2007).

En las zonas áridas de México existen muchas especies representativas de este tipo de estos ecosistemas que son una fuente de riqueza e ingresos para la población, volviéndose también parte de su subsistencia. La cacería regulada es una actividad importante en estas zonas, sin embargo, esta práctica conlleva riesgos como la cacería

descontrolada y el tráfico ilegal de animales. La caza deportiva es una de las principales fuentes de ingresos en las zonas áridas, pero para ello es necesario reglamentar y proteger esta actividad para que sea sustentable y para ello la SEMARNAT especifica las épocas para cazar (SAGARPA & SIAP, 2014).

De tal manera que en los últimos años ha habido avances importantes desde el punto de vista científico en las tierras áridas donde se presentan informes basados en estudios sobre distintas zonas áridas de las zonas más degradadas y empobrecidas del mundo desarrollándose proyectos específicos para determinar en qué forma pueden ser usados los recursos disponibles para mejorar la seguridad alimentaria y los medios de vida en estos ecosistemas, lográndose además un gran progreso científico en estudios sobre el cambio climático que puede conducir a una degradación del ecosistema (FAO, 2007).

Así mismo, en México, se analizó información sobre degradación y desertificación de tierras utilizando aspectos sociales que son afectadas por las zonas áridas tales como: total de población nacional, población rural y urbana, número de personas por debajo de la línea de pobreza y migración, así como el índice de desarrollo humano. Los resultados muestran las poblaciones de 17 de las 20 ciudades más pobladas del país están viviendo en zonas afectadas por procesos de degradación de tierras, sequía y desertificación. La población de las tierras secas vive predominantemente en zonas urbanas (48.4% del total de la población) y el 9.82% de la población vive en zonas rurales (CONAFOR, 2013).

De tal manera que de los 52.6 millones de personas en pobreza en el país, 27 millones viven en tierras secas y 25.6 millones en tierras subhúmedas húmedas y húmedas. Lo anterior se traduce en que del 58.2% de la población nacional que vive en las tierras secas del país más de la mitad está en situación de pobreza. La gente que vive en las tierras secas del país observa una intensidad migratoria. El nivel de degradación severo es el que presenta el mayor número de personas en los diferentes grupos de intensidad migratoria, en el nivel muy alto representa 1.8 millones de habitantes, en el nivel alto son 5.5 millones y en el nivel medio son 8.8 millones. En el índice de desarrollo humano (IDH), la mayoría de los habitantes de las tierras secas se ubican

en el nivel alto (35.3 millones), en medio alto 29.07 millones y medio bajo con cerca de un millón de personas.(CONAFOR, 2013)

Debido a que el agua es un elemento esencial para la vida en la tierra y su escasez provoca una diversificación biológica y cultural en la cual se ha observado una clara correlación entre la degradación del suelo y la degradación cultural en las tierras áridas (Davies et al., 2012), particularmente en México, las zonas áridas se caracterizan por una enorme diversidad cultural ya que existen muchos grupos indígenas que habitan en estas zonas, es por ello que se creó La Red Internacional para la Sostenibilidad de las Zonas Áridas (RISZA), red temática del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), conjuga la participación comunitaria, científica y gubernamental en acciones y programas de desarrollo sostenible el cual se concentra en conocer, conservar y proteger esa riqueza biocultural y la biodiversidad de las zonas áridas, además, de permitir abordar la problemática, conservar y estudiar esa riqueza de tierra y de vida pero también pensando en los objetivos de desarrollo sostenible para el futuro (UICN, 2007).

Por otro lado, la ecología cultural de las tierras áridas a menudo implica la movilidad la cual está estrechamente relacionada con la abundancia de los recursos de la biodiversidad y el agua y que puede implicar una migración estacional. La combinación de la aridez, la estacionalidad y la incertidumbre climática han contribuido a una diversidad de adaptaciones y evoluciones en las especies y los ecosistemas de las tierras áridas. Como resultado, las tierras áridas albergan una gran riqueza de biodiversidad cultural única, además de algunos de nuestros más preciados patrimonios culturales (Davies et al., 2012).

## 1.2 Justificación

Actualmente el Noroeste de México es la zona más afectada por las condiciones de sequía severa principalmente el estado de Sonora. Igualmente, en Sinaloa, la sequía moderada ha ido aumentando considerablemente, aunque gran parte del noroeste desde Sonora, pasando por Sinaloa hasta Nayarit y Durango también experimentan casos significativos de déficit de lluvia. Al superar los factores limitantes económicos, las tierras áridas pueden volverse moderadamente productivas. Sin embargo, bajo sistemas de producción intensiva requieren de manejo cuidadoso, puesto que sus suelos son altamente propensos a la salinización, alcalización, saturación con agua, y erosión por la acción del viento y el agua. Debido a lo anterior, se considera de suma importancia realizar un análisis comparativo de las tendencias de diferentes aspectos atmosféricos y ambientales mediante la aplicación de técnicas geoespaciales para obtener índices y adecuarlos como estimadores de vulnerabilidad a aridez, en escenarios tendenciales y sostenible de cambio climático, y de esta manera se puedan proponer medidas para un mejor aprovechamiento de los recursos hidrológicos de la región.

Adicionalmente, es de suma importancia comprender mejor las consecuencias ecológicas del proceso de aridez, ya que, en la mayoría de los ecosistemas áridos, la degradación de la tierra, la desertificación, y la sequía son comunes, es fundamental el establecer medidas efectivas de adaptación y mitigación. Por tal motivo se requiere urgentemente un monitoreo y/o un sistema de alerta temprana para garantizar el bienestar humano, ambiental, económico y social en esas regiones, así como también conocer los niveles de sequía y degradación del suelo y así tomar en cuenta factores determinantes para que estas zonas puedan tener una buena planeación de los recursos naturales, además, es necesario propiciar el desarrollo de proyectos específicos para determinar en qué forma pueden ser usados los recursos disponibles para mejorar los medios de vida en estos ecosistemas, lográndose además un gran progreso científico en estudios sobre el cambio climático.

### **1.3 Hipótesis**

La generación de un modelo de zonas áridas para el Noroeste de México a través de la implementación de una plataforma geotecnológica que incluirá la modelación y aplicación de técnicas geoespaciales permitirán analizar, describir y simular el impacto de este proceso en el cambio climático de local a lo global.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 General**

Monitorear zonas áridas a través de la implementación de una plataforma geotecnológica que incluya la modelación y aplicación de técnicas geoespaciales que permita determinar el impacto y la vulnerabilidad de la aridez en el Noroeste de México.

#### **1.4.2 Específicos**

- Buscar, recopilar, y analizar información geoespacial para el estudio y monitoreo de zonas áridas.
- Diseñar una metodología integral geoespacial para obtener zonas áridas.
- Validar y analizar resultados de zonas áridas y zonas propensas a aridez.
- Implementar un sistema integral para el análisis, procesamiento, visualización y publicación del comportamiento espacio – temporal de zonas áridas.

## Capítulo II. Antecedentes

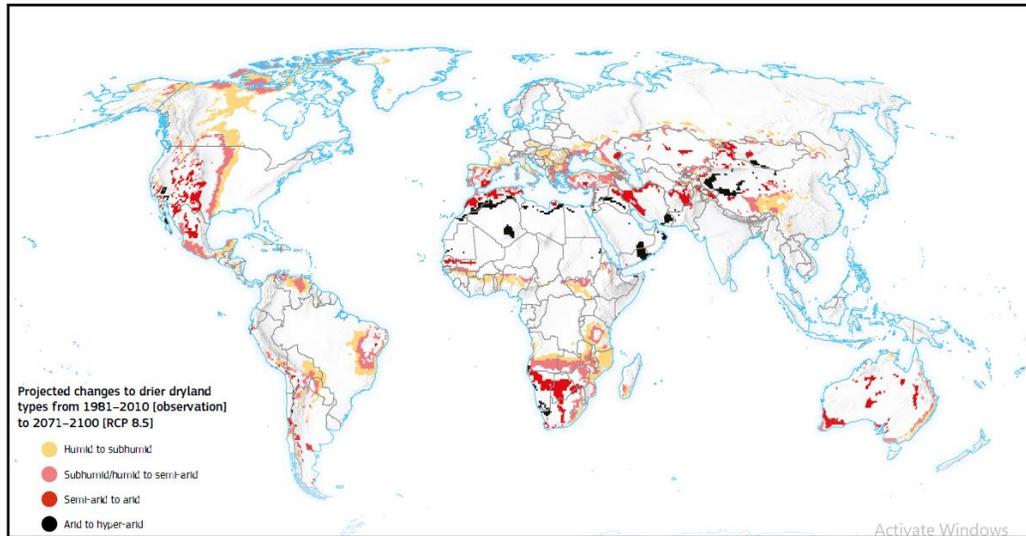
### 2.1 Importancia del monitoreo de la aridez

En la mayoría de los ecosistemas áridos, la degradación de la tierra, la desertificación, y la sequía son comunes. Por tal motivo se requiere urgentemente un monitoreo y/o un sistema de alerta temprana para garantizar el bienestar humano en esas regiones (Kimura & Moriyama, 1976). Es por ello, que se han realizado diversos estudios utilizando métodos que incluyen datos climáticos para identificar la distribución global de las regiones áridas, sin embargo, un estándar ampliamente utilizado es el índice de aridez (IA) (Kimura & Moriyama, 1976). Los índices de aridez son indicadores importantes de los cambios climáticos, que se usan para estimar el cambio en la escorrentía, y también son factores utilizados para explicar las características meteorológicas y/o climatológicas de un ecosistema que pueden ayudar a reconocer los peligros naturales climatológicos como las sequías (avrilov et al., 2019). Los índices de aridez clasifican el tipo de clima en relación con la disponibilidad de agua (Gebremedhin et al., 2018)

Si bien, la aridez se define como la característica de un clima referente a la insuficiencia de precipitación para mantener la vegetación. En los climas áridos las precipitaciones son altamente variables y los periodos prolongados de sequías son muy comunes (Gutiérrez-Ruacho et al., 2012). Uno de los trabajos más importantes referentes a este problema es el Atlas Mundial de Desertificación en su segunda edición (UNEP, 1997), en el cual se desarrolló un índice de aridez clasificatorio, además se describió que las tierras secas son aquellas zonas áridas y semiáridas cuyo cociente Precipitación/Evapotranspiración-potencial está comprendido entre 0.05 ml y 0.65 ml, en el cual se encontró que el 61 % del territorio mexicano presenta algún grado de aridez.

Por su parte, el trabajo más actualizado al respecto es el Nuevo Atlas Mundial de Desertificación (Cherlet et al., 2018) en el cual expresa entre otras cuestiones que más del 75% del área terrestre de la Tierra ya está degradada, y prevé que más del 90%

podría degradarse para 2050, además, como consecuencia de la deforestación acelerada, será más difícil mitigar los efectos del cambio climático (Figura 1).



**Figura 1.** Nuevo Atlas Mundial de Desertificación.  
**Fuente:** <https://wad.jrc.ec.europa.eu/download>

Por su parte, Díaz et al. (2011), evaluaron los registros históricos de 5,088 estaciones meteorológicas de la red de monitoreo climático del Servicio Meteorológico Nacional, analizando diferentes técnicas y programas de interpolación para generar mapas de precipitación pluvial y evaporación, en el cual emplearon la técnica de Thin Plate Smoothing Spline y basándose en la metodología de la UNEP (1997), obtuvieron un mapa con los índices de aridez provenientes de la división de la precipitación y la evapotranspiración, concluyendo que en relación con la precipitación media anual, se observó precipitaciones más abundantes en regiones del sureste del estado de Chiapas en contraste con el norte del país, donde se registran precipitaciones por debajo de los 250 mm, en las que sobresale el noroeste de Sonora y la mayor parte de la península de Baja California, encontrando que para México 61 % de su territorio presenta algún grado de aridez, así mismo, destaca que el estudio de las variaciones climáticas del pasado son de gran importancia para prever las condiciones del futuro,

por lo cual, se debe contar con mejores posibilidades de tomar decisiones adecuadas, las cuales permitan disminuir el riesgo implícito en los cambios climáticos.

Así mismo, el índice de aridez o sequedad de una zona climática es un indicador que se usa para estimar las condiciones de déficit hídrico de las tierras secas (D'Odorico et al., 2013), mediante este índice, es posible comparar la condición hídrica de diferentes localidades, con el potencial para detectar la presencia y longitud de los periodos húmedos y secos según Diéguez et al. (2014), en el cual sugieren planificar el desarrollo tecnológico y aplicar métodos de diagnóstico hidroambiental y de disponibilidad del agua para la prevención de la desertificación.

De este modo, en Salinas-Zavala et al. (1998) mediante el método de correlación de factores se estudian las condiciones de aridez en los estados que rodean el Golfo de California de la región del noroeste de México en el cual define un Índice de Cobertura Árida Anual, utilizado para describir las variaciones de la extensión y localización de las zonas de aridez extrema entre los años 1950 y 1990, y mediante un análisis de variabilidad espacial y temporal de las zonas áridas se encontró que en la zona que comprende el Desierto de Altar y la porción meridional de la Península de Baja California, las condiciones de aridez son más persistentes que en el resto de la región estudiada, sin embargo, no se considera la condición térmica interanual del Golfo de México considerando de suma importancia el aporte de humedad.

En este mismo contexto, Mercado et al. (2010) adaptaron y calibraron el modelo de aridez hidroclimática mediante una modificación al índice de aridez de Martonne, para adecuarlo al estudio del balance hídrico en zonas áridas y semiáridas en las cuencas de La Paz y Comondú ubicadas en el estado de Baja California Sur, mediante el método de los mínimos cuadrados se eligió un modelo numérico alternativo que estuviese altamente correlacionado con el déficit hídrico y que a la vez fuese sensible a valores bajos de precipitación, posteriormente para establecer la intensidad de asociación o efecto de la precipitación sobre la tendencia numérica del comportamiento del índice hidroambiental se realizó un análisis de regresión lineal simple considerando a la precipitación como variable independiente y al índice hidroambiental como variable dependiente. En dicho estudio se logró un índice

mensual para ambas zonas con alto potencial de aplicación en estudios hidrológicos de zonas áridas y semiáridas, tendientes a entender los procesos hidrológicos relacionados y a participar eficazmente en la lucha contra la sequía y la desertificación ambiental.

Sin embargo, en lo que respecta a sequía y dado que no existe una variable hidrológica única que permita definir el comienzo, la persistencia y término de ésta de forma precisa, CONAGUA (2018) implementó un marco de trabajo multivariado (Índice Estandarizado Multivariado de Sequía) que considera el uso de índices estandarizados para pares o tercias de variables hidrológicas, en el que además se estableció un índice de precipitación, índice de humedad, e índice de escurrimiento bajo ambientes hidrometeorológicos y climáticos, donde como resultado se producen mapas que identifican de manera objetiva la evolución espacio-temporal de la magnitud y severidad de la sequía a nivel nacional, considerando diferentes escalas temporales, no obstante, este observatorio no presenta escenario tendenciales que prevea en alguna medida la problemática de la sequía en el país.

Adicional a lo anterior, el monitor de la sequía en México de Lobato (2016), implementa índice estandarizado de precipitación, índice de sequía Palmer, índice de sequía hidrológica de Palmer, y el índice Z donde menciona que la cantidad de índices utilizados para cuantificar a la sequía son suficientes y de variado propósito satisfaciendo los requerimientos en cuanto a calidad, oportunidad y elaboración del mismo. Sin embargo, el monitor de la sequía en México no es un sistema de pronóstico ya que el principal objetivo es describir la evolución de las sequías en magnitud y extensión espacial, en conjunto con sus impactos, principalmente en los sectores agropecuario e hídrico. Permite además evaluar las condiciones actuales y un poco en el pasado (retrospectiva) considerando también mejorar la generación de productos propios, como son los de humedad de suelo, índice de Palmer y vegetación, entre otros.

Por su parte, Castillo et al. (2017), analizó la cuenca del río Fuerte que nace en la Sierra Madre Occidental, en los estados de Chihuahua, Durango y Sonora, y desemboca al norte del estado de Sinaloa, en el Golfo de California, para este estudio

de sequía se realizó una recopilación de datos mensuales de precipitación, y temperatura mínima y máxima en el periodo 1961-2012 para 14 estaciones meteorológica y debido a que las series de datos de precipitación y temperatura presentaron ausencia de registros durante el periodo de estudio, para la generación de datos perdidos se utilizó el Método del Inverso del Cuadrado de la Distancia o Método del US del National Weather Service. Este método considera que el dato faltante de una estación puede ser estimado con base en los datos observados en las estaciones que se encuentran alrededor, y puede aplicarse para estimar valores diarios, mensuales y anuales faltantes, ponderando los valores observados en una cantidad. Determinándose que mediante el uso del índice estandarizado de precipitación y el índice estandarizado de precipitación-Evapotranspiración les permitió realizar un análisis complementario de la variabilidad espacial y temporal de las sequías. Sin embargo, la gravedad de los efectos de la sequía y su intensificación en el futuro requiere de acciones y el esfuerzo conjunto de todos los sectores de la población, de los diferentes niveles de gobierno y de las instituciones de educación e investigación.

Uno de los índices más utilizados para monitoreo de sequía es el índice estandarizado multivariado de sequía utilizado por Real (2016), que además considera que la generación de mapas con otras técnicas de interpolación deberá ser considerada en trabajos futuros, teniendo como limitación importante para este método la disponibilidad y homogeneidad de información necesaria para ser incluida en el índice multivariado. No obstante uno de los análisis que mayor índices maneja es el presentado por Villarruel (2015), entre los cuales están el Índice de sostenibilidad de cuencas, índice de precipitación ambiental, índice de aridez de Lang, índice de aridez de Martonne, índice de disponibilidad hidroambiental, índice de sequía hidroambiental, índice de presión antrópica, índice de presión ambiental y mediante técnica de evaluación multicriterio, determina Indicadores para el Manejo Integral de Cuencas en Zonas áridas, estableciendo una metodología para el manejo de recursos naturales.

Dada la importancia de los índices de aridez para obtener indicadores respecto a diversas problemáticas, el índice de aridez de Martonne resulta ser idóneo para el

análisis de desertificación ya que Llanes (2012) realizó un estudio para la región del Valle de Guasave realizando la integración de los indicadores del suelo (ISD), del Ambiente (IAD) y Socioeconómicos (ISED) para la desertificación, determinando a través de estos indicadores además de otros índices como el de humedad y el índice de calor mensual y empleando la técnica de evaluación multicriterio que alrededor del 80% de los suelos presentan características de tipo arcillosa, además, la parte costera presenta mayor vulnerabilidad a desertificación.

Adicionalmente, para el análisis de zonas propensas a desertificación en López et al. (2016), considera otros aspectos como lo son ambiental, antropogénicos, humedad y vegetación mediante técnicas de evaluación multicriterio, considera necesario, continuar trabajando en la generación de una escala ordinal (extremado, alto, moderado, bajo y nulo) apropiada para discriminar entre los diferentes niveles de desertificación, lo cual permitirá aplicarse de manera genérica a cualquier región del mundo.

En las tablas 1 y 2 se muestra la información de los trabajos consultados en la bibliografía referentes a tema de aridez, sequía y desertificación.

**Tabla 1.** Revisión de investigaciones realizadas sobre zonas áridas, sequía y desertificación (parte 1).

Autor	Parámetro	Escala / Resolución y formato	Fuente	Periodo	Técnicas de agregación de variables	Producto
(Verbist et al., 2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Precipitación</li> <li>Temperatura</li> <li>Evapotranspiración</li> <li>Velocidad del viento</li> <li>Radiación</li> <li>Humedad del suelo</li> </ul>	1:5.000.000 Vectorial	Digital Chart of the World (DCW) 5946 estaciones ubicadas en la Región de América Latina y El Caribe	1970 - 2000	El Análisis exploratorio de datos (AED)	ATLAS de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe: <a href="http://www.climatedatalibrary.cl/CAZALAC/maproom/AridZones/AridRegimes/MapaLAC.html?Set-Language=es#tabs-1">http://www.climatedatalibrary.cl/CAZALAC/maproom/AridZones/AridRegimes/MapaLAC.html?Set-Language=es#tabs-1</a>
(Gutiérrez & Rodríguez, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Precipitación</li> <li>Temperatura</li> <li>Evapotranspiración</li> </ul>	1:60.000 Vectorial	Estación meteorológica San Pedro de Coche: <a href="https://www.weather-atlas.com/es/venezuela/isla-de-coche">https://www.weather-atlas.com/es/venezuela/isla-de-coche</a>	1980 - 1998	Regresión lineal simple	Mapa de aridez del Estado Nueva Esparta, Venezuela: <a href="https://www.redalyc.org/pdf/721/72142329007.pdf">https://www.redalyc.org/pdf/721/72142329007.pdf</a>
(Lobato-Sánchez, 2016))	<ul style="list-style-type: none"> <li>Altitud</li> <li>Precipitación</li> <li>Temperatura Escorrentía</li> <li>Humedad del suelo</li> <li>Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)</li> <li>Humedad del suelo</li> </ul>	30 m  1/16°	MDE ASTER-GDEM  SMN/CLICOM Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) <a href="https://lp daac.usgs. gov/datas et_discovery/modis/ modis_ pro -7ducts_ tab le/mod13c 2_ v006">https://lp daac.usgs. gov/datas et_discovery/modis/ modis_ pro -7ducts_ tab le/mod13c 2_ v006</a> NIDIS/Climate Prediction Center CPC-NOAA	1961 - actual	Evaluación Multicriterio	Monitor de la sequía en México <a href="https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico">https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico</a>
(NIDIS, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Precipitación</li> <li>Temperatura</li> <li>Humedad del suelo</li> <li>Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)</li> <li>Evapotranspiración</li> </ul>	No data	NOAA's National Climatic Data Center and Climate Prediction Center: <a href="https://www.cpc.ncep.noaa.gov/">https://www.cpc.ncep.noaa.gov/</a>  The US Department of Agriculture: <a href="https://www.usda.gov/oce/weather/">https://www.usda.gov/oce/weather/</a> The National Drought Mitigation Center Servicio Meteorológico Nacional (SMN) Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Agriculture and Agrifood Canada The Meteorological Service of Canada	2002 - actual	No data	North American Drought Monitor <a href="https://www.drought.gov/nadm/">https://www.drought.gov/nadm/</a>

**Tabla 2.** Revisión de investigaciones realizadas sobre zonas áridas, sequía y desertificación (parte 2).

Autor	Parámetro	Escala / Resolución y formato	Fuente	Periodo	Técnicas de agregación de variables	Producto
(CONAGUA & UNAM, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Precipitación</li> <li>Humedad del Suelo</li> <li>Escurrimiento</li> </ul>	0.5°	MERRA-2/ Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center de la NASA (GES DISC; <a href="https://disc.sci.gsfc.nasa.gov">https://disc.sci.gsfc.nasa.gov</a> ). Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) AEMET-OBS Spain011	1980 - actual	Evaluación Multicriterio	Nuevo Monitor de Sequía Multivariado en México (MoSeMM): <a href="http://mosemm.conagua.gob.mx/mapaCob.html">http://mosemm.conagua.gob.mx/mapaCob.html</a>
(AdapteCa, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Precipitación</li> <li>Temperatura</li> <li>Velocidad del viento</li> <li>Humedad</li> </ul>	1:1.000.000 Vectorial 10km raster	Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) AEMET-OBS Spain011	1971-2000	Técnicas estadísticas de regionalización a los datos	Visor de Escenarios de Cambio Climático: <a href="http://escenarios.adaptecca.es/#&amp;modelo=multimodel&amp;variable=tasmax&amp;scenario=rp85&amp;temporalFilter=YEAR&amp;layers=AREAS&amp;period=MEDIUM_FUTURE&amp;analysis=RAW_VALUE">http://escenarios.adaptecca.es/#&amp;modelo=multimodel&amp;variable=tasmax&amp;scenario=rp85&amp;temporalFilter=YEAR&amp;layers=AREAS&amp;period=MEDIUM_FUTURE&amp;analysis=RAW_VALUE</a>
(López Beltrán et al., 2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Precipitación</li> <li>Temperatura</li> <li>Índice de vegetación</li> </ul>	1:250,000	Imágenes satelitales del sensor MODIS,	2003, 2012	Sumatoria lineal ponderada	Mapas de desertificación, Sinaloa (2003-2012) <a href="https://www.researchgate.net/publication/315453961_Integracion_de_imagenes_del_sensor_MODIS_y_cartografia_tematica_para_simulacion_de_modelos_geoespaciales_para_obtener_zonas_propensas_a_desertificacion_en_el_estado_de_Sinaloa_Mexico">https://www.researchgate.net/publication/315453961_Integracion_de_imagenes_del_sensor_MODIS_y_cartografia_tematica_para_simulacion_de_modelos_geoespaciales_para_obtener_zonas_propensas_a_desertificacion_en_el_estado_de_Sinaloa_Mexico</a>

## **2.2 La aridez a nivel mundial y nacional**

### **2.2.1 Nivel mundial**

Desde 1950, diversas organizaciones de las Naciones Unidas se han preocupado por los problemas de las zonas áridas y semiáridas. En 1974, la Asamblea General de las Naciones Unidas recomendó adoptar medidas concretas para detener la desertificación y contribuir al desarrollo económico de las zonas afectadas a nivel internacional (Granados-Sánchez et al., 2013). Por lo tanto, en 1977, se convocó a una Conferencia de las Naciones Unidas sobre la desertificación y la mitigación de los efectos de la sequía, donde se adoptó el Plan de Acción de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación (NU, 1994). Posteriormente, en 1992 en la Asamblea General de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo, se aprobó el Capítulo 12 del programa 21: "Ordenación de los ecosistemas frágiles: lucha contra la desertificación y la sequía" (FAO, 2019a). Finalmente, la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, comprometió a los países a preparar y ejecutar acciones para combatir la desertificación y mitigar los efectos de la sequía y actualmente, se acepta que la desertificación es un problema que ocurre en las regiones áridas y semiáridas del mundo (Granados-Sánchez et al., 2013).

Es importante señalar que en el documento "Desarrollo sostenible de tierras áridas y lucha contra la desertificación", la FAO (1993), puntualiza su posición sobre el tema y plantea principios para el desarrollo en las zonas áridas, semiáridas o subhúmedas amenazadas por la desertificación, desde un enfoque internacional y nacional que consiste en: frenar o impedir la desertificación de tierras poco degradadas o en buen estado mediante medidas preventivas; recuperar la productividad de las tierras medianamente degradadas con medidas correctoras; restaurar la productividad de las tierras extremadamente degradadas con medidas de rehabilitación y saneamiento (FAO, 2019a).

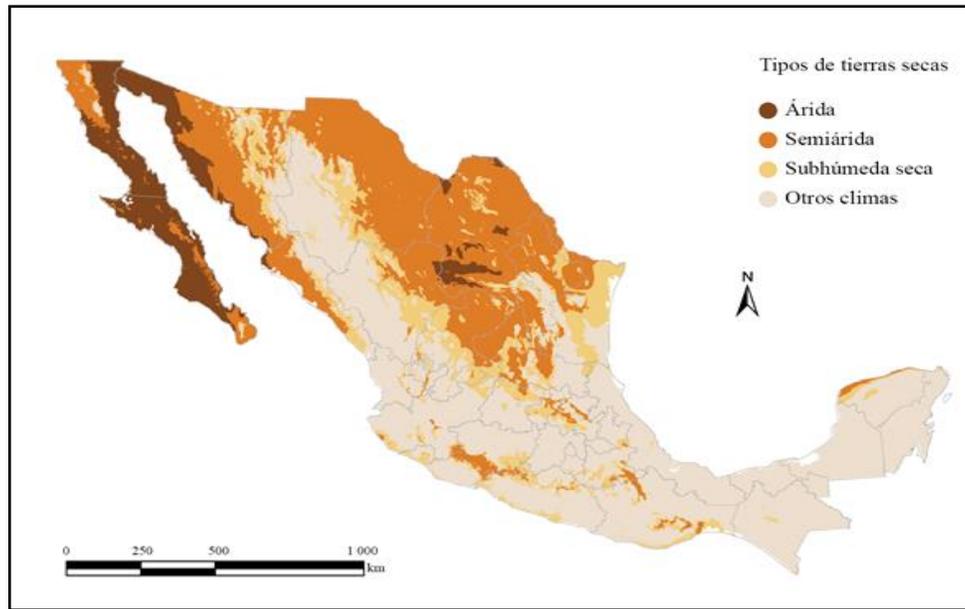
Es este mismo contexto, la FAO ha implementado proyectos encaminados a controlar la degradación de los suelos áridos ocasionados por las prácticas de riego incorrectas. Por ello, se creó El Marco Internacional de Programas de Cooperación para la Agricultura y el Desarrollo Rural Sostenibles (MIPC/ADRS), mismo que fue elaborado por la FAO (1992) y el cual implementó un programa de acción internacional sobre los recursos hídricos y el desarrollo agrícola sostenible, abarcando un aspecto importante de gestión de recursos hídricos en tierras áridas (FAO, 1992).

Por su parte, durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD), los órganos rectores de la FAO definieron los grandes ejes de actividad de un Marco Internacional de Programas de Cooperación para la Agricultura y el Desarrollo Rural Sostenibles (MIPC/ADRS), diseñado para atender a las necesidades prioritarias de las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas afectadas por la desertificación y la sequía, en la cual se atienden los siguientes puntos: utilización eficaz de los recursos para satisfacer mejor las necesidades básicas de la población y mejorar el nivel de vida; reducción de riesgos y de vulnerabilidad a las incertidumbres climáticas y otras catástrofes naturales, especialmente para conseguir la seguridad alimentaria; conservación de los recursos naturales y la protección del medio ambiente. Dicho plan fue aprobado por unanimidad por el Consejo de la FAO en noviembre de 1992: por consiguiente, la Organización está dispuesta a contribuir activamente a la labor de seguimiento de la CNUMAD en lo que respecta a la lucha contra la sequía y la desertificación mediante el desarrollo rural sostenible de las zonas áridas, semiáridas y secas subhúmeda (FAO, 2019b).

### **2.2.2 Nivel nacional**

En México, los ecosistemas áridos y semiáridos abarcan más de la mitad del territorio (CONAFOR, 2015; SAGARPA & SIAP, 2014; SEMARNAT, 2014) (Figura 2), dichas actividades antropogénicas que causan la desertificación en las regiones áridas de México son el sobrepastoreo, el cambio de uso del suelo, la deforestación, la labranza postcosecha y el mal manejo del suelo (Granados-Sánchez et al., 2013), esto ha

propiciado que el 59 % de la superficie de la república mexicana se haya desertificado por degradación del suelo (SEMARNAT, 2019).



**Figura 2.** Distribución de las tierras secas de México.

Fuente: [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_resumen14/03\\_suelos/3\\_3.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/03_suelos/3_3.html)

En la región Noroeste de México, se ubica el desierto de Sonora el cual se encuentra bajo influencias oceánicas y atmosféricas que determinan su clima árido, principalmente la alta presión del Pacífico Nororiental y la corriente fría de California (Salinas-Zavala et. al, 1998), por su parte, en el Estado de Baja California Sur prevalecen climas muy secos, semicálidos y cálidos, asociados con temperaturas extremas diurnas y con la sequedad ambiental y debido a que la precipitación en el estado es escasa, las predicciones y escenarios en condiciones de cambio climático apuntan hacia una acentuación de las sequías. (Diéguez et al., 2014).

### **2.3 Factores que causan la aridez**

La aridez es la escasez de humedad y la reducción temporal de la lluvia en una zona (Maliva & Missimer, 2012) por lo tanto, el incremento de la aridez representa una mayor frecuencia de años secos en un área (Gebremedhin et al., 2018). La mayoría de las zonas áridas se encuentran en los trópicos y, por tal motivo, reciben considerables contribuciones de radiación solar, que generan calor viento y/o evaporación en el medio ambiente (Maliva & Missimer, 2012). La distribución de las zonas áridas en todo el mundo se rige por los patrones de circulación atmosférica, la distribución de la tierra y el mar y la topografía local (Gebremedhin et al., 2018).

Existen algunos factores que causan la aridez, uno de ellos son los cinturones de alta presión que ocupan latitudes tropicales, otro factor que influye en la aridez se presenta por la presencia de anticiclones estables o como efecto de la continentalidad (UNESCO, 1977), aunque también, en algunos casos es consecuencia de barreras montañosas que impiden el paso de corrientes de aire húmedo (Salinas-Zavala et al., 1998). Otro factor causante de esta condición es la existencia de cordilleras que detienen vientos cargados de lluvia, que aumentan la evaporación en las laderas (UNESCO, 1977). Así mismo, la mayoría de los países de zonas áridas tienen un alto crecimiento demográfico, y las densidades de población rural son generalmente mucho más altas que las densidades de población generales (De Pauw et al., 2000). Las zonas áridas del mundo se caracterizan por un gran déficit de lluvia en relación con la evapotranspiración potencial. Según (Thompson, 1975) existen las siguientes causas principales de aridez a nivel regional:

Alta presión: el aire calentado en el ecuador sube, se mueve hacia los polos y luego desciende en las zonas subtropicales alrededor de 20 a 30 latitud norte y sur. La compresión y el calentamiento de la masa de aire descendente conduce a condiciones atmosféricas secas y estables (Thompson, 1975). El calentamiento global: tiene el potencial de aumentar el área de tierra árida (Kimura & Moriyama, 1976) por consecuencia, tiende a ser un peligro físico que afecta negativamente a campos como la agricultura y el abastecimiento de agua (Gebremedhin et al., 2018). Anticiclones

estables o como efecto de la continentalidad: sin embargo, en algunos casos es consecuencia de barreras montañosas que impiden el paso de corrientes de aire húmedo (Salinas-Zavala et al., 1998). Esto se debe al hecho de que puede ser un factor limitante para el crecimiento y la distribución de las plantas (Lilia Magaña et al., 2014). Por lo tanto, un estudio regional de aridez necesita índices de aridez apropiados que puedan definirse como indicadores numéricos del grado de sequedad del clima en un lugar determinado.

Otra de las causas de la aridez son la degradación química y la erosión eólica: la primera causado principalmente por desechos industriales y la segunda por la acción del viento, la principal acción nociva de estos son el arrastre de sedimentos que disminuyen la capacidad de almacenamiento en las presas y cuerpos de agua usados para la producción agrícola, y uno de los estados más afectados del Noroeste de México es el Estado de Baja California. Otras prácticas, como el riego excesivo, exceso de labranza, quema de residuos de cosecha afectan gran parte del territorio de Mexicano siendo Sonora uno de los estados más dañados del Noroeste de México (SAGARPA & SIAP, 2014).

#### **2.4 Programas de atención de carácter Internacional y Nacional para las zonas áridas.**

Desde 1950, diversas organizaciones de las Naciones Unidas se han preocupado por los problemas de las zonas áridas y semiáridas. En 1974, la Asamblea General de las Naciones Unidas recomendó adoptar medidas concretas para detener la desertificación y contribuir al desarrollo económico de las zonas afectadas a nivel internacional (Granados-Sánchez et al., 2013). Por lo tanto, en 1977, se convocó a una Conferencia de las Naciones Unidas sobre la desertificación y la mitigación de los efectos de la sequía, donde se adoptó el Plan de Acción de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación (NU, 1994). Posteriormente, en 1992 en la Asamblea General de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo, se aprobó el Capítulo 12 del programa 21: "Ordenación de los ecosistemas frágiles: lucha contra la

desertificación y la sequía" (FAO, 2019a). Finalmente, la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, comprometió a los países a preparar y ejecutar acciones para combatir la desertificación y mitigar los efectos de la sequía y actualmente, se acepta que la desertificación es un problema que ocurre en las regiones áridas y semiáridas del mundo (Granados-Sánchez et al., 2013).

Es importante señalar que en el documento "Desarrollo sostenible de tierras áridas y lucha contra la desertificación", la FAO (1993), puntualiza su posición sobre el tema y plantea principios para el desarrollo en las zonas áridas, semiáridas o subhúmedas amenazadas por la desertificación, desde un enfoque internacional y nacional que consiste en: frenar o impedir la desertificación de tierras poco degradadas o en buen estado mediante medidas preventivas; recuperar la productividad de las tierras medianamente degradadas con medidas correctoras; restaurar la productividad de las tierras extremadamente degradadas con medidas de rehabilitación y saneamiento (FAO, 2019a).

Es este mismo contexto, la FAO ha implementado proyectos encaminados a controlar la degradación de los suelos áridos ocasionados por las prácticas de riego incorrectas. Por ello, se creó El Marco Internacional de Programas de Cooperación para la Agricultura y el Desarrollo Rural Sostenibles (MIPC/ADRS), mismo que fue elaborado por la FAO (1992) y el cual implementó un programa de acción internacional sobre los recursos hídricos y el desarrollo agrícola sostenible, abarcando un aspecto importante de gestión de recursos hídricos en tierras áridas (FAO, 1992).

Por su parte, durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD), los órganos rectores de la FAO definieron los grandes ejes de actividad de un Marco Internacional de Programas de Cooperación para la Agricultura y el Desarrollo Rural Sostenibles (MIPC/ADRS), diseñado para atender a las necesidades prioritarias de las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas afectadas por la desertificación y la sequía, en la cual se atienden los siguientes puntos: utilización eficaz de los recursos para satisfacer mejor las necesidades básicas de la población y mejorar el nivel de vida; reducción de riesgos y de vulnerabilidad a

las incertidumbres climáticas y otras catástrofes naturales, especialmente para conseguir la seguridad alimentaria; conservación de los recursos naturales y la protección del medio ambiente. Dicho plan fue aprobado por unanimidad por el Consejo de la FAO en noviembre de 1992: por consiguiente, la Organización está dispuesta a contribuir activamente a la labor de seguimiento de la CNUMAD en lo que respecta a la lucha contra la sequía y la desertificación mediante el desarrollo rural sostenible de las zonas áridas, semiáridas y secas subhúmeda (FAO, 2019b).

El objetivo principal del PACD-México, es prevenir y detener el avance de la desertificación y, en lo posible, recuperar las superficies desertificadas para usos productivos. Mientras que el objetivo final es mantener y promover, dentro de los límites ecológicos, la productividad de las regiones áridas, semiáridas, subhúmedas y otras, vulnerables a la desertificación, con el propósito de mejorar la calidad de vida de los pobladores, además de incorporar los programas de lucha contra la desertificación a los programas estatales de desarrollo y en la planificación ecológica nacional, con las disposiciones financieras e institucionales pertinente (SEMARNAT, 2015)

Uno de los objetivos es aumentar la producción en el campo para generar bienestar social con un manejo sostenible del suelo, agua y vegetación, así como con obras para captación de agua, reforestación con especies nativas, conservación del suelo y proyectos productivos (CONAZA, 2019b). Además, este mismo organismo y la Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero (FND) firmaron un convenio de coordinación para fortalecer y potenciar los proyectos de pequeños productores en regiones áridas y semiáridas del país, con el propósito de incentivar para que mantengan un retorno constante del financiamiento, recursos que podrán volverse a aplicar en otros productores de las zonas áridas del país. Del mismo modo, el acuerdo busca acompañar la inversión que se realiza en las zonas áridas para llevarla a instancias de productividad (CONAZA, 2019a).

Por otra parte, en el año 2011 durante el Simposium “Los Retos de las Zonas áridas en México” se presentó El Proyecto Transversal de Desarrollo de la Zonas Áridas a cargo de La Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y

Alimentación (SAGARPA) cuyo objetivo es aprovechar el potencial productivo de estas regiones con una visión sustentable en el cual plantea una participación activa de las Universidades e institutos de enseñanza, con el fin de brindar capacitación y asistencia técnica a los productores y así impulsar el desarrollo de las regiones áridas de México. Las regiones catalogadas dentro de las zonas áridas de México son Sonora, Chihuahua, Baja California, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila (SAGARPA, 2011).

#### **2.4.1 Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (CNULD)**

El objetivo de la CNULD es luchar contra la desertificación y mitigar los efectos de la sequía en los países afectados por sequía grave o desertificación, adoptando medidas eficaces en todos los niveles, apoyadas por acuerdos de cooperación y asociación internacionales, para contribuir al logro del desarrollo sostenible en las zonas afectadas, exigiendo la aplicación de estrategias a largo plazo en las zonas afectadas dando prioridad al aumento de la productividad de las tierras, la rehabilitación, la conservación y el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos, con el propósito de mejorar el nivel de vida de la población. Por su parte, el objetivo de esta convención a nivel nacional consiste en determinar los factores que contribuyen a la desertificación y las medidas prácticas necesarias para luchar contra la misma y mitigar los efectos de la sequía. Además, los programas de acción nacionales deben especificar las respectivas funciones del gobierno, las comunidades locales y los usuarios de la tierra, así como determinar los recursos disponibles y necesarios (UNCCD, 2017).

Durante la UNCCD, se invitó a las Partes a formular objetivos voluntarios para alcanzar la Neutralidad en la Degradación de las Tierras (NDT), buscando ofrecer bases científicas para comprender e implementar la NDT e informar acerca del desarrollo de una guía práctica que monitoree la consecución de la NDT. Los objetivos son: mantener o aumentar la base del recurso de la tierra, mantener o mejorar el reparto

sostenible de los servicios de los ecosistema, mantener o aumentar la productividad para mejorar la seguridad alimentaria y aumentar la capacidad de adaptación de los habitantes que dependen de ella (Orr B.J. et al., 2017).

## **2.5 Objetivos de desarrollo sostenible 2030 (ODS 2030)**

La Asamblea General de la ONU adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (Figura 3) la cual plantea 17 Objetivos con 169 metas que abarcan aspectos económico, social y ambiental a favor de las personas, el planeta y la prosperidad en el cual el objetivo 13 propone Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos en América Latina y el Caribe en el cual sugiere que se puede crecer y ser ambientalmente sostenible, pero se requieren transformaciones profundas y rápidas, además, plantea que se debe buscar un equilibrio entre acciones de mitigación y de adaptación y a su vez hay que buscar alianzas entre sectores a fin de aumentar la ambición para limitar los aumentos de temperatura, tal como se estipuló en el Acuerdo de París (mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales). Así mismo, asume que las políticas públicas con una mirada territorial son fundamentales para abordar los desafíos que plantea el cambio climático.

Por su parte, el objetivo 15 propone gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad. En dicha asamblea se establece que actualmente, 13 millones de hectáreas de bosque desaparecen cada año y la degradación de las zonas áridas está provocando la desertificación de 3600 millones de hectáreas. También asume que un 15% de la tierra se encuentra bajo protección, sin embargo, la biodiversidad aún está en riesgo, en particular para las zonas áridas, uno de los objetivos establece para el 2020, velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible y los servicios que proporcionan (NU, 2015).



**Figura 3.** Objetivos de desarrollo Sostenible.

Fuente: <https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-sostenible/objetivos-desarrollo-sostenible-ods>

Sin embargo, la deforestación y la desertificación provocadas por las actividades humanas y el cambio climático suponen grandes retos para el desarrollo sostenible y han afectado los medios de vida de millones de personas. Actualmente se están promoviendo medidas para la gestión forestal y la lucha contra la desertificación por lo cual establece para el 2020 promover la gestión sostenible de todos los tipos de bosques, poner fin a la deforestación, recuperar los bosques degradados e incrementar la forestación y la reforestación a nivel mundial, para 2030 establece luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y lograr un mundo con una degradación neutra del suelo, así como también, conservar los ecosistemas montañosos, incluida su diversidad biológica, a fin de (ONU, 2015) proporcionar beneficios esenciales para el desarrollo sostenible (PNUD, 2015).

México participó activamente en la definición de la Agenda, liderando el proceso de negociación. Presentó propuestas concretas para incorporar los principios de igualdad, inclusión social y económica, e impulsó que la sustentabilidad y los derechos humanos

fuesen los ejes rectores de la Agenda 2030. Además, ha mantenido su participación activa en la implementación de la Agenda 2030, siendo uno de los dos países voluntarios en la región para presentar avances sobre los ODS ante el Foro Político de Alto Nivel en Desarrollo Sostenible. Además, se instaló el Comité Técnico Especializado en Desarrollo Sostenible (Presidencia de la República-INEGI), con la participación de las dependencias de la Administración Pública Federal. El Senado de la República instaló el Grupo de trabajo sobre la Agenda 2030, el cual dará seguimiento y respaldo desde el poder legislativo al cumplimiento de los ODS. Y el Desarrollo del Plan de implementación de los ODS por parte de la Presidencia de la República y la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID) con apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (ONU, 2015).

## **2.6 Monitoreo de zonas áridas mediante evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica.**

Las regiones áridas cubren aproximadamente el 43% de la superficie terrestre a nivel mundial (FAO, 2020; Quichimbo et al., 2020; Sánchez-Cano, 2019), las cuales se caracterizan por una disponibilidad limitada de agua (Dunkerley, 2020), aumento de temperatura y disminución de la precipitación (FAO, 2020). Mismas que cuentan con millones de personas que dependen directamente de los servicios de los ecosistemas de estas regiones para su sustento (Sánchez-Cano, 2019; Maestre, Quero, et al., 2012).

Sin embargo, a pesar de que los ecosistemas en tierras áridas desempeñan un papel importante al mantener el equilibrio de los componentes atmosféricos (Gaur & Squires, 2017), la mayor parte de las tierras áridas se encuentran sobre suelos degradados (FAO, 2007).

Un grave problema que enfrentan estos tipos de ecosistemas a nivel global es la desertificación, causada por factores relacionados a eventos climáticos y acciones humanas (IPCC, 2020; Sánchez-Cano, 2019; Granados-Sánchez et al., 2013), tales

como, el uso del fuego, el pastoreo, la recolección de madera, así como también el cultivo de la tierra (ONU, 2019).

Es por ello que se puede definir a las zonas áridas como aquellas regiones que reciben una precipitación anual menor a 200 mm, y semiáridas entre 200 y 500 mm (Sánchez-Cano, 2019; Gaur & Squires, 2017), existiendo una escasez de agua y humedad en el aire y el suelo (Diéguez et al., 2014; Velasco & Pimentel, 2010), además experimentan gran radiación solar, provocando altas temperaturas y una evapotranspiración superior al volumen de agua disponible (Mercado Mancera et al., 2010).

Por su parte, en México, las regiones áridas y semiáridas abarcan más de la mitad del territorio (Briones et al., 2018; CONAFOR, 2015; SAGARPA & SIAP, 2014; SEMARNAT, 2014), en los cuales se centra más de 40% de la población nacional (Briones et al., 2018), estas tierras, se ven amenazadas principalmente por actividades antropogénicas que causan la desertificación tales como: la deforestación, el sobrepastoreo, exceso de labranza, el cambio de uso del suelo y el mal manejo del suelo, propiciando que aproximadamente el 59% de la superficie de la república mexicana se haya desertificado por degradación del suelo (SEMARNAT, 2014).

Una forma de obtener indicadores sobre el grado de aridez en alguna región es el índice de aridez (IA), que es ampliamente utilizado para estimar las condiciones de déficit hídrico de las tierras secas (D'Odorico et al., 2013), mediante este índice, es posible comparar la condición hídrica, con el potencial para detectar la presencia y longitud de los periodos húmedos y secos (Gebremedhin et al., 2018).

También, se han utilizado diferentes criterios para definir la aridez y establecer los límites climáticos de las regiones áridas (Maestre, Salguero-Gómez, et al., 2012). Uno de los índices más utilizados es el desarrollado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) y publicado en 1992 y 1997 (UNEP, 1997), el cual clasifica a las tierras secas en zonas hiperáridas ( $IA < 0.05$ ), áridas ( $0.05 < IA < 0.2$ ), semiáridas ( $0.2 < IA < 0.5$ ), subhúmedas secas ( $0.5 < IA < 0.65$ ) y húmedas ( $IA > 0.65$ ) (Díaz-Padilla et al., 2011).

De acuerdo a la literatura revisada se puede argumentar que un aporte en esta temática de es identificar y clasificar zonas áridas mediante la técnica de evaluación multicriterio (EMC) basada en SIG, ya que estas técnicas han dado buenos resultados para definir criterios involucrados en la toma de decisiones para evaluar de la idoneidad de la tierra en la planificación espacial en regiones áridas (Aldababseh et al., 2018; Charabi & Gastli, 2011; Akbari et al., 2019).

En este sentido, el objetivo principal de este estudio es clasificar zonas áridas mediante evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica en la región noroeste de México, para lo cual se utilizaron variables de tipo ambiental y territorial, tomando como periodo de evaluación el año 2019.

## **2.7 Modelo de simulación geoespacial de zonas áridas**

Como ya se ha mencionado, la aridez es la escasez de humedad y la disminución de las precipitaciones en un área (Abrha & Hagos, 2019) (Asadi Zarch et al., 2015)(Dadhich et al., 2021)(Greve et al., 2019) (Maliva & Missimer, 2012), la cual contempla datos hidroclimatológicos para comprender cambios de esta condición (Greve et al., 2019), por lo tanto, el aumento de la aridez representa una mayor frecuencia de años secos en una región (Gebremedhin et al., 2018), y está relacionada con periodos prologados de sequías que afecta diversos factores como la agricultura, la flora, fauna, la población, así como la economía de la población que habitan en estas regiones (Abrha & Hagos, 2019).

Por su parte, hay evidencias que apuntan a un aumento de las temperaturas y evapotranspiración, por lo tanto, la aridez se incrementara a nivel mundial con el cambio climático (Girvetz & Zganjar, 2014). En consecuencia, esta condición podría aumentar aproximadamente a corto plazo un 10% y a largo plazo un 22%. Por lo tanto, se considera extremadamente importante aplicar una gestión sostenible de los recursos hídricos y una política de sequía en estas regiones para garantizar la seguridad alimentaria de la población (Abrha & Hagos, 2019).

Debido a lo anterior, existe la necesidad de cuantificar el nivel de aridez, así como también analizar los cambios de temperatura y precipitación (Girvetz & Zganjar, 2014) que alteran el ciclo hidrológico y la humedad del suelo (Panday et al., 2015) que además genera estrés climático (Girvetz & Zganjar, 2014). Ante esta problemática se debe desarrollar medidas que prevean y contrarresten los efectos de esta condición en las regiones más vulnerables, así como también reducir los efectos de cambio climático por pérdida de humedad y, por ende, aumento de sequía, pérdida de vegetación y degradación de la tierra (Abrha & Hagos, 2019).

En años recientes, se han empleado varias técnicas de simulación y predicción basados en modelos cuantitativos como por ejemplo Regresión logística (RL) (Aburas et al., 2016) (Maryati et al., 2021)(Belkin et al., 2020) y otros tipos de estudios como Cadenas de Markov (CM), Autómatas Celulares (AC) (Aburas et al., 2016), Análisis de Patrones Espaciales Morfológicos (MSPA)(Nunes de Oliveira et al., 2017) y Redes Neuronales Artificiales (RNA) (Bagheri et al., 2019; Csábrági et al., 2017; Dadhich et al., 2021) utilizando además Sistemas de Información Geográfica (SIG) para predecir escenarios de tendencia lo más cercano a la realidad, considerando necesario analizar información histórica o series temporales para comprender las relaciones espaciales y temporales de los factores (Dadhich et al., 2021) (Aburas et al., 2016).

Así mismo, se han utilizado algunos otros métodos para predecir y pronosticar los cambios de ciertos factores a través del tiempo (Maulud & Mohsin Abdulazeez, 2020)(James et al., 2021), la regresión lineal es una técnica muy útil, para ver el efecto entre dos o más variables (Maryati et al., 2021)(Belkin et al., 2020). Sin embargo, no se ha considerado la confiabilidad y los resultados del proceso de modelado por regresión (Etemadi & Khashei, 2021). Es por ello que el uso de series temporales de datos históricos ha sido de gran utilidad para simular y predecir cambios en cuestiones ambientales (Bagheri et al., 2019) (Dadhich et al., 2021) (Aburas et al., 2016).

Por su parte, una de las técnicas ampliamente utiliza y recomendada por la Organización Meteorológica Mundial es el método de tendencia de Mann-Kendall (MK)

(An et al., 2020), es una prueba no paramétrica (Lin et al., 2020) para examinar la tendencia de variación de una serie temporal de datos con el tiempo, el cual maneja un rango de prueba muy amplio y los datos no necesitan seguir una distribución específica (Wang et al., 2008)(Jiang et al., 2021)(Lin et al., 2020).

En consecuencia, y debido a que no basta el análisis retrospectivo de los cambios, sino que es también necesario el análisis a mediano y largo plazo (Cristián Henríquez et al., 2006)(Cristian Henríquez et al., 2006)(Jat et al., 2008), una opción que se presenta es la generación de modelos espaciales, como lo es la simulación de escenarios futuros que nos permita conocer los cambios de un área geográfica (Singh et al., 2017). Sin embargo, estos modelos no deben tomarse como un pronóstico o predicción, sino que deben ser interpretados como información y descripciones coherentes de un posible estado futuro (Patel et al., 2007).

De tal manera, modelos de tendencia nos permitan repetir un fenómeno existente para generar alternativas futuras y analizar las consecuencias potenciales de cada una de ellas (Overmars & Verburg, 2006)(Verburg et al., 2006). En tal sentido, varios trabajos y metodologías se han desarrollado para realizar la simulación geoespacial de escenarios futuros para estudios de diferente finalidad. La mayoría de ellos simulan los procesos forestales, para comprender los impactos asociados y poder implementar medidas para mitigar estos procesos de pérdida forestal (Thapa et al., 2013). Así mismo, otros estudios analizan cambios en las precipitaciones y temperaturas para examinar los efectos de las sequías a futuro (Bagheri et al., 2019) (Dadhich et al., 2021) (Aburas et al., 2016) (Wang et al., 2008)(Jiang et al., 2021)(Lin et al., 2020).

## **2.8 Sistema de Ayuda a la Toma de Decisiones Espacial Web (SADEW)**

En las últimas décadas, el monitoreo ambiental ha tomado gran importancia, esto debido al drástico aumento de los desastres como lo son los incendios forestales (Vipin, 2012) que causan daños en bosques y montañas (Son et al., 2006), reducción

de los bienes y servicios ambientales, calentamiento global, alteración de los ciclos hidrológicos y la pérdida de hábitat (Mas et al., 2016). Otro de los problemas ambientales es la desertificación que en algunas ocasiones, los daños en la cubierta vegetal y el suelo son irreversibles (Hernández-Clemente & Hornero, 2021).

Así mismo, la degradación del suelo es otro de los problemas que ocasiona la pérdida forestal causados principalmente la urbanización, la tala excesiva, el aumento de áreas dedicadas a la agricultura y la ganadería (Mas et al., 2016), misma que a su vez afecta a los ecosistemas áridos y semiáridos, sobre todo cuando se presentan periodos prolongados de sequía, altas temperaturas, bajas precipitaciones y déficit de humedad (Mercado Mancera et al., 2010).

Es por ello que se considera de suma importancia el monitorear y analizar el cambio de los ecosistemas ya que permite evaluar los impactos producidos por dichas problemáticas (Hernández-Clemente & Hornero, 2021). Una de las técnicas de monitoreo de deforestación con la ayuda de imágenes satelitales es el sistema DETER (Sistema de Detección de Deforestación en la Amazonía Legal en Tiempo Real: <http://www.obt.inpe.br/deter/>) (Mas et al., 2016).

Otra de las aplicaciones de monitoreo web es el sistema de vigilancia de incendios forestales (FFSS) en las montañas de Corea del Sur, que miden la temperatura y la humedad, y detectan humo, siendo posible detectar el calor. Permite conocer la alarma temprana en tiempo real cuando se produce el incendio forestal (Son et al., 2006). Otra técnica de monitoreo de incendios forestales que utiliza un modelo de color basado en reglas para la clasificación de píxeles de incendios el cual utiliza el espacio de color RGB y YCbCr. El método propuesto tiene una tasa de detección más alta y una tasa de falsas alarmas más baja, además de ser barato en el cálculo, se puede utilizar para la detección de incendios forestales en tiempo real (Vipin, 2012).

En lo que respecta a condiciones de aridez, el monitoreo regional de los procesos de sequía es una herramienta fundamental y necesaria (Easdale et al., 2012), por ello, se cuenta con un monitor de sequía (CONAGUA, 2022; CONAGUA & UNAM, 2019), el cual provee información estadística y geoespacial de esta condición. Por su parte, el monitor de cambio climático (AdapteCCa, 2019) muestra proyecciones actualizadas

para el clima futuro, mismo que proyecta diferentes factores de cambio climático a futuro.

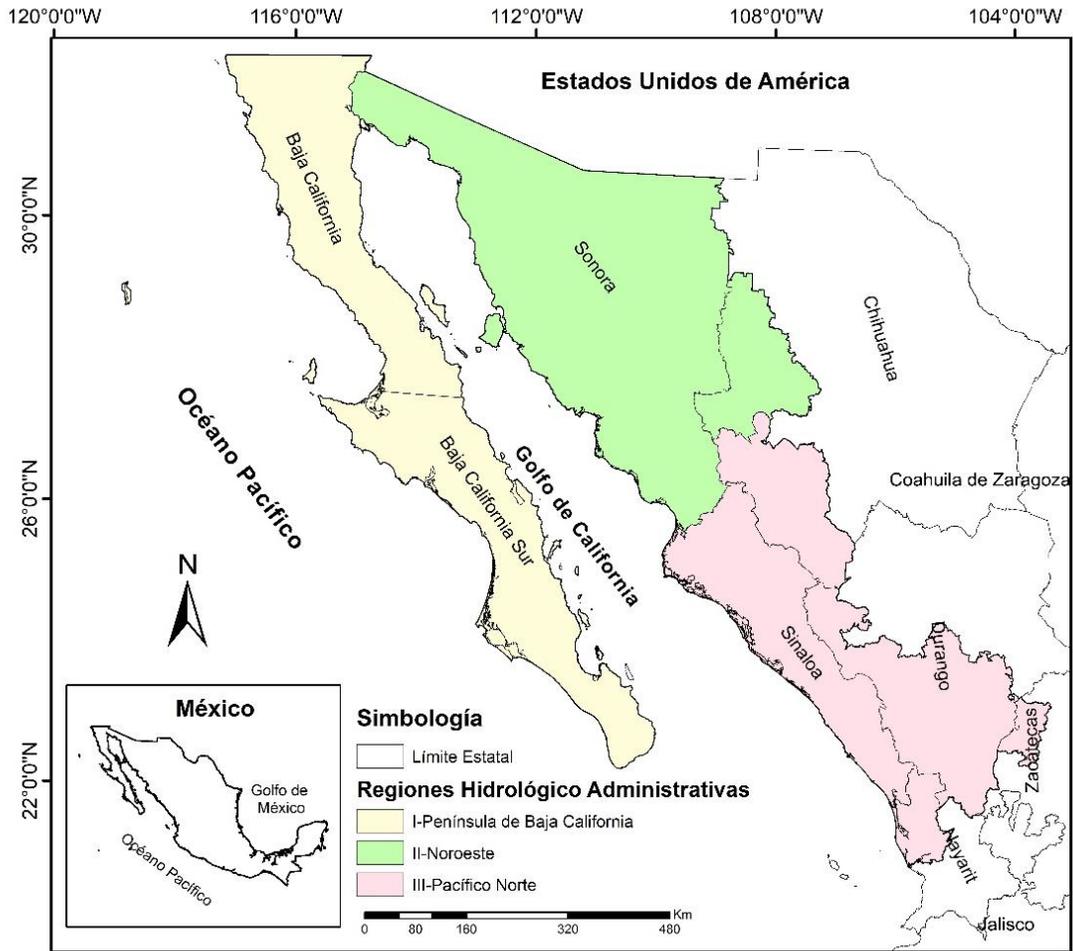
Por su parte, en (Easdale et al., 2012) proponen una herramienta para el monitoreo de sequías en zonas áridas y semiáridas, apoyándose de imágenes satelitales, con la finalidad de ayudar a la toma de decisiones a escala regional, para instituciones y organizaciones locales. Sin embargo, en ella se discuten los alcances de la herramienta y los desafíos futuros, asociados al desarrollo de sistemas de alerta temprana y mitigación de sequías en regiones áridas y semiáridas.

Debido a lo anterior, se requiere poner más atención a los ecosistemas áridos y semiáridos, implementando herramientas que permitan conocer el estado actual de estas regiones, y de esta manera atender de inmediato las problemáticas que en ella se presentan, logrando así, una mejor adaptación y mitigación ambiental, económica y social.

## **Capítulo III. Descripción y contexto geográfico de la región noroeste de México**

### **3.1 Ubicación del área de estudio**

El área de estudio está conformada por tres Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA) ubicadas al noroeste de México: Península de Baja California (RHA-I PBC) Pacífico Norte (RHA-II PN), y Noroeste (RHA-III NOR) (Figura 4), misma que se encuentra localizada en las coordenadas geográficas extremas de: 32° 39' y 21° 22' latitud Norte y 118° 52' y 103° 20' longitud Oeste. Colinda con el océano Pacífico al Oeste, Phoenix, Arizona al Norte, Chihuahua y Durango al Este, y al Sur con Nayarit, abarcando los estados de Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Durango, Nayarit, Sinaloa, Sonora y Zacatecas, representando aproximadamente el 25.7% del territorio mexicano (INEGI, 2021).



**Figura 4.** Área de estudio Noroeste de México (RHA Pacífico Norte, RHA Baja California y RHA Noroeste).

### 3.2 Caracterización de la Región

En la región Noroeste de México, se ubica el desierto de Sonora el cual se encuentra bajo influencias oceánicas y atmosféricas que determinan su clima árido, principalmente la alta presión del Pacífico Nororiental y la corriente fría de California (Salinas-Zavala et. al, 1998), que a su vez se ve afectado por la presencia de una corriente marina fría (la corriente de California), la cual se desplaza de norte a sur en forma paralela a la costa del océano Pacífico, y por la nacimiento desde el fondo del mar de Cortés de aguas frías, esto favorece la formación de una extensa zona árida adyacente al mar (González Medrano, 2012).

En la región Noroeste de México, se ubica el desierto de Sonora el cual se encuentra bajo influencias oceánicas y atmosféricas que determinan su clima árido, principalmente la alta presión del Pacífico Nororiental y la corriente fría de California (Salinas-Zavala et. al, 1998), que a su vez se ve afectado por la presencia de una corriente marina fría (la corriente de California), la cual se desplaza de norte a sur en forma paralela a la costa del océano Pacífico, y por la nacimiento desde el fondo del mar de Cortés de aguas frías, esto favorece la formación de una extensa zona árida adyacente al mar (González Medrano, 2012).

### 3.2.1 Localización y demarcación administrativa

La RHA-I PBC comprende la totalidad de los estados de Baja California y Baja California Sur, y el municipio de San Luis Río Colorado de Sonora (Figura 5). Limita al norte con Estados Unidos de América, al este con el Golfo de California y al oeste con el Océano Pacífico. Cuenta con una extensión territorial es de 145,344 km<sup>2</sup>, de los cuales 71,786 km<sup>2</sup> (49.39%) le corresponden al estado de Baja California; 73,277 km<sup>2</sup> (50.42%) al de Baja California Sur y 281 km<sup>2</sup> (0.19%) a la porción del estado de Sonora (Figura 2) (CONAGUA, 2012a). Administrativamente está conformada por 11 municipios: cinco en Baja California, cinco en Baja California Sur y uno en Sonora (Tabla 3).

**Tabla 3.** Municipios de la RHA-I PBC

Estado		Municipio	
Clave	Estado	Clave	Municipio
02	Baja California	001	Ensenada
02	Baja California	002	Mexicali
02	Baja California	002	Mexicali
02	Baja California	003	Tecate
02	Baja California	004	Tijuana
02	Baja California	005	Playas de Rosarito

03	Baja California Sur	001	Comondú
03	Baja California Sur	002	Mulegé
03	Baja California Sur	003	La Paz
03	Baja California Sur	008	Los Cabos
03	Baja California Sur	009	Loreto
26	Sonora	055	San Luis Río Colorado

La RHA-II NOR, se ubica al Noroeste de la República Mexicana. Limita al norte con los Estados Unidos de América, al Noroeste con el estado de Baja California y el Golfo de California, al Sur Sinaloa y al Este Chihuahua (Figura 5). Comprende las entidades federativas de Sonora y parte de Chihuahua, cubre una superficie de 197,586 km<sup>2</sup>, que equivale a 10.5% de la superficie del país; 170,159 km<sup>2</sup> (86%) pertenecen al estado de Sonora y 25,660 km<sup>2</sup> (14%) al estado de Chihuahua (Figura 2)(CONAGUA, 2012b). Administrativamente está conformada por 78 municipios, de los cuales 71 corresponden al estado de Sonora y 7 al estado de Chihuahua. Así mismo, el municipio de San Luis Río Colorado se considera para fines de gestión del agua en la RHA I Península de Baja California, aunque territorialmente forma parte del Estado de Sonora (Tabla 4).

**Tabla 4.** Municipios de la RHA-II NOR

Estado				Estado			
Municipio		Municipio		Municipio		Municipio	
Clave	Estado	Clave	Municipio	Clave	Estado	Clave	Municipio
08	Chihuahua	031	Guerrero	26	Sonora	034	Huépac
08	Chihuahua	040	Madera	26	Sonora	035	Imuris
08	Chihuahua	043	Matachí	26	Sonora	036	Magdalena
08	Chihuahua	051	Ocampo	26	Sonora	037	Mazatán
08	Chihuahua	063	Temósachic	26	Sonora	038	Moctezuma
08	Chihuahua	066	Uruachi	26	Sonora	039	Naco
26	Sonora	001	Aconchi	26	Sonora	040	Nácori Chico
26	Sonora	002	Agua Prieta	26	Sonora	041	Nacozeni de García
26	Sonora	003	Alamos	26	Sonora	042	Navojoa

26	Sonora	004	Altar	26	Sonora	043	Nogales
26	Sonora	005	Arivechi	26	Sonora	044	Onavas
26	Sonora	006	Arizpe	26	Sonora	045	Opodepe
26	Sonora	007	Atil	26	Sonora	046	Oquitoa
26	Sonora	008	Bacadéhuachi	26	Sonora	047	Pitiquito
26	Sonora	009	Bacanora	26	Sonora	048	Puerto Peñasco
26	Sonora	010	Bacerac	26	Sonora	049	Quiriego
26	Sonora	011	Bacoachi	26	Sonora	050	Rayón
26	Sonora	012	Bácum	26	Sonora	051	Rosario
26	Sonora	013	Banámichi	26	Sonora	052	Sahuaripa
26	Sonora	014	Baviácora	26	Sonora	053	San Felipe de Jesús
26	Sonora	015	Bavispe	26	Sonora	054	San Javier
26	Sonora	016	Benjamín Hill	26	Sonora	056	San Miguel de Horcasitas
26	Sonora	017	Caborca	26	Sonora	057	San Pedro de la Cueva
26	Sonora	018	Cajeme	26	Sonora	058	Santa Ana
26	Sonora	019	Cananea	26	Sonora	059	Santa Cruz
26	Sonora	020	Carbó	26	Sonora	060	Sáiric
26	Sonora	021	La Colorada	26	Sonora	061	Soyopa
26	Sonora	022	Cucurpe	26	Sonora	062	Suaqui Grande
26	Sonora	023	Cumpas	26	Sonora	063	Tepache
26	Sonora	024	Divisaderos	26	Sonora	064	Trincheras
26	Sonora	025	Empalme	26	Sonora	065	Tubutama
26	Sonora	026	Etchojoa	26	Sonora	066	Ures
26	Sonora	027	Fronteras	26	Sonora	067	Villa Hidalgo
26	Sonora	028	Granados	26	Sonora	068	Villa Pesqueira
26	Sonora	029	Guaymas	26	Sonora	069	Yécora
26	Sonora	030	Hermosillo	26	Sonora	070	General Plutarco Elías Calles
26	Sonora	031	Huachinera	26	Sonora	071	Benito Juárez
26	Sonora	032	Huásabas	26	Sonora	072	San Ignacio Río Muerto
26	Sonora	033	Huatabampo				

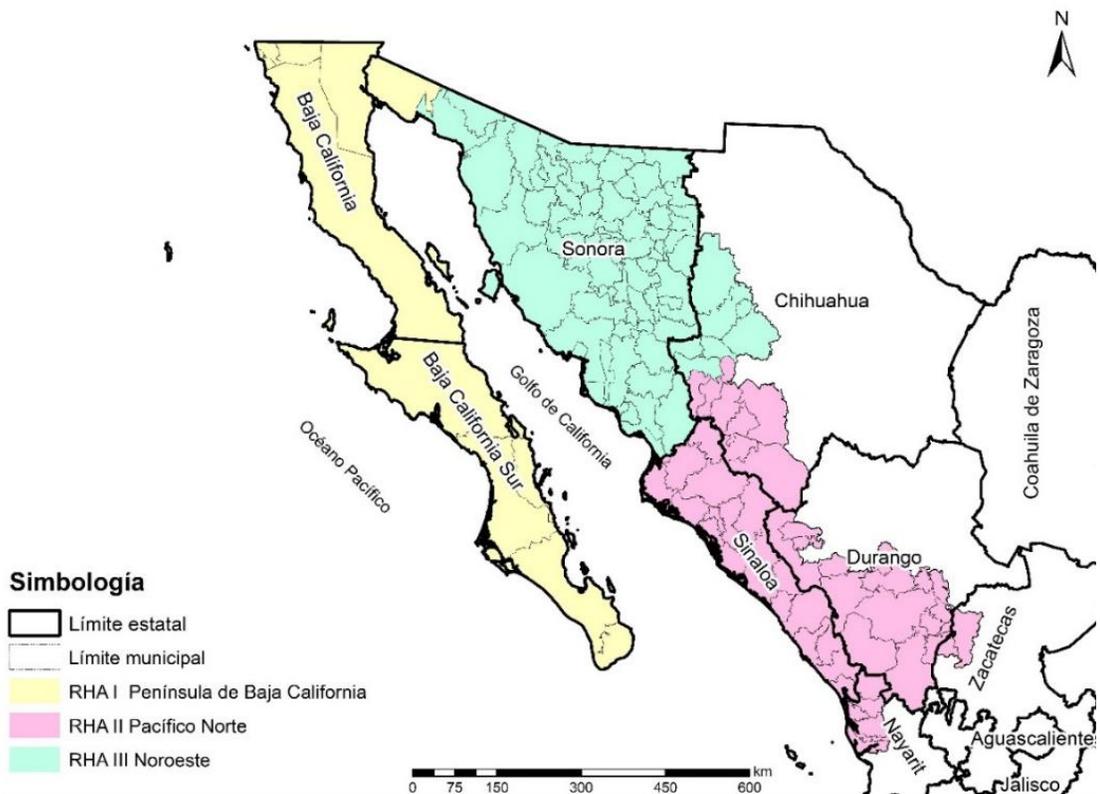
La RHA-III PN comprende la totalidad del estado de Sinaloa y parte de los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas y Nayarit; colinda al norte con el estado de Sonora; al noreste con el estado de Chihuahua; al este con el estado de Durango y Zacatecas; al sur con los estados de Zacatecas y Nayarit (Figura 5) (CONAGUA, 2012c).

Administrativamente está integrado por 51 municipios: 18 de Sinaloa, ocho de Chihuahua, dieciséis de Durango, siete de Nayarit y dos de Zacatecas. Cuenta con una superficie territorial de 152,013 km<sup>2</sup>, equivalente a 8% de la superficie territorial de la República Mexicana (Tabla 5).

**Tabla 5.** Municipios de la RHA-III PN

Estado				Municipio				Estado				Municipio			
Clave	Estado	Clave	Municipio	Clave	Estado	Clave	Municipio	Clave	Estado	Clave	Municipio	Clave	Estado	Clave	Municipio
08	Chihuahua	008	Batopilas de Manuel Gómez Morín	18	Nayarit	010	Rosamorada								
08	Chihuahua	020	Chínipas	18	Nayarit	011	Ruíz								
08	Chihuahua	027	Guachochi	18	Nayarit	012	San Blas								
08	Chihuahua	029	Guadalupe y Calvo	18	Nayarit	015	Santiago Ixcuintla								
08	Chihuahua	030	Guazapares	18	Nayarit	016	Tecuala								
08	Chihuahua	041	Maguarichi	18	Nayarit	017	Tepic								
08	Chihuahua	065	Urique	18	Nayarit	018	Tuxpan								
10	Durango	001	Canatlín	25	Sinaloa	001	Ahome								
10	Durango	002	Canelas	25	Sinaloa	002	Angostura								
10	Durango	003	Coneto de Comonfort	25	Sinaloa	003	Badiraguato								
10	Durango	004	Cuencamé	25	Sinaloa	004	Concordia								
10	Durango	005	Durango	25	Sinaloa	005	Cosalá								
10	Durango	008	Guadalupe Victoria	25	Sinaloa	006	Culiacán								
10	Durango	009	Guanaceví	25	Sinaloa	007	Choix								
10	Durango	014	Mezquital	25	Sinaloa	008	Elota								
10	Durango	016	Nombre de Dios	25	Sinaloa	009	Escuinapa								
10	Durango	019	Otáez	25	Sinaloa	010	El Fuerte								
10	Durango	020	Pánuco de Coronado	25	Sinaloa	011	Guasave								
10	Durango	021	Peñón Blanco	25	Sinaloa	012	Mazatlán								
10	Durango	022	Poanas	25	Sinaloa	013	Mocorito								

10	Durango	023	Pueblo Nuevo	25	Sinaloa	014	Rosario
10	Durango	026	San Dimas	25	Sinaloa	015	Salvador Alvarado
10	Durango	028	San Juan del Río	25	Sinaloa	016	San Ignacio
10	Durango	032	Santiago Papasquiario	25	Sinaloa	017	Sinaloa
10	Durango	033	Súchil	25	Sinaloa	018	Navolato
10	Durango	034	Tamazula	32	Zacatecas	009	Chalchihuites
10	Durango	035	Tepehuanes	32	Zacatecas	010	Fresnillo
10	Durango	037	Topia	32	Zacatecas	021	Jiménez del Teul
10	Durango	038	Vicente Guerrero	32	Zacatecas	029	Miguel Auza
10	Durango	039	Nuevo Ideal	32	Zacatecas	039	Río Grande
18	Nayarit	001	Acaponeta	32	Zacatecas	040	Sain Alto
18	Nayarit	005	Huajicori	32	Zacatecas	042	Sombrerete
18	Nayarit	009	Del Nayar	32	Zacatecas	049	Valparaíso



**Figura 5.** Límites municipales.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2021)

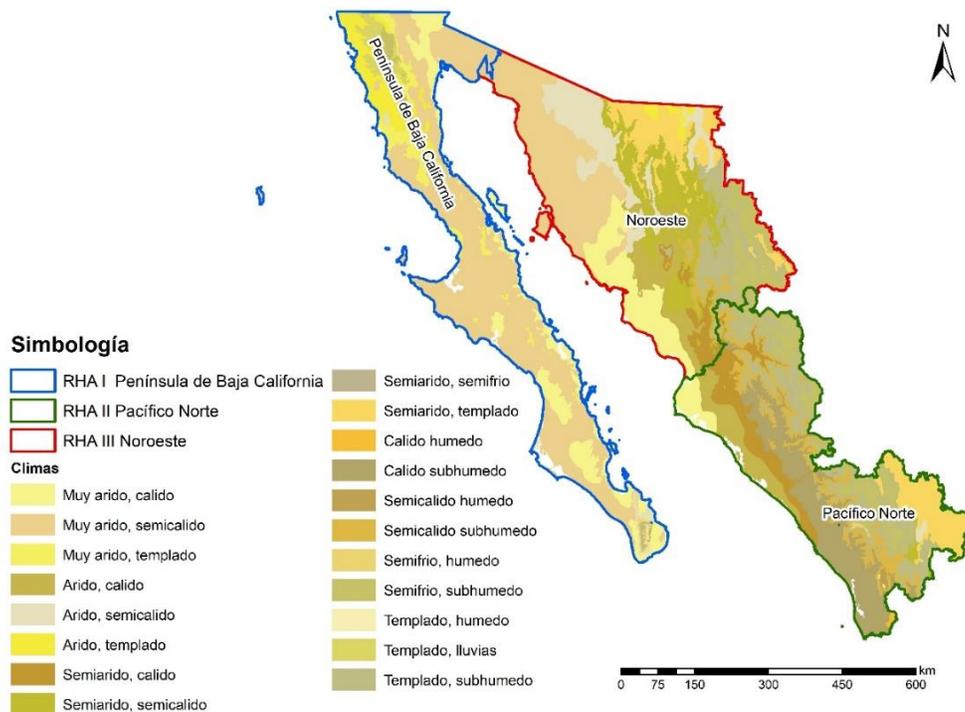
### 3.2.2 Aspectos ambientales

#### 3.2.2.1 Climas

En la RHA-I PBC predomina el clima seco y cálido, con partes templadas al norte y en las zonas serranas. Los principales tipos de clima que se observan en la región son: semidesértico (parte baja del Río Colorado y planicie oriental), templado (desde la frontera noroeste hasta el valle de San Quintín), templado húmedo (parte central montañosa) y el desértico (al sur, en las planicies) (Figura 6) (CONAGUA, 2012a).

En la RHA-II NOR predominan los climas de tipo seco y semiseco, en la mayor parte del territorio de Sonora, y los subhúmedos y templado que se presentes en lo alto de la sierra. Otros climas presentes son el subhúmedo cálido y el semifrío en la porción territorial de Chihuahua (Figura 6) (CONAGUA, 2012b).

En la RHA-III PN los climas predominantes son templado subhúmedo y cálido subhúmedo (CONAGUA, 2012c).



**Figura 6.** Mapa de Climas.

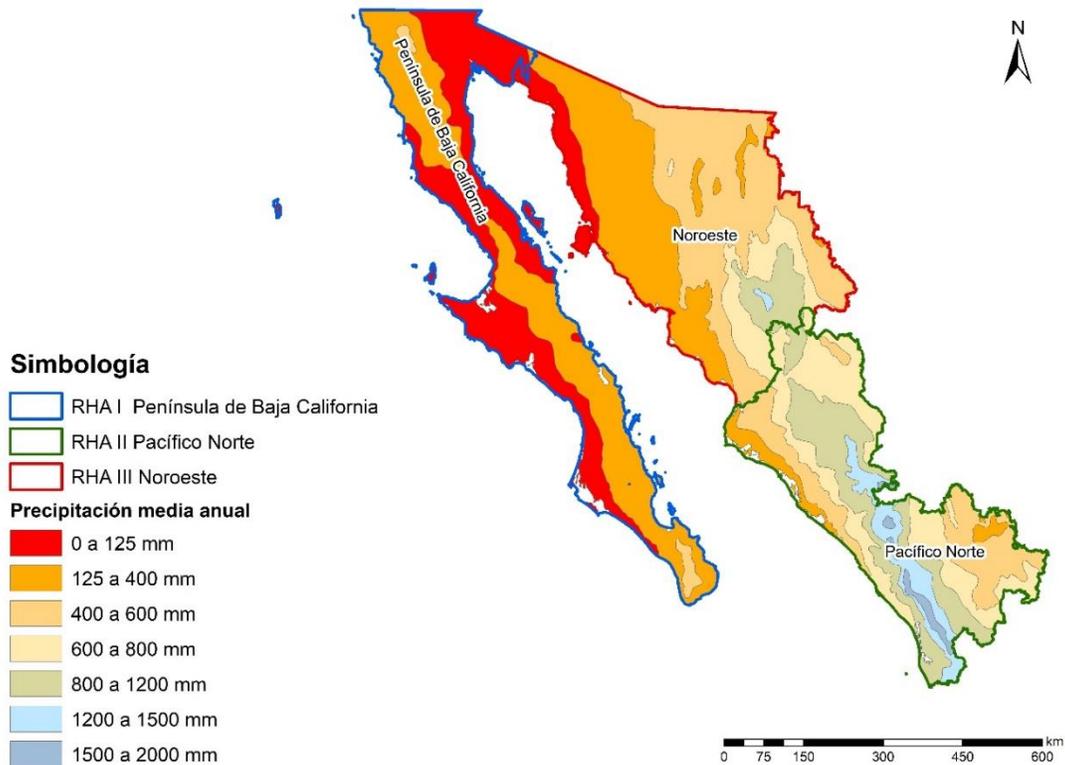
Fuente: La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio, 2020)

### **3.2.3 Precipitación media anual**

En la RHA-I PBC, la precipitación media anual (PMA) es de 169 mm (77% menor que la media nacional de 760 mm). Las lluvias son muy escasas y con una gran variabilidad espacial; en la parte noroeste de la Península de Baja California la PMA varía de 200 a 400 mm, mientras que en la porción centro, en la sierra de San Pedro Mártir, varía de 100 a 600 mm y en la porción sur la precipitación varía de 100 a 200 mm. La parte más seca se presenta en el Delta del Río Colorado. La mayor concentración de lluvia en Baja California Sur se registra durante el verano, alcanzando un valor medio anual cercano a los 160 mm; y en Baja California se tienen lluvias con un valor medio anual de 180 mm (Figura 7) (CONAGUA, 2012a).

En la RHA-II NOR, la precipitación media anual es de aproximadamente de 368 mm, presentándose menor precipitación al noroeste de la región (100 mm por año), en las cuencas conocidas como el Desierto de Altar y del Río Sonoyta, así como el Río Concepción, y cabe resaltar que, en la zona serrana en los estados de Sonora y Chihuahua, la precipitación se presenta en forma de lluvia y de nieve (Figura 7) (CONAGUA, 2012b).

En la RHA-III PN, la precipitación media anual es de 747 mm, valor muy parecido al nacional de 760 mm. Entre los meses de julio a septiembre cae aproximadamente 70% de la precipitación anual (Figura 7) (CONAGUA, 2012c).



**Figura 7.** Precipitación media anual.

Fuente: La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio, 2020)

### 3.2.3.1 Temperatura media anual

En la RHA-I PBC, de acuerdo con los datos disponibles de 7 años de la estación meteorológica No. 95 (SARH), se obtuvo una temperatura anual promedio de 10.6 °C. Por su parte, siendo el mes más frío enero con 1.5 °C de promedio mensual y el mes de Julio el más cálido con 16.3 °C de promedio mensual (Figura 8) (INECC, 2007).

La RHA-II NOR tiene una temperatura media anual de 20°C; el rango mayor por Subregión hidrológica es de 4.4 °C. La zona más cálida se presenta al norte de Sonora. Al Sur-Sureste de Sonora presenta climas que van desde los muy secos hasta los semifríos (en las zonas serranas al este) y una pequeña porción de clima cálido en la parte sureste del Río Mayo (Figura 8) (CONAGUA, 2012b).

En la RHA-III PN se puede observar que en la porción norte de la región se presentan temperaturas más cálidas y secas, aunque en las partes serranas pueden presentarse temperaturas bajo cero en ciertas épocas del año. A medida que se va más hacia el sur, la temperatura se hace más templada y húmeda, con temperaturas medias de 12 a 18°C, máximas de 22°C y bajo cero en las zonas serranas en ciertas épocas. En el caso de la región del Valle de Guadiana, la temperatura media es de entre 16 y 18°C, con mínimas bajo de cero en ciertas épocas y máximas mayores de 24°C (Figura 8) (CONAGUA, 2012c).



**Figura 8.** Temperatura media anual

Fuente: La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio, 2020)

### 3.2.4 Fenómeno de la sequía

La sequía, es un desastre natural de muy lento comienzo, que tarda meses en establecerse y puede persistir por estaciones, años o aun décadas. Para determinar cuándo empieza o termina la sequía, se requiere una vigilancia cuidadosa de las variables meteorológicas e hidrológicas tales como la precipitación y el escurrimiento (CONAGUA, 2012b).

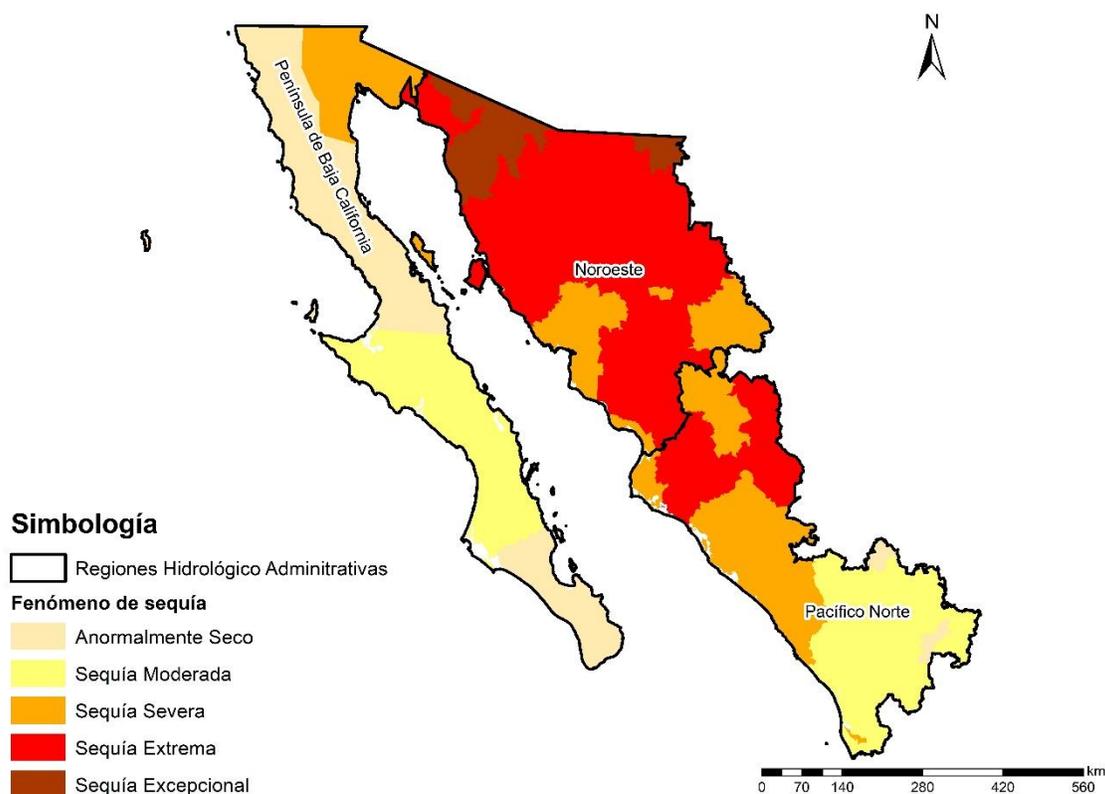
El fenómeno de sequía meteorológica se presenta cuando existe una disminución considerable de la precipitación con respecto a la media anual y que perdura varios meses y/o años. Los principales efectos de este fenómeno se dan en la agricultura y ganadería, con graves consecuencias socioeconómicas a la población rural y urbana. Los impactos que pueden generarse por la presencia de sequías severas son (CONAGUA, 2012a):

En la RHA-I PBC durante el año 2008, en mayo, la península de Baja California presentó sequía moderada, sin embargo, Tijuana y Playas de Rosarito en Baja California presentaron condiciones de sequía de anormalmente seco, y en el suroeste del municipio de Comondú se presentó sequía severa. Por su parte, en el mes de mayo del 2009 permanecieron condiciones de sequía anormalmente seca a severa en toda la región (Figura 9) (CONAGUA, 2012a).

En la RHA II Noroeste existen varias zonas con sequía permanente entre las que destaca la zona costera donde se ubican grandes centros de población como Hermosillo, Caborca, Puerto Peñasco y Guaymas. Las zonas afectadas por el déficit hídrico permanente son Río Concepción, Río Sonora 3 y Río Mátape 2. Las afectaciones de una sequía extrema o catastrófica en el sector agropecuario y forestal, serían más importantes en la región del Río Yaqui y el área afectada sería de 3'818,929 ha, principalmente dedicadas a actividades agropecuarias y forestales (Figura 9) (CONAGUA, 2012b).

En la RHA-III PN la sequía es considerada de riesgo en el sector agrícola, por lo tanto, las implicaciones sociales y económicas han repercutido principalmente en el ámbito rural. Los municipios más afectados ante las sequías en el estado de Sinaloa son El

Fuerte, Choix, Sinaloa, Mocorito, Badiraguato, Salvador Alvarado, Elota, Cosalá, San Ignacio, Mazatlán, Concordia, Rosario, Escuinapa y Culiacán (Figura 9) (CONAGUA, 2012c).



**Figura 9.** Niveles de Sequía en el Noroeste de México  
Fuente: CONAGUA. Monitor de sequía en México (CONAGUA, 2022)

### 3.2.5 Cambio climático

En la RHA-I PBC de acuerdo con información del Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México (Arreguín Cortés et al., 2015), que muestra las proyecciones climáticas de precipitación para el periodo 2061-2090, se espera que en invierno esta región presentará mayor descenso de precipitación, con reducciones de alrededor de 20% en relación al periodo correspondiente cien años atrás. Por otro lado, los promedios anuales de precipitación indican que el estado de Baja California tendrá el mayor

decremento en precipitación anual con valores de 21% con respecto a los últimos 50 años. Por lo tanto, se puede suponer que para 2030 habrá una reducción de alrededor de 10% de la precipitación (CONAGUA, 2012a).

En la RHA-II NOR de acuerdo al Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el cambio climático (Arreguín Cortés et al., 2015) se tienen las proyecciones climáticas de precipitación para el periodo 2061-2090. Se espera que los estados del Noroeste del país presenten mayor decremento en las precipitaciones, con reducciones de aproximadamente un 30% en relación al periodo correspondiente cien años atrás. Los promedios anuales de precipitación se estiman que son los estados de Sonora y Baja California, los que tendrán el mayor decremento en precipitación anual con valores de 21% de los últimos 50 años. Por lo tanto, se supone que para el año 2030 se presente una reducción de alrededor de 10% de la precipitación (CONAGUA, 2012b).

En la RHA-III PN, se estima que, debido al cambio climático, habrá un aumento en la duración e intensidad de las sequías en el norte de la región. Por otro lado, se espera la presencia de ciclones con mayor frecuencia en el centro y sur. Debido a estas estimaciones, se considera importante que la planeación regional considere la anticipación a estos efectos climáticos y ambientales. De los 24 acuíferos, 9 presentan un déficit anual de 128 hm<sup>3</sup>. También se considera sumamente necesario definir el grado apropiado y sustentable de explotación de los acuíferos, a partir de las características precisas de cada uno ellos, como son los volúmenes de extracción y recarga, calidad del agua y flujos de agua subterránea (CONAGUA, 2012c).

### **3.2.6 Aspectos sociales**

En la RHA-I PBC, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI, la población total de la región es de 3,970,476 habitantes; 50.56% son hombres y 49.44% mujeres. Las regiones con mayor población son Tijuana Baja California y

Mexicali Baja California, con 1,559,683 y 936,826 habitantes respectivamente; les sigue Ensenada Baja California, con 11.76% (466,814 habitantes). La tasa de crecimiento poblacional promedio en 2012, se calcula en 2.41. Se estima para el año 2030 sea de 1.54. por otro lado, la población rural representa 8.62% de la población total (342,268 habitantes), el 91.38% (3,628,208 habitantes) se localiza en zonas urbanas. La densidad de población es de 25.36 personas por km<sup>2</sup> (CONAGUA, 2012a).

En la RHA-II NOR la población total es de 2'583,7105 habitantes, representando el 2.3% de la población total del país, de los cuales 84% se ubica en zonas urbanas y 16% en zonas rurales. El 96.14 % de la población de la región se localiza en el estado de Sonora y el 3.86% restante en los siete municipios de Chihuahua. La densidad de población es de 12 habitantes por km<sup>2</sup>. La región cuenta con 8,227 localidades, de las cuales 66 son urbanas y 8,161 rurales. Las 5 ciudades que cuentan con más de 100,000 habitantes son: Hermosillo 715,061, Nogales 212,533, Navojoa 113,836, Guaymas 113,082 y Ciudad Obregón 298,625 (CONAGUA, 2012b).

En la RHA-III PN se estima una población de 4.18 millones de habitantes (INEGI, 2015). Los centros urbanos con mayor población son: Culiacán (675,773), Durango (582,267), Mazatlán (381,583), Los Mochis (256,613), Guasave (71,196) y Guamúchil (63,743). El Índice de Desarrollo Humano en casi toda la región es medio. El Producto Interno Bruto (PIB) de los municipios que integran la región ascendió en el año 2008 a 266 mil 887.9 millones de pesos, que correspondió a 3.1% del PIB total nacional. Es importante destacar que el estado de Sinaloa y los municipios del estado de Durango que pertenecen a esta región, aportan el 87.3% del total del PIB de la Región (CONAGUA, 2012c).

### **3.2.7 Aspectos económicos**

En la RHA-I PBC, el PIB de los municipios que integran la región ascendió en 2008 a 308 mil millones de pesos, incluida la generación de energía eléctrica. Esta región

cuenta crecimiento económico más dinámico del país, con tasas siempre superiores a la media nacional. La aportación al PIB nacional es de 3.6%. La distribución del PIB por sector es la siguiente: el sector primario tiene una aportación de 3% respecto al PIB total regional, el secundario 32% y el terciario 65%. Los giros económicos que destacan son: los servicios turísticos, principalmente playas y la actividad de la industria de alimentos y bebidas, ambos giros están fuertemente vinculados con la disponibilidad de agua. Con respecto a la productividad del agua, el sector terciario genera más valor por cada m<sup>3</sup> de agua utilizada y el de menor productividad es el sector primario (CONAGUA, 2012a).

En la RHA-II NOR, los municipios y poblaciones fronterizas de Sonora, como Sonoyta, Nogales y Agua Prieta, facilitan el acceso hacia los Estados Unidos de América de los productos de la industria maquiladora además de las actividades turísticas en puertos como San Carlos-Guaymas y Puerto Peñasco, lo que han consolidado esas áreas como importantes puntos de atracción de flujos migratorios hacia la región. El Producto Interno Bruto (PIB) de los municipios que integran esta región ascendió en el año 2008 a 220 mil 689 millones de pesos, con lo que su contribución al PIB Total Nacional para ese mismo año fue de 2.6%, contribuyendo los municipios de Sonora con alrededor de 95% del PIB regional (CONAGUA, 2012b).

En la RHA-III PN, la principal actividad económica es la camaronicultura y colocan a esta zona en el primer lugar a nivel nacional en cuanto a producción al cultivo de las especies de camarón. Existen cerca de 350,000 hectáreas dedicadas a la acuicultura, incluyendo las aguas costeras protegidas, aptas para el aprovechamiento de diversos maricultivos como el ostión, el mejillón y varias especies de peces marinos. Las zonas pesqueras más importantes se ubican en los litorales de Sinaloa y el norte de Nayarit (CONAGUA, 2012c).

# Capítulo IV. Metodología general para el monitoreo espacial, de tendencia y web de zonas áridas

## 4.1 Datos

### 4.1.1 Datos utilizados para el monitoreo de zonas áridas mediante EMC y SIG y para el Sistema de Ayuda a la Toma de Decisiones Espacial Web (SADEW)

Con el fin de identificar, clasificar y monitorear las zonas áridas del noroeste de México, se seleccionaron algunos indicadores de aspectos ambientales, humedad y vegetación de acuerdo con una revisión bibliográfica tomando el año 2020 para nuestro estudio, esto debido a la disponibilidad de los datos al momento de hacer este análisis. La Tabla 6 muestra los datos y la fuente utilizados. Dentro de dichas variables se tienen datos que fueron obtenidos a partir de imágenes satelitales del sensor MODIS, del sensor TERRA Y FLDAS, así como también, variables obtenidas a partir del MDE obtenido del SRTM (pendientes y orientaciones).

**Tabla 6.** Datos geospaciales requeridos.

Variables	Tipo de Dato	Resolución Espacial (m)	Fuente	Enlace
Precipitación	Raster	4 km	Conjuntos de datos TerraClimate	<a href="https://app.climateengine.org/climateEngine">https://app.climateengine.org/climateEngine</a>
Temperatura	Raster	1 km	MODIS/ USGS	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a>
Evapotranspiración	Raster	4 km	Conjuntos de datos TerraClimate	<a href="https://app.climateengine.org/climateEngine">https://app.climateengine.org/climateEngine</a>
DEM	Raster	90 m	SRTM, (Shuttle Radar Topography Mission)	<a href="http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/">http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/</a>
NDVI	Raster	500 m	MODIS/ USGS	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a>
Humedad	Raster	9 km	Conjuntos de datos FLDAS	<a href="https://app.climateengine.org/climateEngine">https://app.climateengine.org/climateEngine</a>
Pendientes	Raster	90 m	Generado a partir del DEM	<a href="http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/">http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/</a>
Orientaciones	Raster	90 m	Generado a partir del DEM	<a href="http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/">http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/</a>

Los datos fueron estandarizados de acuerdo a las especificaciones técnicas del área de estudio, es decir, una resolución espacial de 250 m, proyección cartográfica cónica

conforme de Lambert, y el mismo número de columnas y filas. Los datos se describen a continuación:

#### **4.1.1.1 Precipitación.**

La precipitación media anual se obtuvo del TerraClimate conjuntos de datos, que proporcionaron información climática derivada de los datos de WorldClim a una resolución de 4 km y expresado en unidades de milímetros (mm). Se encontraron valores mínimos y máximos de precipitación media anual de 43 y 1436 mm, respectivamente, para el área de estudio.

#### **4.1.1.2 Temperatura.**

El mapa de temperatura se obtuvo del conjunto de datos MOD11A2 del sensor MODIS, con una resolución espacial de 1 km y una resolución temporal de 8 días. Se generaron mapas de temperatura media mensual, y posteriormente temperatura media anual. La unidad de temperatura se convirtió de Kelvin a Celsius, y se aplicó un factor de escala de 0.02. La temperatura media anual del área de estudio varió entre 15.52 y 46.82 grados.

#### **4.1.1.3 NDVI.**

El mapa NDVI se obtuvo del conjunto de datos MOD13A1 del MODIS sensor con una resolución espacial y temporal de 500 m y 16 días, respectivamente. Este índice ha sido utilizado en todo el mundo debido a su eficiente y precisa estimación y monitoreo de la cubierta vegetal (Kumari et al., 2021; Pei et al., 2021). Este índice representa más saturación a mayores niveles de biomasa (Kumari et al., 2021); esto no afectó el análisis ni los resultados de esta investigación. Se generaron mapas de medias

mensuales y un mapa de NDVI medio anual. Se aplicó un factor de escala de 0.0001 para obtener valores entre -1 y 1.

#### **4.1.1.4 Evapotranspiración.**

El mapa de evapotranspiración media anual se obtuvo del conjunto de datos de TerraClimate, el cual se calculó utilizando el método Penman-Monteith (Abatzoglou et al., 2018) a una resolución de 4 km y en unidades de mm. Este mapa representa la pérdida de agua con respecto a los valores promedio normales de lluvia. Para el área de estudio, se obtuvo una evapotranspiración media anual que oscila entre 906 y 1922 mm.

#### **4.1.1.5 Humedad.**

El mapa de humedad media anual se obtuvo del conjunto de datos del sistema Land Data Assimilation (FLDAS). Este mapa representa la cantidad de agua que se encuentra en el suelo (McNally et al., 2017). Este dato cuenta con una resolución de 9.6 km y está expresado en unidades de mm. Para el estudio se encontraron valores mínimos y máximos de humedad de 8.9 y 40 mm, respectivamente.

#### **4.1.1.6 Pendiente.**

Esta capa temática se derivó de un modelo de elevación digital (DEM) obtenido de la Misión Topográfica de Radar del Transbordador (SRTM). La pendiente aquí representa la forma del relieve con una resolución de 90 metros utilizando el componente de análisis espacial de GIS. El área de estudio es casi plana, con un ángulo de inclinación máximo de aproximadamente 59°.

#### 4.1.1.7 Orientaciones.

El mapa de orientaciones se generó a partir del SRTM DEM, que representó cada píxel según el aspecto o la dirección de la pendiente (FAO, 2019b) en función de su orientación en grados (de -1 a 360) y se clasifica en 10 clases, es medido en el sentido de las agujas del reloj del norte. Así, un valor de 0 indica que la pendiente se dirige al norte, 90 indica este, 180 indica el sur y 270 indica el oeste; además, -1 indica un área plana con pendiente cero.

#### 4.1.2 Datos utilizados para el modelo de simulación geoespacial de zonas áridas

Para este estudio, se generó un mapa de regiones áridas tomando como año base el 2020, las variables utilizadas y la metodología se basó en la información utilizada en el modelo geoespacial de zonas áridas descrito en (Perez-Aguilar et al., 2021), la cual se realizó tomando en consideración una consulta a expertos y una revisión bibliográfica (Tabla 6). Así como también, los pesos de los factores ponderados utilizados en esta investigación se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Matriz de pesos de factores. Fuente (Perez-Aguilar et al., 2021). URL: <https://www.mdpi.com/2220-9964/10/11/720>

<b>Factor</b>	<b>Pesos</b>
Precipitación	0.28
Temperatura	0.22
Evapotranspiración	0.19
Humedad	0.13
NDVI	0.09
Pendientes	0.06
Orientaciones	0.03

Para generar el modelo geoespacial de tendencia a zonas áridas se tomaron en cuenta los datos históricos de precipitación mínima, temperatura máxima, evapotranspiración y humedad desde el año 1985 hasta 2020 con periodos de 5 años y para el dato de NDVI de acuerdo con la disponibilidad de la información, se tomó desde el año 2000 hasta 2020 con periodos de 3 años (Tabla 8). Así como también, para generar los diferentes indicadores se utilizó la información descrita en la tabla 9.

**Tabla 8.** Datos utilizados como referencia para generar el escenario de tendencia de zonas áridas.

Dato	Unidad	Tipo de dato	Resolución Temporal	Resolución Espacial	Fuente	Link
Precipitación Mínima	Milímetros	Raster	Mensual	4000 km	TerraClimate Dataset	<a href="https://app.climateengine.org/climateEngine">https://app.climateengine.org/climateEngine</a> (accessed on 16 March 2022).
Temperatura Máxima	°C	Raster	Mensual	4000 km	TerraClimate Dataset	<a href="https://app.climateengine.org/climateEngine">https://app.climateengine.org/climateEngine</a> (accessed on 16 March 2022).
Evapotranspiración	Milímetros	Raster	Mensual	4000 km	TerraClimate Dataset	<a href="https://app.climateengine.org/climateEngine">https://app.climateengine.org/climateEngine</a> (accessed on 16 March 2022).
Humedad	Milímetros	Raster	Mensual	4000 km	TerraClimate Dataset	<a href="https://app.climateengine.org/climateEngine">https://app.climateengine.org/climateEngine</a> (accessed on 16 March 2022).
NDVI	Adimensional	Raster	16 días	500 m	Modis Terranet	<a href="https://app.climateengine.org/climateEngine">https://app.climateengine.org/climateEngine</a> (accessed on 16 March 2022).

**Tabla 9.** Datos utilizados para generar indicadores cuantitativos y geospaciales de aridez.

<b>Dato</b>	<b>Tipo de dato</b>	<b>Año</b>	<b>Escala</b>	<b>Autor</b>	<b>Fuente</b>	<b>Enlace</b>
Regiones Hidrológicas Administrativa	Vector	2007	1:250,000	CONAGUA	CONABIO	<a href="http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/">http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/</a> (accessed on 25 May 2022).
División política estatal	Vector	2020	1:250,000	INEGI	CONABIO	<a href="http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/">http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/</a> (accessed on 25 May 2022).
División política municipal	Vector	2020	1:250,000	INEGI	CONABIO	<a href="http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/">http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/</a> (accessed on 25 May 2022).
Uso de Suelo y Vegetación, serie VII	Vector	2021	1:250,000	INEGI	CONABIO	<a href="http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/">http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/</a> (accessed on 25 May 2022).

#### **4.1.3 Descripción y Especificaciones técnicas de herramientas computacionales utilizadas.**

El sistema estático de zonas áridas se desarrolló principalmente en software SIG mismos que facilitaron el procesamiento e integración de los datos, así como también la obtención de los mapas de vulnerabilidad (QGIS, ArcGIS, Terrset). Por otro lado, el sistema dinámico fue desarrollado principalmente en el lenguaje de programación Python para el procesamiento interno, así como también en los lenguajes HTML y JavaScript para el Geoportal web. Se utilizaron algunas librerías SIG que facilitan el procesamiento de los datos, como lo son ArcPy, QGISPy y GDAL. Para la descarga de información se utilizó la librería Selenium y para realizar las conexiones con el servidor de base de datos PostgreSQL y el servidor de mapas GeoServer se utilizaron las librerías de uso libre Psycopg2 y Geoserver-rest, respectivamente (Tabla 10).

**Tabla 10.** Software, Lenguajes de programación, librerías y servidores utilizados para el monitoreo de zonas áridas.

Sistema estático	Sistema dinámico				
	Software	Descarga	Procesamiento	Servidores	Sistema
QGIS	Selenium	ArcPy	Psycopg2	Python	HTML
ARCGIS		PyQGIS	Geoserver-rest	Node.js	JavaScript
Terrset		GDAL		Redis	Bower
		Idrisi32			Bootstrap

#### 4.1.3.1 Softwares especializados en Sistemas de información Geográfica

Se analizaron algunos de los softwares especializados en Sistemas de Información Geográfica más utilizados y se decidió por Quantum GIS (QGIS), y ArcGIS para el procesamiento y corrección de los datos, ya que poseen características que incluyen una excelente interfaz gráfica de usuario, ofrecen buenas posibilidades de personalización al soportar lenguajes de programación como Python y presenta excelente potencial técnico (Sevtap Selcuk-Kestel et al., 2012; Steiniger & Hay, 2009), además ofrece funcionalidades como, etiquetado, edición, proyecciones, georreferenciación, soporte de GPS, análisis. Otra de las ventajas es que en los tiempos de ejecución de procesos se desempeñan satisfactoriamente al abrir y representar imágenes de gran tamaño según Chen et al. (2010) y en particular, QGIS posee soporte para servidores de mapas, también resulta ser un SIG que trabaja a la perfección con conexión a PostgreSQL de acuerdo con (Sillero & Tarroso, 2010). Por su parte, se utilizó también el software Terrset el cual ofrece un amplio abanico de herramientas para el trabajo con información espacial, así como para el tratamiento de imágenes de satélite, este software facilita la normalización de las variables, integración de los factores y clasificación de los mapas de vulnerabilidad.

#### **4.1.3.2 Lenguajes de Programación**

Los principales lenguajes de programación utilizados para desarrollar la herramienta web fué Python y JavaScript. Por un lado, Python es un lenguaje de programación que te permite trabajar rápidamente e integrar sistemas de forma más eficaz (Python, 2021) y el cual tiene soporte con los sistemas de información geográfica que se utilizaran para el procesamiento de los datos, es este lenguaje de programación el que permitirá realizar de manera interna el proceso automatizado para obtener zonas áridas. Por otro lado, JavaScript, es el lenguaje de programación encargado de dotar de mayor interactividad y dinamismo a las páginas web, además El código de programación multiplataforma JavaScript se ejecuta en los navegadores, ya sean de escritorio o móviles, ya sean Android o iPhone, por ellos es el principal lenguaje para la visualización, consulta y análisis de datos en el Geoportal web de zonas áridas.

#### **4.1.3.3 Servidor web, servidor de mapas y Bases de Datos**

El servidor web que se utilizó en este proyecto es Apache ya que por ser de código abierto es compatible con UNIX y Windows. El objetivo de este proyecto es proporcionar un servidor seguro, eficiente y extensible que proporcione servicios HTTP en sincronía con los estándares HTTP actuales (Apache, 2021).

Así mismo, el servidor de base de datos utilizado PostgreSQL, con su extensión espacial PostGIS, el cual es un sistema de base de datos relacional de objetos de código abierto caracterizado por su confiabilidad, solidez de funciones y rendimiento (PostgreSQL, 2021). Su amplia documentación lo hace fácil de instalar y utilizar, además el soporte que brinda para el manejo de gran cantidad de información lo hace ideal para el almacenamiento de los datos que se generan del procesamiento de información utilizada en este proyecto.

Por su parte, el servidor de mapas que se utiliza en este trabajo de investigación es GeoServer, ya que implementa protocolos OGC estándar, como Web Feature Service

(WFS), Web Map Service (WMS) y Web Coverage Service (WCS). Hay formatos y opciones de publicación adicionales disponibles como extensiones, incluido el Servicio de procesamiento web (WPS) y el Servicio de mosaicos de mapas web (WMTS) (GeoServer, 2021), además tiene una muy buena compatibilidad con PostgreSQL lo que hace una fácil de utilizar y configurar.

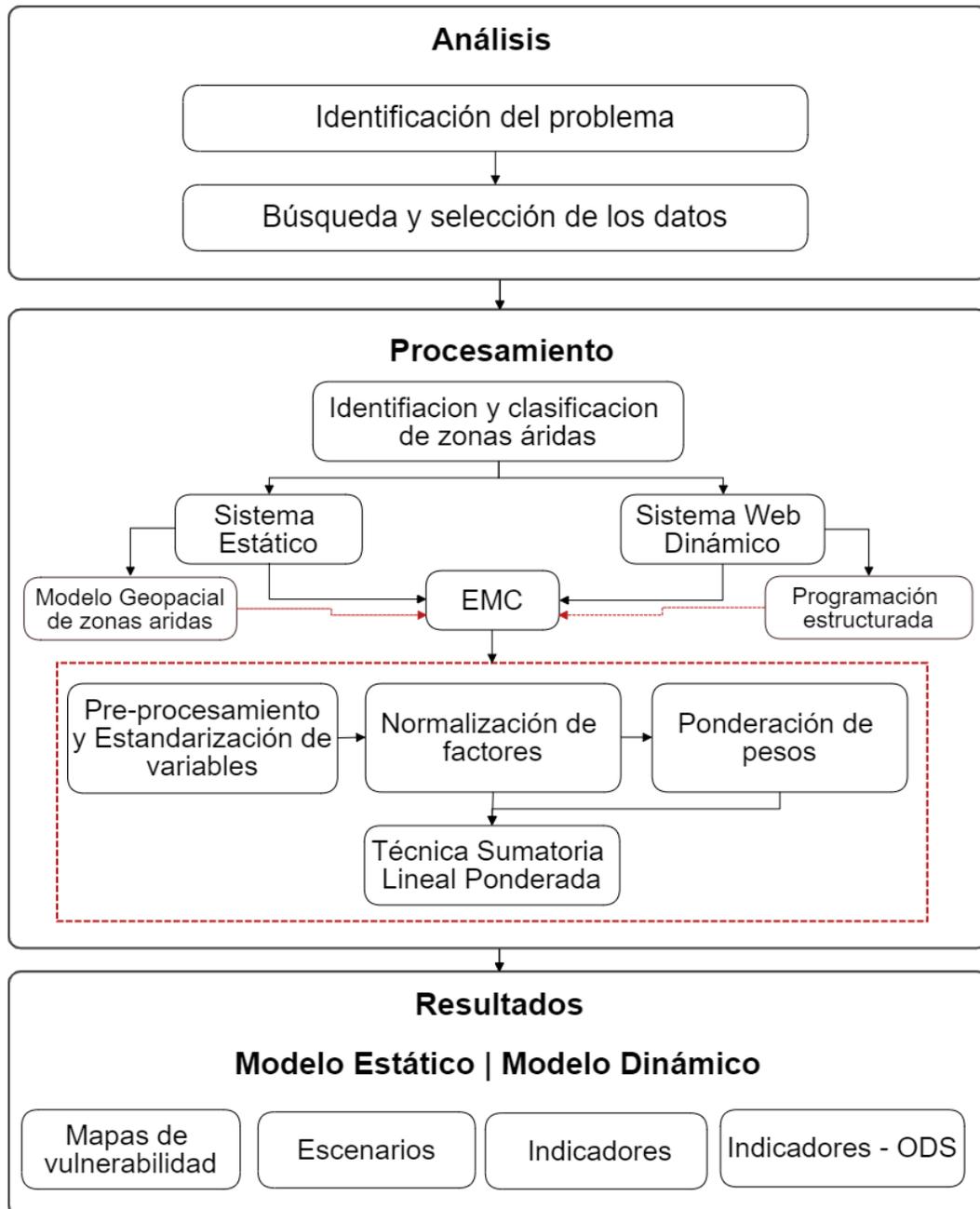
Finalmente, para la visualización de los datos en el Geoportal web se utilizó HTML y JavaScript, los cuales se complementan entre sí, al igual que con el servidor de mapas para la visualización de la información, además ofrecen posibilidades de publicar, registrar, ver, navegar, monitorear y otorgar acceso seguro a servicios de infraestructura de datos espaciales, proporcionar servicios estandarizados. Estas herramientas ayudaran fácilmente al usuario a buscar, recopilar, visualizar y analizar información geoespacial para el estudio y monitoreo de zonas áridas.

## **4.2 Metodologías**

La metodología general utilizada para identificar y clasificar zonas áridas en la región noroeste de México está compuesta por dos etapas a las que se le denominó: Etapa 1: Sistema estático y Etapa 2: Sistema dinámico web. Ambas etapas inician con la definición del problema, seguidamente, la búsqueda, selección y descarga de los datos, posteriormente, se realiza el procesamiento, en la cual la etapa 1 incluye un modelo geoespacial de zonas áridas, mientras que la etapa 2 se realiza mediante programación estructurada.

El procesamiento incluye la corrección y estandarización de los datos para así obtener las variables que intervienen en el proceso de aridez. Una vez obtenida las variables se aplica la técnica de evaluación multicriterio, en la cual se realiza una normalización de variables, posteriormente se lleva a cabo una ponderación de pesos, para finalmente aplicar la técnica sumatoria lineal ponderada, la cual consiste en sumar el resultado de multiplicar el valor de píxel individual de cada factor normalizado por el

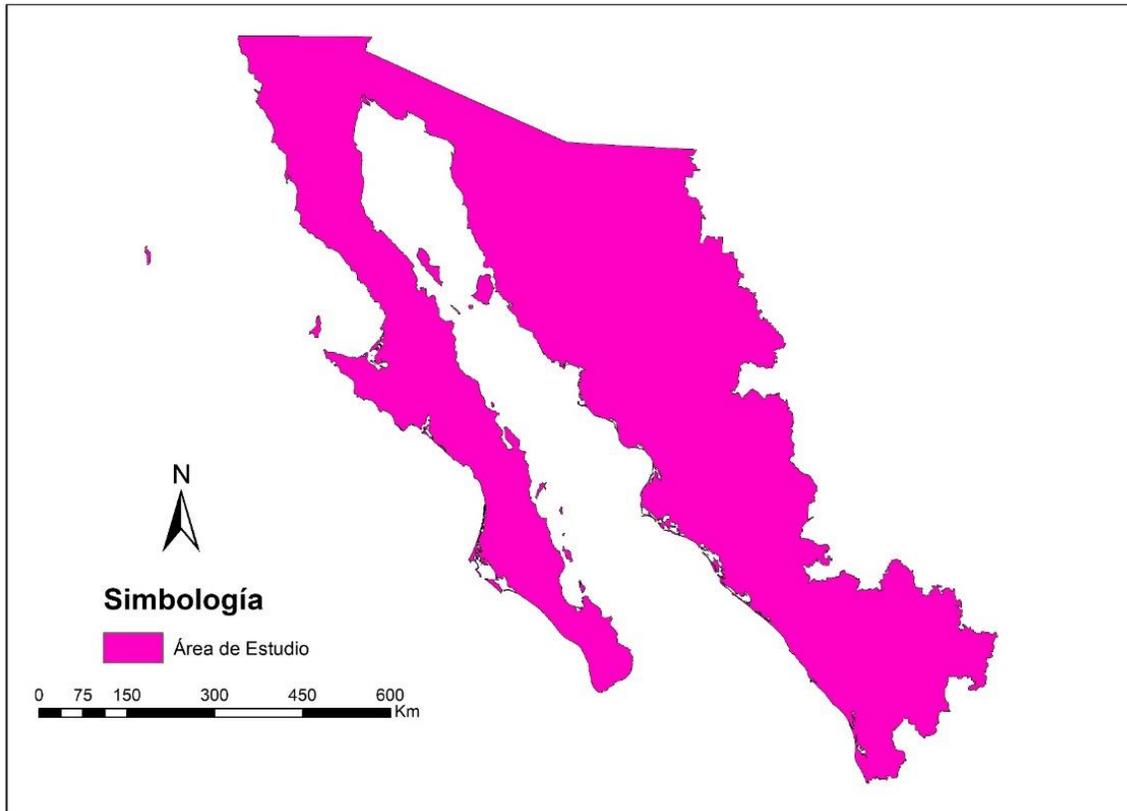
peso final asignado a ese mismo factor (Figura 10). De esta manera se obtiene el mapa de vulnerabilidad a aridez y algunos indicadores a nivel estatal.



**Figura 10.** Esquema metodológico general.

El pre-procesamiento de los datos, consistió, en primer lugar, adecuar los mapas de acuerdo al área de estudio, en el caso de temperatura, aplicar un factor escala y realizar la conversión de grados kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ) a grados centígrados ( $^{\circ}\text{C}$ ) y en el caso del NDVI solo aplicar el factor escala, así mismo generar los mapas de promedio mensual y promedio anual (temperatura y NDVI), posteriormente, corregir los errores a nivel pixel (es decir datos faltantes expresados como NoData), lo cual para resolverlo se calculó el valor de cada pixel mediante el índice de vecino más cercano basado en la distancia promedio desde cada pixel nulo hasta el pixel vecino más cercano, seguidamente se realizó una estandarización de acuerdo a las especificaciones técnicas del modelo y de la máscara de restricción del área de estudio (Figura 6), así como resolución espacial y proyección.

Para delimitar el área donde se incluirá el modelo de aridez se generó un mapa bit de restricción (valores 0 ó 1), el cual consideró como 0 no apto para ser evaluado. Debido a las diferentes proyecciones de coordenadas de los datos, las variables anuales fueron transformadas a la proyección cartográfica Lambert Conformal Conic, asimismo la resolución espacial de los datos se cambió a 250 metros; número de columnas: 5830; número de renglones: 5111 (Figura 11).



**Figura 11.** Máscara de restricción del área de estudio

#### **4.2.1 Metodología para el Sistema Geoespacial de zonas áridas**

La metodología desarrollada consiste en un modelo geoespacial basado en técnicas de evaluación multicriterio, la cual inició con la definición de las variables que intervienen en el proceso de aridez. Posteriormente, se realizó la descarga de los datos de las diferentes plataformas de uso libre, descritas en la sección Materiales y Métodos.

Una vez descargada la información necesaria, se llevó a cabo el procesamiento de los datos, que consistió en la estandarización de acuerdo a las especificaciones técnicas del modelo y de la máscara de restricción, tales como corrección, reproyección, resolución espacial y número de renglones y columnas y de esta manera se obtuvieron las variables.

Seguidamente, se llevó a cabo la normalización de las variables, aplicando para ello técnicas de lógica difusa, utilizando la función lineal de 0 – 1 bits; donde: 0 representa menor vulnerabilidad a aridez y 1 representa mayor vulnerabilidad a aridez.

Una vez obtenidos los factores normalizados, se estableció el nivel de importancia de los factores mediante la técnica de jerarquía analítica, en la cual, de acuerdo al nivel de importancia de los factores y basados en la escala de jerarquías de importancia de Saaty, se obtuvo el peso para cada uno de ellos.

Finalmente se utilizó la técnica sumatoria lineal ponderada para la integración de los factores, la cual consiste en sumar el resultado de multiplicar el valor década pixel por el peso ponderado, el resultado fue un mapa de vulnerabilidad a aridez, al cual se le aplicó la clasificación basada en el índice de aridez (IA) propuesto por la UNEP para obtener un mapa de zonas áridas que indican el nivel de aridez para la región de estudio (Figura 12).

## Etapas del modelo geoespacial de zonas áridas

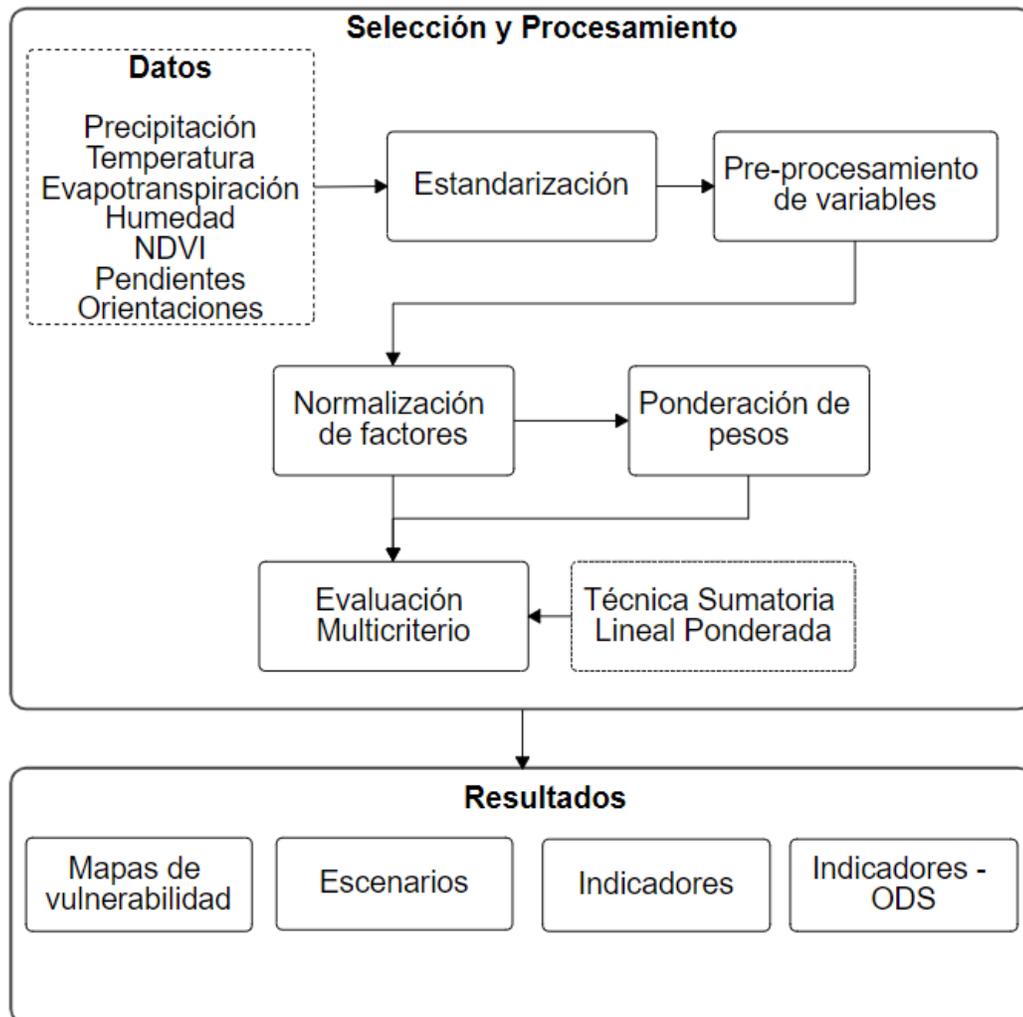


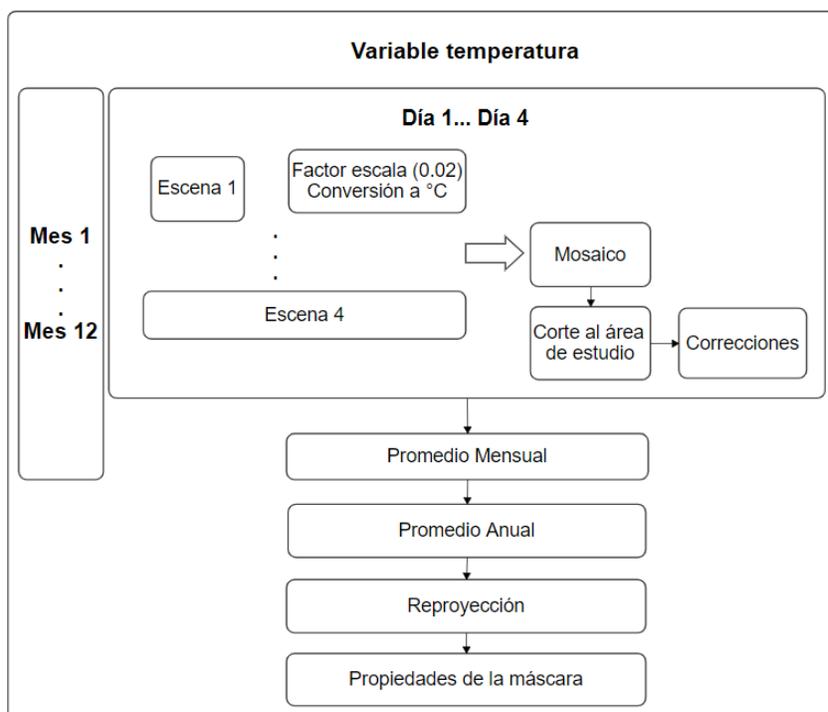
Figura 12. Esquema metodológico del sistema estático (modelo geoespacial de zonas áridas)

### 4.2.1.1 Procesamiento de las variables para el modelo geoespacial de zonas áridas

#### 4.2.1.1.1 Temperatura

El mapa de temperatura se obtuvo del conjunto de datos MOD11A2 del sensor MODIS, con una resolución espacial de 1 km y una resolución temporal de 8 días. Para obtener esta variable la unidad de temperatura se convirtió de grados Kelvin (°K) a grados

Celsius (°C) y se aplicó un factor de escala de 0,02. Seguidamente se realizó la adecuación al área de estudio, además, se aplicó una corrección para garantizar que no hubiese datos sin información, de esta manera se generaron los mapas de temperatura media mensual y posteriormente el mapa de temperatura media anual, seguidamente, se realizó la reproyección y se aplicaron las propiedades de la máscara de restricción (Figura 13).



**Figura 13.** Esquema para obtener el mapa de temperatura.

#### 4.2.1.1.2 Precipitación

La variable de precipitación media anual se obtuvo a partir del conjunto de datos de TerraClimate que proporcionan información climática derivada de los datos de WorldClim. Posee una resolución espacial de 4 km y es expresada en unidades de milímetros (mm). Una vez descargado el dato de precipitación, se realizó el procesamiento que incluyó: adecuación al área de estudio, correcciones para asegurar que no hubiese datos nulos, Reproyección y aplicación de las propiedades de la máscara de restricción (Figura 14).

#### **4.2.1.1.3 Evapotranspiración**

La variable evapotranspiración media anual se obtuvo del conjunto de datos de TerraClimate, el cual se calculó mediante el método de Penman Montieith, cuenta con una resolución de 4 km, y es expresada en mm, que representa la pérdida de agua con respecto a los valores promedio normales de lluvia. Una vez descargado el dato de precipitación, se realizó el procesamiento que incluyó: adecuación al área de estudio, correcciones para asegurar que no hubiese datos nulos, Reproyección y aplicación de las propiedades de la máscara de restricción (Figura 14).

#### **4.2.1.1.4 Humedad**

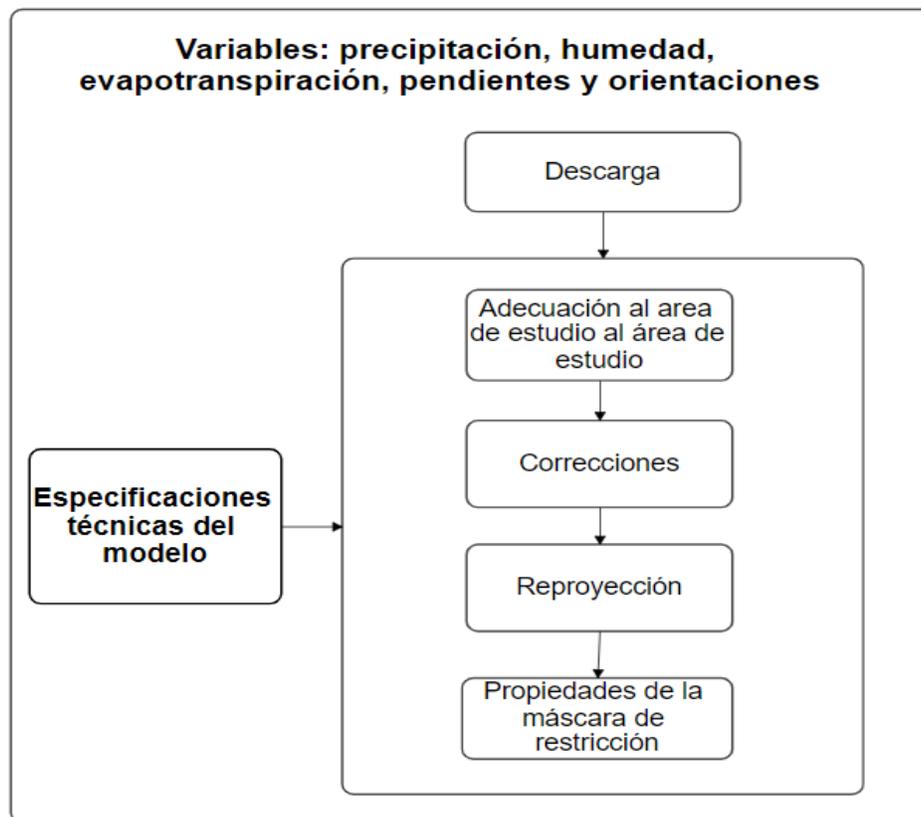
El mapa de humedad media anual se obtuvo del conjunto de datos Land Data Assimilation System (FLDAS) y que representa la cantidad de agua que se encuentra en el suelo. Este dato tiene una resolución de 9,6 km y está expresado en mm. Una vez descargado el dato de precipitación, se realizó el procesamiento que incluyó: adecuación al área de estudio, correcciones para asegurar que no hubiese datos nulos, reproyección y aplicación de las propiedades de la máscara de restricción (Figura 14).

#### **4.2.1.1.5 Pendientes**

Esta capa temática se derivó del modelo de elevación digital (DEM) obtenido de la Misión Topográfica de Radar del Transbordador (SRTM), que representa la forma del relieve, con una resolución de 90 metros utilizando el componente de análisis espacial de GIS. Una vez descargado el dato, se realizó el procesamiento que incluyó: adecuación al área de estudio, correcciones para asegurar que no hubiese datos nulos, reproyección y aplicación de las propiedades de la máscara de restricción (Figura 14).

#### 4.2.1.1.6 Orientaciones

El mapa de orientaciones se generó a partir del SRTM DEM, y representa cada píxel según el aspecto o la dirección de la pendiente, en función de su orientación en grados (de  $-1^\circ$  a  $360^\circ$ ), estas se miden en el sentido de las agujas del reloj desde el norte. Así, un valor de  $0^\circ$  indica que la pendiente se dirige hacia el norte,  $90^\circ$  este,  $180^\circ$  sur,  $270^\circ$  oeste y  $-1^\circ$  indica zonas planas cuya pendiente es 0. Para obtener la variable orientaciones, se realizó el procesamiento que incluyó: adecuación al área de estudio, correcciones para asegurar que no hubiese datos nulos, reproyección y aplicación de las propiedades de la máscara de restricción (Figura 14).

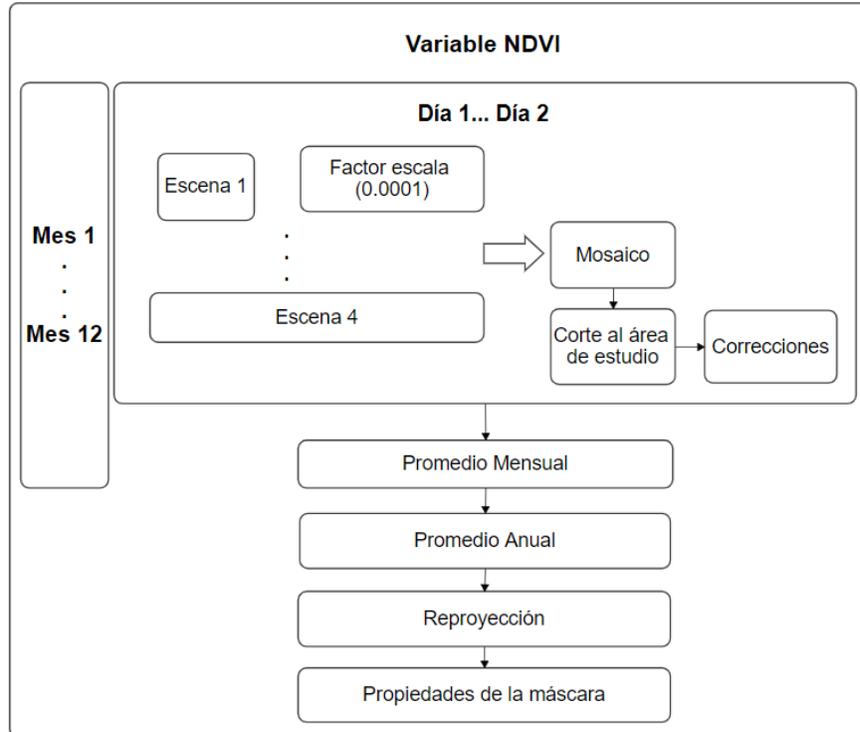


**Figura 14.** Esquema para obtener el mapa de precipitación, humedad, evapotranspiración y orientaciones.

#### 4.2.1.1.7 NDVI

El mapa NDVI se obtuvo del conjunto de datos MOD13A1 del sensor MODIS con una resolución espacial y temporal de 500 metros y 16 días respectivamente. Este índice se utiliza en todo el mundo debido a la estimación y el seguimiento eficientes y precisos de la cobertura vegetal y aunque este índice representa más saturación a niveles más altos de biomasa, no representa un inconveniente para su uso. Se aplicó un factor de escala de 0.0001 para obtener valores entre -1 y 1.

Seguidamente se realizó la adecuación al área de estudio, además, se aplicó una corrección para garantizar que no hubiese datos sin información, de esta manera se generaron los mapas de NDVI media mensual y posteriormente el mapa de NDVI media anual, seguidamente, se realizó la reproyección y se aplicaron las propiedades de la máscara de restricción (Figura 11) y de esta manera se obtuvo la variable NDVI para el año 2019 (Figura 15).

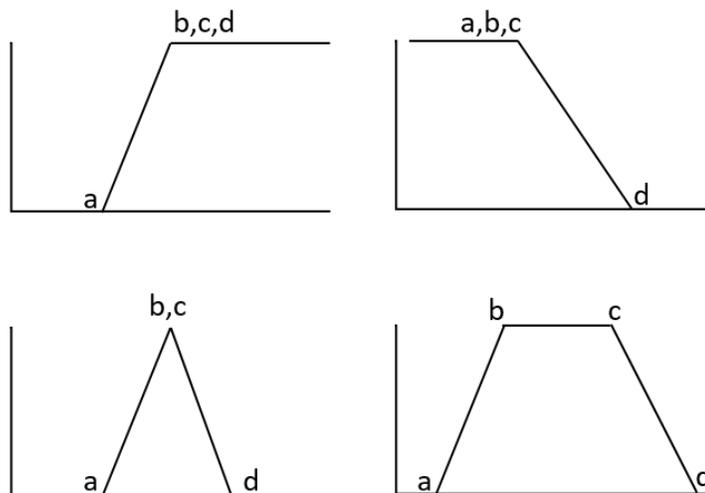


**Figura 15.** Esquema metodológico del sistema estático (modelo geoespacial de zonas áridas).

#### 4.2.1.2 Normalización de variables

Con el fin de obtener una homogenización de las variables, se aplicó una función de estandarización, en la cual, cada atributo se convirtió en una escala comparable, de esta manera, todos los parámetros obtuvieron valores que permitieron así su posterior agregación. Existen varios métodos de estandarización, tales como: deterministas, probabilísticos y métodos difusos (Quinton et al., 2010).

En esta investigación se utilizó el método de lógica difusa (Nabati et al., 2020;Kuncheva, 1996;Özkan et al., 2020) para obtener una homogenización entre las diferentes unidades de medida entre las variables, se realizó una normalización a una escala de 0-1 para generar factores finales. Para ello, se aplicaron funciones lineales crecientes y decrecientes (Figura 16), utilizando el procedimiento FUZZY del software Terrset, donde; 0 Representa menor vulnerabilidad a aridez y 1 representa mayor vulnerabilidad a aridez (Tabla 11).



**Figura 16.** Función difusa de tipo lineal.

**Tabla 11.** Tabla de factores normalizados.

<b>Factor</b>	<b>Valor Mínimo</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Función</b>	<b>Valor Mínimo Normalizado</b>	<b>Valor Máximo Normalizado</b>
Precipitación	45	1436	Lineal Decreciente	0	1
Temperatura	15.52	46.84	Lineal Creciente	0	1
NDVI	-0.12	0.86	Lineal Decreciente	0	1
Evapotranspiración	906.8	1922.1	Lineal Decreciente	0	1
Humedad	8.98	40.04	Lineal Decreciente	0	1
Pendientes	0	144.96	Lineal Creciente	0	1
Orientaciones	0	359.97	Lineal Creciente	0	1

#### **4.2.1.3 Evaluación Multicriterio**

La técnica de evaluación multicriterio (EMC) se basa en la ponderación y compensación de variables, ya sean determinantes o factores de aptitud. Este método permite obtener mapas que expresan la evolución potencial para cada categoría en el uso del suelo o sistemas productivos (Rivera et al., 2010). Además, evalúa cada factor dentro de los criterios establecidos, a partir de una valoración cuantitativa (valor de peso), permite, también, discriminar zonas incoherentes que presenten (restricciones) (López Beltrán et al., 2016).

Para aplicar esta técnica se utilizó el método de jerarquía analítica con el objetivo de determinar el nivel de importancia de los factores que intervienen en el proceso de aridez, donde, además, se obtuvieron los pesos mediante la ponderación de factores, y posteriormente, se empleó el método de sumatoria lineal ponderada para la integración de las variables con sus respectivos pesos. En el resultado de EMC, los valores más elevados (cercaos a 1) representan las zonas con mayor vulnerabilidad a presentar aridez, por el contrario, los valores más bajos (cercaos a 0) representan las zonas con menos vulnerabilidad a presentar esta condición.

#### 4.2.1.3.1 Evaluación de los pesos a través del Método de Jerarquía Analítica (AHP)

AHP Es una de las técnicas de análisis multicriterio, la cual tiene una aportación primordial para comparar y evaluar la importancia de idoneidad de los criterios. Este método respaldado con técnicas de análisis de decisiones multicriterio basadas en el Sistema de Información Geográfica es capaz de manejar múltiples factores (Kahsay et al., 2018).

Además, MJA es el método más utilizado para organizar factores en una estructura jerárquica (Saaty, 1977). Se seleccionaron y utilizaron factores ambientales y territoriales para identificar áreas vulnerables a la aridez. Los factores se clasificaron con base en la escala fundamental sugerida por Saaty (2008) con valores del 1 al 9 (Figura 6). El cual aplica una combinación por pares donde solo se consideran dos criterios a la vez y así establecer un nivel de importancia relativa entre cada factor (Criado et al., 2017; Monjardin-Armenta et al., 2020). MJA se puede expresar mediante (Ecuación (1)),

$$\sum_{j=1}^n s_i = 1 \quad (1)$$

donde  $s_i$  es la ponderación para cada criterio tomando el vector propio correspondiente al valor mayor de la matriz,  $n$  representa el número de índices, 1 es el resultado de la suma de los componentes a la unidad.

Se consultó opiniones de los expertos: 5 del laboratorio de Geomática de la Facultad de Ciencias de la Tierra y del Espacio, 3 académicos e investigadores de la Universidad Autónoma de Sinaloa, 3 de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), 3 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y 2 de la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA) y se utilizó revisión bibliográfica para determinar el nivel de importancia (Tabla 12) y también obtener el peso de los factores para la valoración de la aptitud para la aridez, de manera que la suma de los pesos fue igual a 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Extremadamente		Fuertemente		Moderado		Ligeramente		Igual	Ligeramente		Moderado		Fuertemente		Extremadamente	
<b>Menos Importante</b>								<b>Más Importante</b>								

**Figura 17.** Escala de jerarquías de importancia para la construcción de la matriz de comparación entre pares de factores o variables (Saaty, 1977)

**Tabla 12.** Nivel de importancia de los factores que intervienen en el proceso de aridez

Factor	Nivel de Importancia
Precipitación	9
Temperatura	7
NDVI	6
Evapotranspiración	4
Humedad	3
Pendientes	2
Orientaciones	1

#### 4.2.1.3.2 Método Sumatoria Lineal Ponderada

Durante las últimas décadas, se han propuesto métodos de evaluación multicriterio (EMC) para el análisis de idoneidad de la tierra basado en SIG. Entre estos, los EMC son los más comunes consisten en combinar un conjunto de mapas con criterios (zonas aptas para evaluar) y restricciones (zonas no aptas para evaluar) (Akbari et al., 2019).

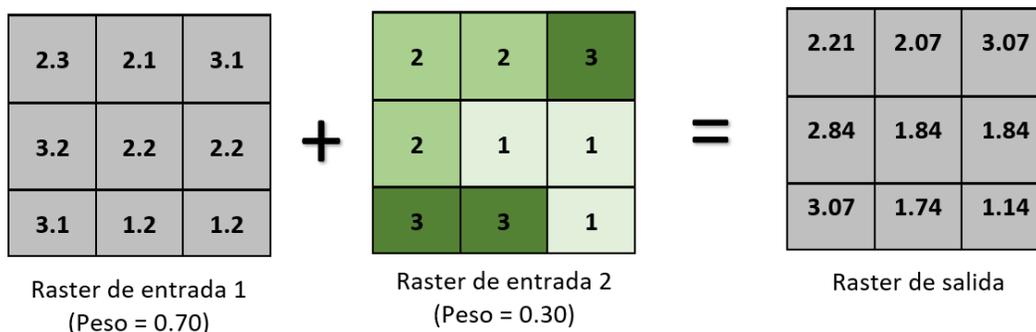
En esta investigación, una vez determinados los niveles de importancia de los criterios y obtenidos los pesos para los factores, se utilizó la técnica Sumatoria Lineal Ponderada (SLP) para identificar las regiones áridas.

Con este método se calcula la idoneidad de una región potencial mediante la fórmula (Ecuación (2)), consiste en sumar el resultado de multiplicar el valor de píxel individual de cada factor normalizado por el peso final asignado a ese mismo factor (Monjardin-Armenta et al., 2020; Aydi, 2018) (Figura 18).

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij} \quad (2)$$

Donde  $r_i$  es la variable ponderada definida como objetivo,  $w_j$  el peso del factor,  $v_{ij}$  es el valor ponderado de la alternativa  $i$  del factor  $j$ .

Finalmente, como resultado del proceso de SLP se generó un mapa el cual muestra la susceptibilidad de cada región a presentar algún grado de aridez.



**Figura 18.** Representación de la técnica sumatoria lineal ponderada

#### 4.2.1.4 Clasificación de los criterios

El mapa de vulnerabilidad a aridez obtenido se clasificó con base en el IA propuesto por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (Zarei & Mahmoudi, 2021; Fernandez et al., 2019), que define las regiones áridas en cinco clases como se muestra en la Tabla 13.

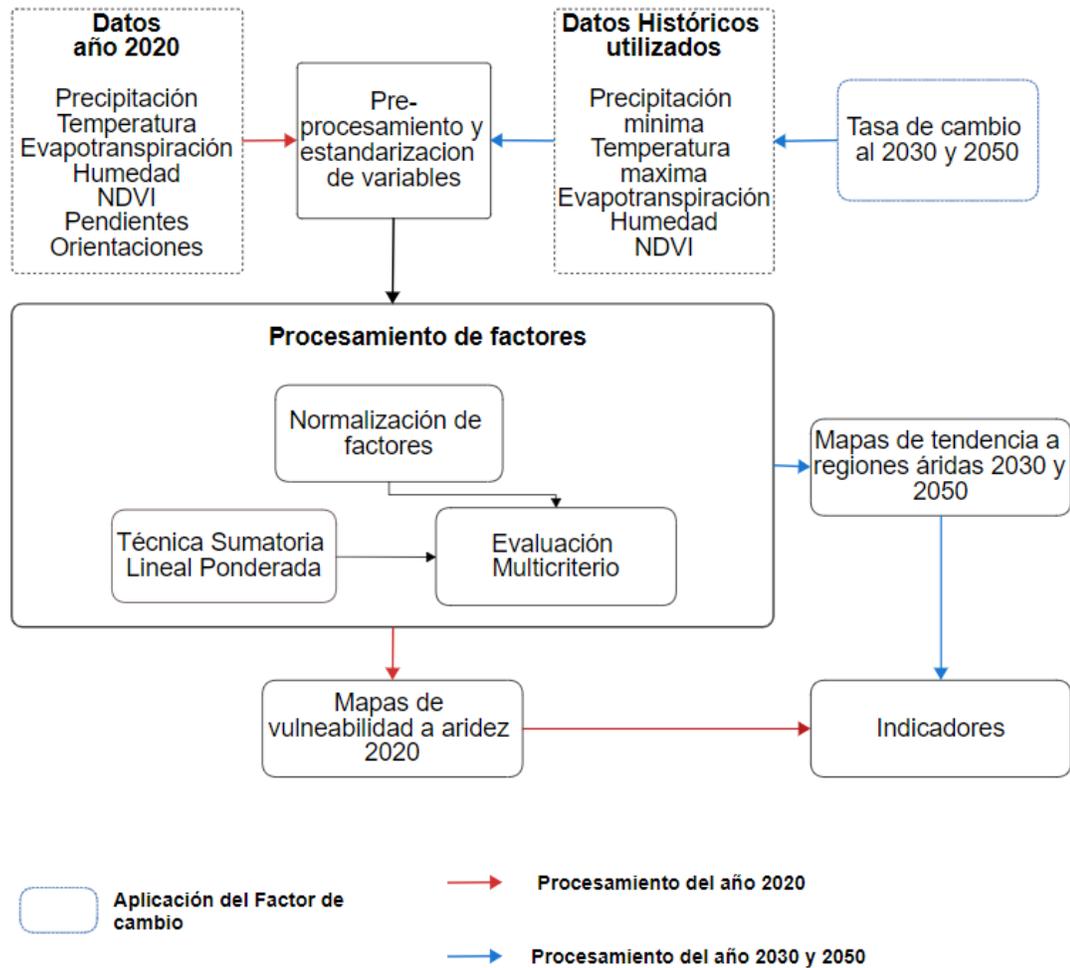
**Tabla 13.** Clasificación del Índice de Aridez del PNUMA

<b>Índice</b>	<b>Clima</b>
>0.65	Húmedo
0.65–0.5	Subhúmedo seco
0.5–0.2	Semiárido
0.2–0.05	Árido
<0.05	Hiperárido

#### **4.2.2 Metodología para el modelo de simulación geoespacial de zonas áridas**

La metodología utilizada para el modelo geoespacial de tendencia a aridez para los años 2030 y 2050 inició obteniendo mapas de vulnerabilidad a aridez para el año base 2020, basado en la metodología utilizada en (Perez-Aguilar et al., 2021). Inicialmente, se descargaron y estandarizaron los datos que intervienen en el proceso de aridez, seguidamente, se llevó a cabo una normalización de las variables y utilizando la ponderación de los factores (Tabla 12), se aplicó la técnica EMC con el método de WLC, y de esta forma se obtuvo el mapa de aridez, mismo que se reclasificó en las diferentes regiones áridas con base a la clarificación del IA de la UNEP.

Posteriormente, se realizó un análisis retrospectivo de datos históricos de los años 1985 al 2020 para los datos de precipitación mínima, temperatura máxima, evapotranspiración, humedad y NDVI. Se calculó la tasa promedio anual y la tasa promedio para los años 2030 y 2050. Después, se procesaron las variables, aplicando la tasa de cambio correspondiente, de esta manera se obtuvieron las nuevas variables para cada periodo de evaluación. Así mismo, se realizó la normalización de los factores y se aplicó la técnica EMC con el método de WLC. Los mapas resultantes se clasificaron de acuerdo IA de la UNEP para así obtener los mapas de tendencia a aridez al año 2030 y 2050 (Figura 19).



**Figura 19.** Esquema metodológico para el modelo geoespacial de tendencia a zonas áridas.

#### 4.2.2.1 Cálculo de tasas de cambio por periodo

Varios métodos se han utilizado para predecir y pronosticar los cambios de ciertos factores a través del tiempo (Maulud & Mohsin Abdulazeez, 2020)(James et al., 2021)(Christensen et al., 2022). El uso de series temporales de datos históricos ha sido de gran utilidad para simular y predecir cambios en cuestiones ambientales (Bagheri et al., 2019) (Dadhich et al., 2021) (Aburas et al., 2016).

El método de tendencia de Mann-Kendall (MK) es ampliamente utilizado (An et al., 2020) para examinar la tendencia de variación de una serie de datos con el tiempo,

maneja un rango de prueba muy amplio y los datos no necesitan seguir una distribución específica. (Wang et al., 2008)(Jiang et al., 2021)(Lin et al., 2020).

El presente estudio se basó en la prueba tendencia de Mann-Kendall para analizar series de tiempo de datos históricos de las variables con periodos de 5 años (precipitación mínima, temperatura máxima, evapotranspiración and humedad) y 3 años (NDVI) (Tabla 14), a partir de esa información, se obtuvo el promedio de cambio por periodo y posteriormente, la tasa de cambio por año, de esta manera se pudo obtener las tasas de cambio para los años 2030 y 2050. Para la serie de tiempo  $p_1, \dots, p_n$  se utilizó la ecuación (2):

$$Ta = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{(p_j - p_i)}{t}}{n} \quad (2)$$

Donde Ta es la tasa promedio anual obtenida,  $p_i$  es el periodo 1 y  $p_j$  el periodo 2 de la serie de tiempo, t es el número de años entre periodos y n es número de periodos total de la serie histórica de datos analizados.

**Tabla 14.** Datos históricos obtenidos para realizar el cálculo de la tasa de cambio años 1985-2020 y 2000-2020.

Dato	Año							
	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Precipitación Mínima (mm)	28	26	17	26	36	8	24	16
Temperatura Máxima (°C)	44.2	43.2	44.2	41.9	43.2	42.1	43.6	45
Evapotranspiración (mm)	1922. 7	1943.5	1949	1976.2	1964.5	1928.2	1905.5	1988.3
Humedad (mm)	181.2	150	75.5	88.8	100.6	107.4	146.6	155.4
<b>NDVI</b>	<b>2000</b>	<b>2003</b>	<b>2006</b>	<b>2009</b>	<b>2012</b>	<b>2015</b>	<b>2018</b>	<b>2020</b>
Mínimo	-0.984	-0.821	-0.829	-0.919	-0.863	-0.864	-0.831	-0.864
Máximo	0.898	0.874	0.884	0.886	0.871	0.889	0.880	0.878

#### 4.2.2.2 Estandarización de los factores

La estandarización de factores se refiere al proceso de determinar el nivel de importancia de cada criterio. Es una técnica muy utilizada de comparación por pares para calificar y estandarizar los valores (Azareh et al., 2019; Feizizadeh & Blaschke, 2013; Monjardin-Armenta et al., 2020; Zabihi et al., 2019). Se aplicó un conjunto difuso a las variables procesadas para los años 2030 y 2050 a una escala de 0 a 1 bytes para mostrar la vulnerabilidad a la aridez.

La Tabla 15 muestra los valores máximos y mínimos para cada factor y, además, la función utilizada. Una función lineal decreciente significa que los valores más bajos de la escala indican una mayor susceptibilidad a extremos de aridez. Por el contrario, una función lineal creciente significa que los valores más altos indican una menor posibilidad a aridez.

**Tabla 15.** Estandarización de los factores año 2030 y 2050.

Factor	Año 2030		Año 2050		Función	Valor Mínimo Normalizado	Valor Máximo Normalizado
	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Mínimo	Valor Máximo			
Precipitación	0	1426.57	0 Mínimo	1419.71	Lineal creciente	0	1
Temperatura	0.23	45.23	0.69	45.69	Lineal decreciente	0	1
NDVI	-0.804	0.862	-0.685	0.8426	Lineal creciente	0	1
Evapotranspiración	18.74	2021.54	56.23	2059.03	Lineal decreciente	0	1
Humedad	0.01	287.584	0	272.844	Lineal creciente	0	1
Pendientes	0	144.96	0	144.96	Lineal decreciente	0	1
Orientaciones	0	359.97	0	359.97	Lineal decreciente	0	1

#### **4.2.2.3 Combinación Lineal Ponderada de tendencia y clasificación de los criterios**

A partir de los factores normalizados para los años 2030 y 2050, se utilizó el método de WLC para generar el modelo geoespacial de tendencia a aridez al igual que para el modelo de zonas áridas 2020, el cual calculó la idoneidad de una región a presentar niveles de aridez, utilizando la ecuación 1. De esta manera se obtuvieron los mapas de vulnerabilidad a aridez para los años previstos. Una vez obtenidos los mapas de aridez, se utilizó la clasificación del IA de la UNEP (Tabla 13) para obtener los mapas de regiones áridas para los años 2030 y 2050.

#### **4.2.2.4 Indicadores cuantitativos y geoespaciales**

Para generar los diferentes indicadores cuantitativos y geoespaciales de zonas áridas, se aplicó el método de tabulación cruzada, también llamada matriz de confusión, matriz de transición o tabla de contingencia (R. G. Pontius & Cheuk, 2007a). Dicho método genera una matriz tabular en proporción del número total de píxeles, la cual compara la relación entre dos mapas que tienen diferentes categorías (R. G. J. Pontius, 2000), y que a su vez muestra el número de píxeles que corresponden a cada combinación de categorías de las dos imágenes que se comparan (R. G. Pontius & Cheuk, 2007b).

Los indicadores a nivel de RHA se obtuvieron con la combinación del mapa de zonas áridas para cada fecha generada y el mapa de regiones hidrológico administrativa, así mismo. Los indicadores a nivel estatal se obtuvieron combinando los mapas de zonas áridas y límite estatal. Por su parte, los indicadores a nivel municipal se obtuvieron utilizando los mapas de zonas áridas y el mapa de límite municipal y por último, los indicadores de uso de suelo se obtuvieron combinando los mapas de zonas áridas y el mapa de uso de suelo y vegetación (Tabla 9).

### 4.2.3 Metodología para SADEW

La segunda etapa del modelo de zonas áridas, consiste en el desarrollo de un sistema integral que realiza de manera automática todo el proceso que se lleva a cabo en el sistema estático, aplicando lenguajes de programación, librerías SIG, bases de datos y servidor de mapas, finalizando con una plataforma web la cual sirve como un sistema de apoyo a la toma de decisiones web, dicha plataforma da la opción de visualizar todos los mapas de regiones áridas por año consultado, así como también, las respectivas variables, indicadores e información adicional de interés.

Para la descarga de los datos se utilizó una librería de uso libre, la cual se programó para dirigirse a las plataformas y realizar la descarga de acuerdo a las especificaciones indicadas, tales como: sensor, dato, fecha, coordenadas y directorio en el cual se guardará el dato descargado.

Seguidamente, se llevó a cabo el pre-procesamiento y estandarización automático de los datos, utilizando para ello librerías SIG, el cual incluye: adecuación al área de estudio, en el caso del dato de temperatura requiere realizar una conversión de °K a °C y adecuarse al factor escala, en el caso del NDVI, requiere solo adecuarse al factor escala; corrección de datos, reproyección y aplicar las especificaciones técnicas del modelo de acuerdo a la máscara de restricción del área de estudio.

Posteriormente, se realizó la normalización de las variables, utilizando para ello librerías SIG, la cual utilizó la técnica de lógica difusa en un rango de 0 – 1 bits, para así obtener los factores estandarizados a una misma escala, teniendo en cuenta que 0 representa menos vulnerabilidad a aridez y 1 mayor vulnerabilidad a aridez. Así mismo, con esta misma librería se realizó la ponderación los factores, de esta manera se obtuvo el peso individual para cada factor.

Bajo la misma librería aplicada al proceso anterior, se utilizó la técnica de sumatoria lineal ponderada para integrar todos los factores y sus respectivos pesos, para así obtener el mapa de vulnerabilidad a aridez, seguidamente, se realizó la clasificación

del mapa resultante de acuerdo a la clasificación del IA de la UNEP, mismo que indica las regiones híper-áridas, áridas, semiáridas, subhúmedas secas y húmedas.

Así mismo, el paso siguiente es importar al gestor de base de datos, tanto los mapas de regiones áridas, así como también las variables generadas utilizando para ellos librerías de conexión entre el lenguaje de programación y el gestor de base de datos. Una vez ingresada la información, se realiza la conexión entre la base de datos y el servidor de mapas, en esta etapa ya se cuenta con los estilos tanto para el mapa de aridez como el de las variables, de esta forma solo se asignan los estilos correspondientes a cada mapa.

Finalmente, se diseñó una plataforma web basado en HTML y JavaScript para la visualización de los datos al que se le denominó “Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones Espacial Web”, la cual hace conexión con el servidor de mapas y visualiza la información del año que se desea consultar, en este caso, si el año deseado no existe en la base de datos, se realiza todo el procesamiento desde la descarga hasta la visualización. Además, se puede consultar indicadores, estadísticas e información adicional de interés (Figura 20).

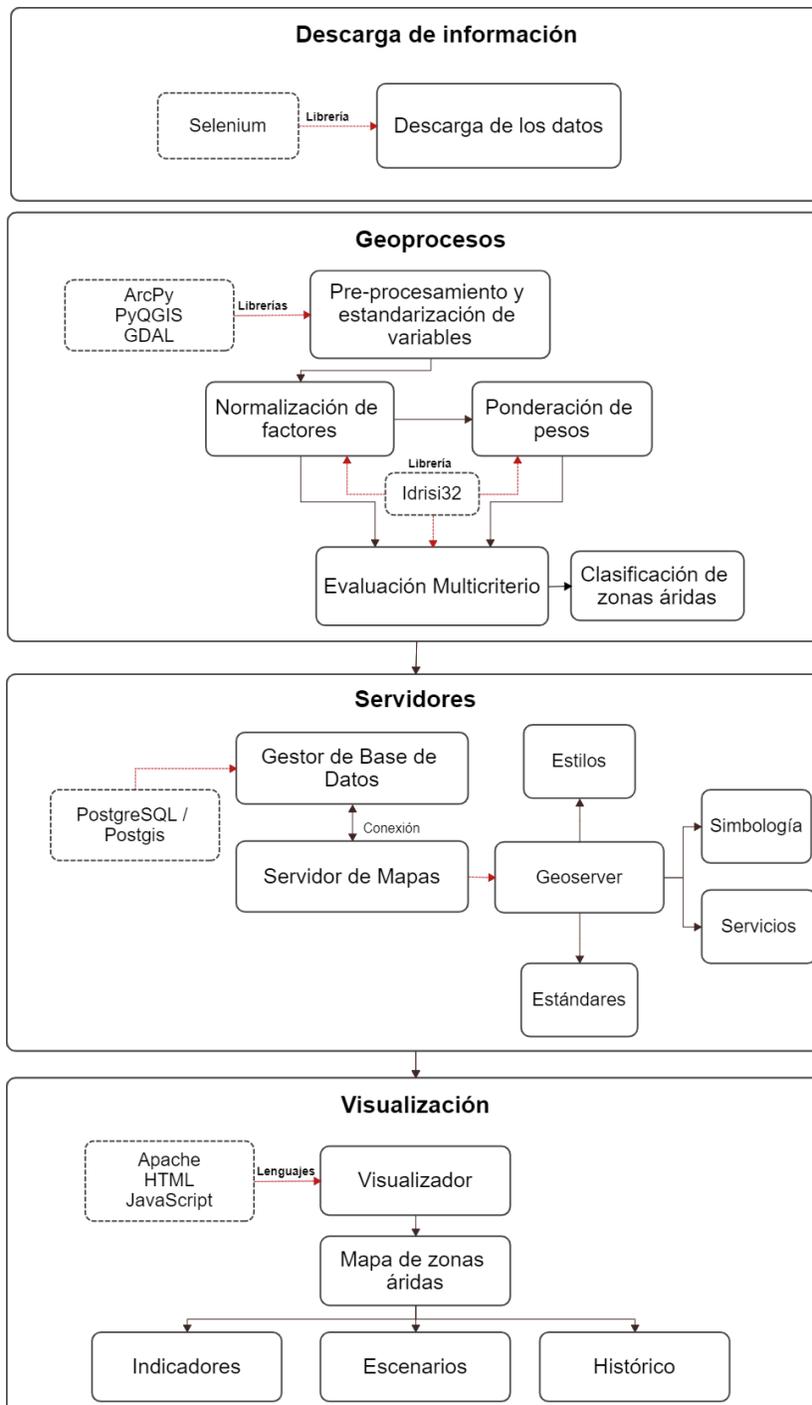


Figura 20. Esquema metodológico del sistema dinámico (Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones Espacial Web).

#### **4.2.3.1 Descarga de información geoespacial**

Para la descarga de información geoespacial requerida para el sistema dinámico web se desarrolló un algoritmo computacional en lenguaje de programación Python utilizando la librería Selenium, software de código abierto y de uso libre que puede descargarse desde la página oficial, y se maneja como un complemento de los navegadores el cual registra y reproduce las interacciones del usuario con el navegador web, y que permite crear scripts para procesos automatizados (Selenium, 2022).

De esta manera se entrenó al programa para acceder a las diferentes plataformas de descarga de información, especificándole todos los datos requeridos como: sensor, dato, fecha, coordenadas y directorio de descarga. A partir de este proceso, ya se cuenta con todos los datos organizados por fecha y por tipo de dato listos para su posterior procesamiento.

#### **4.2.3.2 Procesamiento de las variables**

##### **4.2.3.2.1 Temperatura y NDVI**

Para obtener el mapa de temperatura y NDVI media anual, se desarrolló un algoritmo computacional utilizando librerías SIG que básicamente realizan los mismos procesos; para el caso de temperatura se realiza una multiplicación de cada escena por el factor escala 0.02 y para NDVI de 0.0001, seguidamente, se realiza la conversión de °K a °C solo para temperatura, empleando para ello herramientas de la librería ArcPy (Anexos 1 y 2). Posteriormente y para las dos variables, mediante la misma librería ArcPy, se generó el código para realizar el mosaico de las escenas por día (Anexos 3), que en total son 4 días por mes en el caso de temperatura y 2 para NDVI, después se realiza el corte de acuerdo al área de estudio empleando para ello el mapa de máscara de restricción (Anexos 4).

Seguidamente, con la implementación de las librerías QGISPy y GDAL se aplican las correcciones descritas en la sección 3.3.1 (Anexos 5). Una vez aplicadas las correcciones, se genera el mapa de temperatura media mensual y temperatura media anual (Anexos 6 y 7) utilizando nuevamente ArcPy. Enseguida, se realiza la reproyección del mapa de acuerdo al sistema de referencia utilizado (Anexos 8). Y finalmente con la ayuda de QGISPy se aplican las propiedades de la máscara de restricción, mismas que son descritas en la sección 3.3.2 (Anexos 9).

#### **4.2.3.2.2 Precipitación, evapotranspiración, humedad, pendientes y orientaciones**

Las variables de precipitación, evapotranspiración, humedad, pendientes y orientaciones se obtienen de la misma manera, empleando los mismos procedimientos, librerías y herramientas, para ello se desarrolló un algoritmo computacional, el cual toma los datos del directorio donde se encuentran almacenados y se procede a realizar el corte de acuerdo al área de estudio empleando para ello la máscara de restricción (Anexos 3).

Seguidamente, con la implementación de las librerías QGISPy y GDAL se aplican las correcciones descritas en la sección 3.3.1 (Anexos 4). Una vez aplicadas las correcciones, se realiza la reproyección del mapa de acuerdo al sistema de referencia utilizado (Anexos 8). Y finalmente con la ayuda de QGISPy se aplican las propiedades de la máscara de restricción, mismas que son descritas en la sección 3.3.2 (Anexos 9).

#### **4.2.3.3 Normalización de variables**

Para realizar la homogenización de las variables, se desarrolló un algoritmo que incorpora las librerías Idrisi32, la cual realiza la conexión con los procesos de lógica difusa del software Terrset para lleva a cabo la función de estandarización, de esta

manera, todos los parámetros obtuvieron valores a una escala de 0 - 1 para generar factores finales, dicho procedimiento es descrito en la sección 3.3.3.2 (Anexos 10).

#### **4.2.3.4 Evaluación Multicriterio**

La técnica de evaluación multicriterio empleada se basa en el procedimiento que se realizó en el modelo estático de zonas áridas, para ello se utilizaron librerías SIG Idrisi32, lo que permitió la integración de las variables y sus respectivos pesos, para lograrlo, se desarrollaron algoritmos computacionales que se integran con el lenguaje principal de programación Python. De esta manera se obtuvieron los mapas de vulnerabilidad a aridez.

#### **4.2.3.5 Método Sumatoria Lineal Ponderada**

Esta parte del procedimiento del sistema de monitoreo de zonas áridas se llevó a cabo basándose en el método sumatoria lineal ponderada descrito en la metodología para el modelo geoespacial de zonas áridas estático, con la ayuda de las librerías Idrisi32, para ello fue necesario crear un archivo interno de configuración del software el cual incluye el orden de importancia de los factores, así como sus respectivos pesos, de esta forma, cuando se hace el llamado a esa función, toma dichos datos, además de requerir la máscara del área de estudio como restricción para realizar el procesamiento EMC y generar así los mapas de vulnerabilidad (Anexos 11).

#### **4.2.3.6 Clasificación de los criterios**

Continuando con los procesos automatizados del sistema dinámico de zonas áridas, el siguiente paso fue realizar una clasificación automatizada de regiones áridas, para ello, se requirió desarrollar un script, mismo que utiliza las librerías mencionadas en la sección anterior (Anexos 12), de tal manera y dado que el mapa de vulnerabilidad a

aridez obtenido se encuentra con valores de 0 – 1, fue necesario aplicar una clasificación adecuada de zonas áridas, y debido a que no existe una clasificación basada en EMC, esta se realizó con base al IA propuesto por la UNEP.

#### **4.2.3.7 Conexión con la base de datos**

Una vez obtenidos los mapas de vulnerabilidad, fue necesario desarrollar un algoritmo computacional para realizar la conexión con la base de datos (Anexos 13) y de esta forma incorporar la información generada para su posterior adecuación y visualización, para ello se necesitó utilizar las librerías Psycopg2 el cual es un adaptador de base de datos PostgreSQL para el lenguaje de programación Python. Sus principales características son la implementación completa de la especificación Python DB API 2.0 y la seguridad de subprocessos (PyPI, 2022). Lo que hizo más fácil realizar esta tarea.

#### **4.2.3.8 Conexión con el servidor de mapas**

Una vez incorporada la base de datos, lo siguiente fue realizar la conexión entre el manejador de base de datos y el servidor de mapas. Para ello se implementó un algoritmo computacional que incorpora las librerías Geoserver-rest, y a la vez, se configuró todo lo necesario para la correcta visualización de los datos en el geoportal web, tales como: coordenadas, proyección cartográfica, estilos, etc. De tal manera que todo se haga de manera automática y dinámica (Anexos 14).

#### **4.2.3.9 Visualización al geoportal SADEW**

Para la correcta visualización de los datos en el portal web, se desarrolló el código que combina programación en JavaScript, HTML y Python (Anexos 15), el cual contiene todo lo necesario para que los mapas generados de manera dinámica y automática se visualicen de manera correcta, cada vez que se solicita un procesamiento nuevo, el

geoportal se actualiza y adecua para mostrar la información solicitada. Esta implementación también requirió la instalación y configuración de algunos componentes y servidores adicionales para la visualización de datos en la web como lo son: Apache, Node.js, Redis, Bower, Bootstrap, entre otros.

#### **4.2.3.10 Búsqueda de zonas áridas por año**

Para realizar la funcionalidad de búsqueda de mapas de regiones áridas por año y así mismo visualizar las respectivas variables que se requirieron para el procesamiento, se implementó un código computacional que permite reconocer el año que se está solicitando para buscar en la base de datos si existe y mostrarlo, en caso de no existir dicha información, procede a la descarga de las variables necesarias, seguidamente realiza todo el procesamiento necesario para la visualización. Una vez terminado el proceso, se requiere actualizar el portal para identificar la información solicitada en la tabla de contenido (Anexos 16).

#### **4.2.3.11 Mapas de tendencia a aridez**

Otra de las funcionalidades de SADEW, es la posibilidad de generar mapas de tendencia a aridez, para ello, se desarrolló un código que permite elegir desde el portal web el año que se desea visualizar tendencia a aridez, esto se logró basándose en la metodología y datos del modelo geoespacial de tendencia a aridez descrito en la sección 4.2.2, y llevado a la práctica de manera automatizada. Una vez realizada la consulta por año, se verifica si existe en la base de datos para mostrarla, de no ser así, se genera a partir el año base 2020, empleando las tasas de cambio descritas en dicha metodología, y procesando las variables del año 2020, y siguiendo el proceso de evaluación multicriterio, reclasificación, incorporación a la base de datos y al servidor de mapas. Una vez generados los mapas de tendencia, se muestran en el portal (Anexos 17).

#### **4.2.3.12 Indicadores cuantitativos de aridez**

Para complementar la información geoespacial que se muestra en el geoportal web de zonas áridas, se generaron diferentes indicadores de aridez, a nivel general, a nivel de región hidrológico administrativo (RHA), estatal, municipal y de uso de suelo, los cuales muestran las superficies por cada categoría de aridez. Para obtener los indicadores de aridez a nivel RHA se realiza una combinación entre el mapa de regiones hidrológico administrativa y el mapa de zonas áridas del año que se desea consultar.

Para obtener los indicadores a nivel estatal, se utiliza el mapa de limite estatal y el mapa de zonas áridas. En el caso de los indicadores a nivel municipal, se utiliza el mapa de límites municipales con el de zonas áridas y los indicadores de uso de suelo se toma el mapa de uso de suelo y vegetación de la serie 7 en conjunto con el mapa de zonas áridas. Dichos mapas se encuentran en el directorio raíz del proyecto.

Para el procesamiento para todos los indicadores mencionados utilizan las librerías SIG Idrisi32, la cual genera primeramente una tabla con las superficies a nivel pixel por cada categoría de aridez, una vez generada dicha información, se extrae por medio de código Python y HTML, se realiza una conversión a km<sup>2</sup> para ordenarlo y generar un archivo en pdf y a su vez mostrar los mapas que representan dichos indicadores (Anexos 18 y 19).

## Capítulo V. Resultados

### 5.1 Resultados del Sistema de Geoespacial de zonas áridas

Las variables utilizadas para el modelo geoespacial de aridez, se obtuvieron después de un procesamiento, adecuación al área de estudio y estandarización en una misma proyección cartográfica y resolución espacial (Figura 21).

En el mapa de precipitación del año 2020, los estados que registraron precipitaciones bajas son Baja California, Baja California Sur y la zona noroeste de Sonora, por lo que la escasez de precipitaciones da origen a las sequías afectando los ecosistemas, fomentando así el proceso de desertificación, así mismo las regiones que tuvieron mayor precipitación en ese año fueron la zona serrana de Sinaloa y norte de Nayarit (Figura 21a).

El mapa de temperatura media anual muestra que existen altas temperaturas en las zonas de escasa vegetación, acentuándose más en el desierto de Sonora, Baja California y Baja California Sur. Asimismo, se observa que esta va disminuyendo desde las zonas costeras en Sinaloa hacia las zonas serranas, siendo éstas las que registran menores temperaturas, principalmente, en la zona suroeste de Chihuahua y Durango. La temperatura máxima anual en el año 2020 fue de 46.8°C, los estados cercanos a estos valores son Sonora y Baja California (Figura 21b).

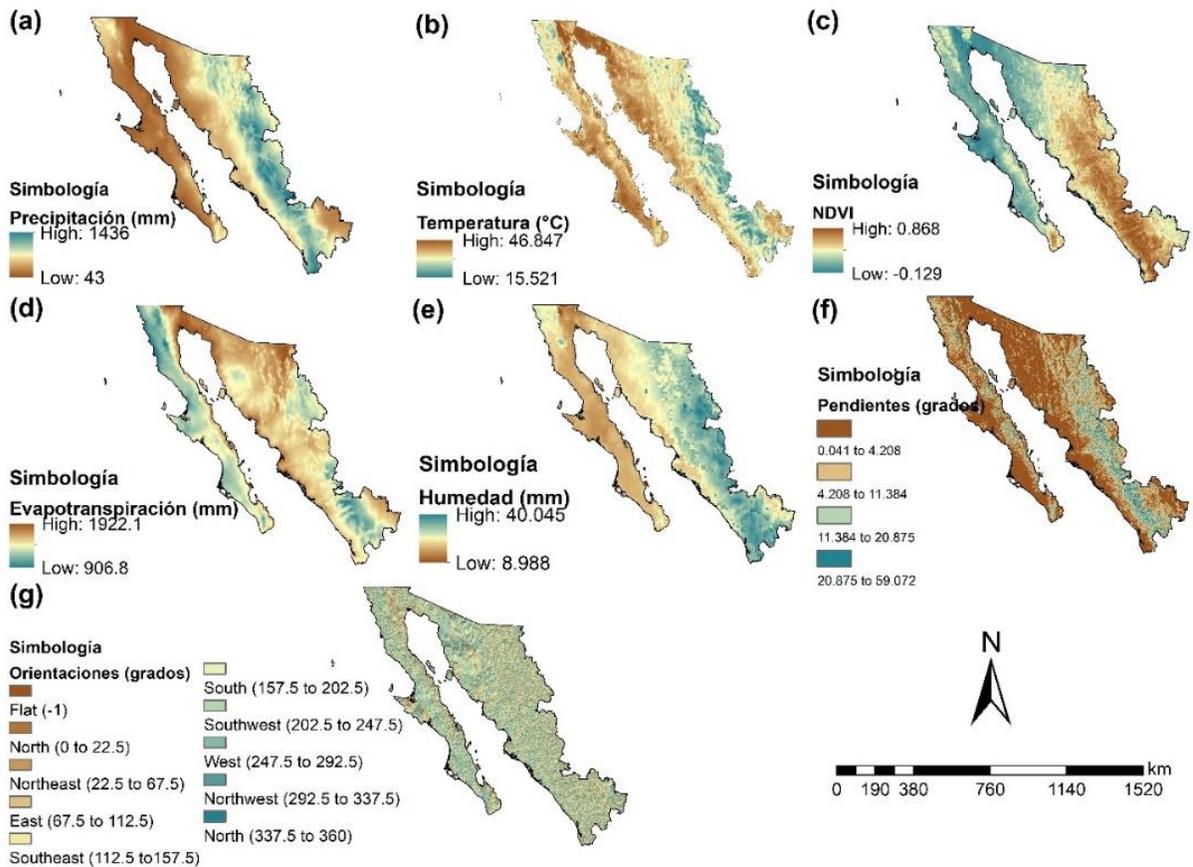
En el mapa de NDVI los rangos oscilaron entre -0.12 a 0.86, donde se puede observar menor cobertura de vegetación en la región noreste de Sonora y Baja California Sur, así como también en la zona centro – sur de Baja California, contrario a esto, se observa mayor vegetación en la parte serrana de Sinaloa entre los límites de Sinaloa con Durango y Chihuahua, sin dejar de lado la zona que le corresponde a Nayarit (Figura 21c).

En el mapa de evapotranspiración para nuestro año base, se observa que hay una pérdida de humedad en la región noreste de Sonora, así como también en prácticamente todo el estado de Baja California y Baja California Sur, teniendo rangos

que van desde los 906 a los 1922 mm, lo que puede significar que las altas temperaturas en estas zonas y las bajas precipitaciones originan ésta pérdida de humedad (Figura 21d).

En el mapa de humedad de suelo, presenta mayor concentración de humedad en el año 2019 entre los límites de Sinaloa y Sonora y al norte de Nayarit con alrededor de los 40 mm, por lo que estas zonas muestran suelos con vegetación. Mientras que las zonas más secas se registran en el Estado de Sonora, Baja California y la mayor parte del estado de Baja California Sur con alrededor de los 9 mm, por lo que, la escasez de agua indica zonas donde la radiación del sol es directa sobre el suelo (Figura 21e).

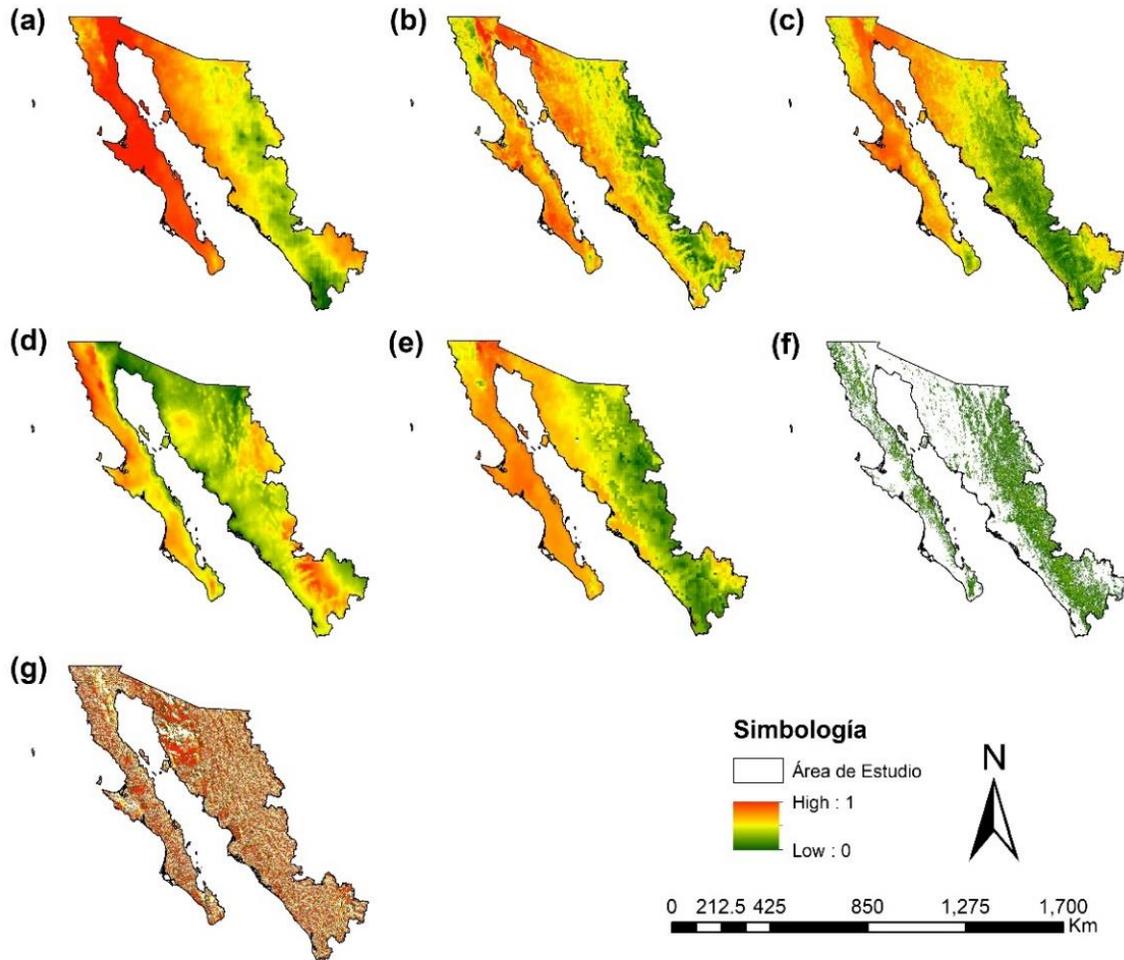
Por su parte, los mapas de pendientes y orientaciones indican que las regiones con menor humedad y mayor temperatura presentan menores pendientes que van desde los 0 a los 11 grados (Figura 21f), mismas que se encuentran al norte, sur, noroeste y suroeste de la región de estudio (Figura 21g).



**Figura 21.** Variables utilizadas para el modelo de zonas áridas año 2020. Simbología: a) Precipitación, b) Temperatura, c) NDVI, d) Evapotranspiración, e) Humedad, f) Pendientes, g) Orientaciones.

### 5.1.1 Factores normalizados

Una vez procesado los datos y obtenidas las variables se realizó la normalización de las mismas, empleando el método de lógica difusa, como resultado, se obtuvieron los factores normalizados a una escala de 0 a 1 byte (Figura 22).



**Figura 22.** Factores obtenidos como resultado de la normalización año 2020. Leyenda: a) Precipitación, b) Temperatura, c) NDVI, d) Evapotranspiración, e) Humedad, f) Pendientes, g) Orientaciones.

### 5.1.2 Ponderación de pesos

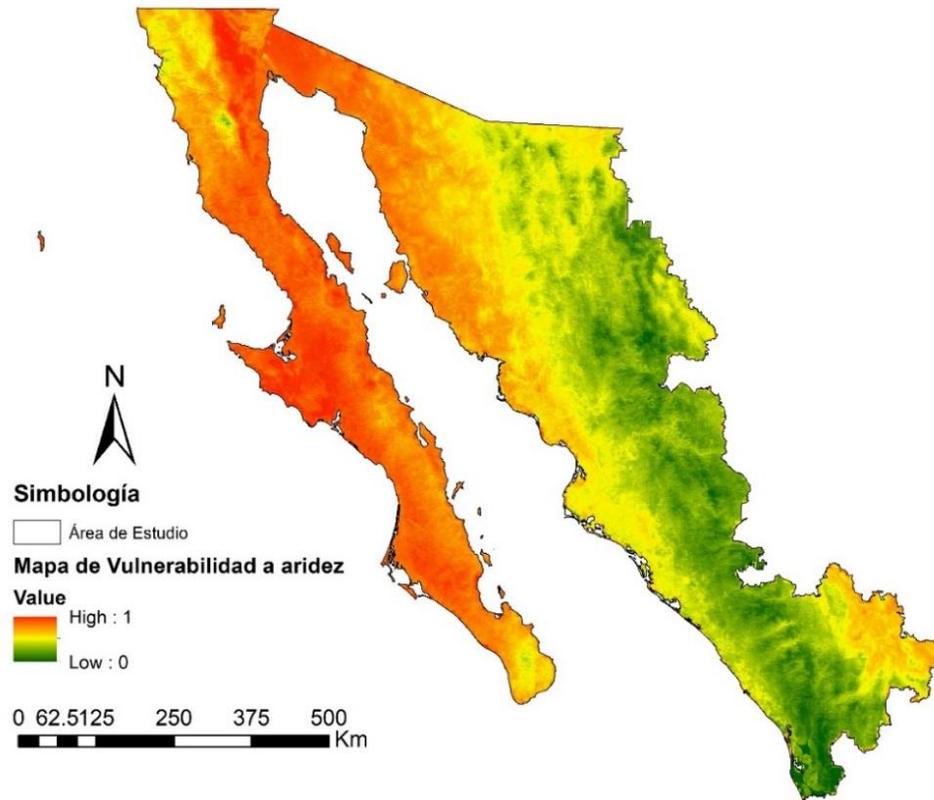
Los resultados de la ponderación de factores de acuerdo al nivel de importancia mediante opiniones de expertos y consulta bibliográfica, se obtuvo la matriz con los pesos para cada factor, la cual se muestra en la tabla 16.

**Tabla 16:** Matriz de los pesos generados para cada factor

Factor	Orientación	Pendiente	Humedad	Evapotranspiración	NDVI	Temperatura	Precipitación	Peso
Orientación	1							0.03
Pendiente	2	1						0.06
Humedad	3	1.5	1					0.09
Evapotranspiración	4	2	1.33	1				0.13
NDVI	6	3	2.00	1.5	1			0.19
Temperatura	7	3.5	2.33	1.75	1.17	1		0.22
Precipitación	9	4.5	3.00	2.25	1.5	1.286	1	0.28

### 5.1.3 Sumatoria lineal ponderada

Mediante esta técnica se evaluó a cada factor que intervienen en el proceso de aridez, dentro de los criterios establecidos, el cual utilizó como datos de entrada cada uno de los factores con sus respectivos pesos. En el resultado de EMC para zonas áridas (Figura 23), los valores más elevados representan las zonas con mayor vulnerabilidad a desarrollar condiciones de aridez.



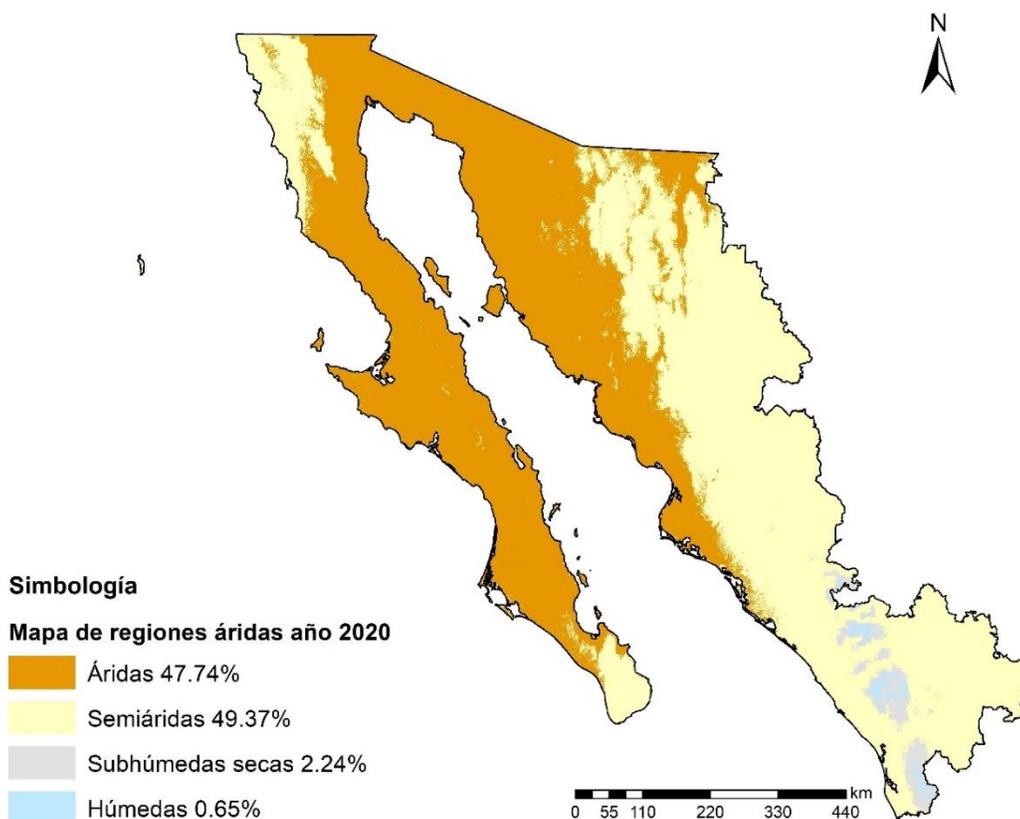
**Figura 23.** Mapa de vulnerabilidad a aridez

#### 5.1.4 Mapa de regiones áridas

Finalmente, para obtener el mapa de vulnerabilidad a aridez, se realizó una clasificación del mapa de aridez, quedando en 4 categorías de acuerdo con la distribución de las tierras secas de México (SEMARNAT, 2014) (Figura 24), las cuales se definen en zonas áridas, semiáridas, subhúmedas secas, y húmedas. En este mapa de regiones áridas se puede observar que la RHA Península de Baja California es la que observa mayor grado de aridez, así como gran parte de la RHA Noroeste, mientras que la RHA Pacífico Norte se puede observar que representa zonas semiáridas y subhúmedas.

A partir de la clasificación de las regiones áridas empleada, se generó el mapa de vulnerabilidad a aridez para el año 2020 (Figura 24). Los indicadores muestran que en

la región de estudio predominan las regiones áridas y semiáridas con más del 90% de la superficie, mientras que las regiones subhúmedas secas y húmedas cubren aproximadamente el 3% (Tabla 17).



**Figura 24.** Mapa de vulnerabilidad a aridez año 2020.

**Tabla 17.** Superficie en km<sup>2</sup> y porcentajes de regiones áridas por RHA.

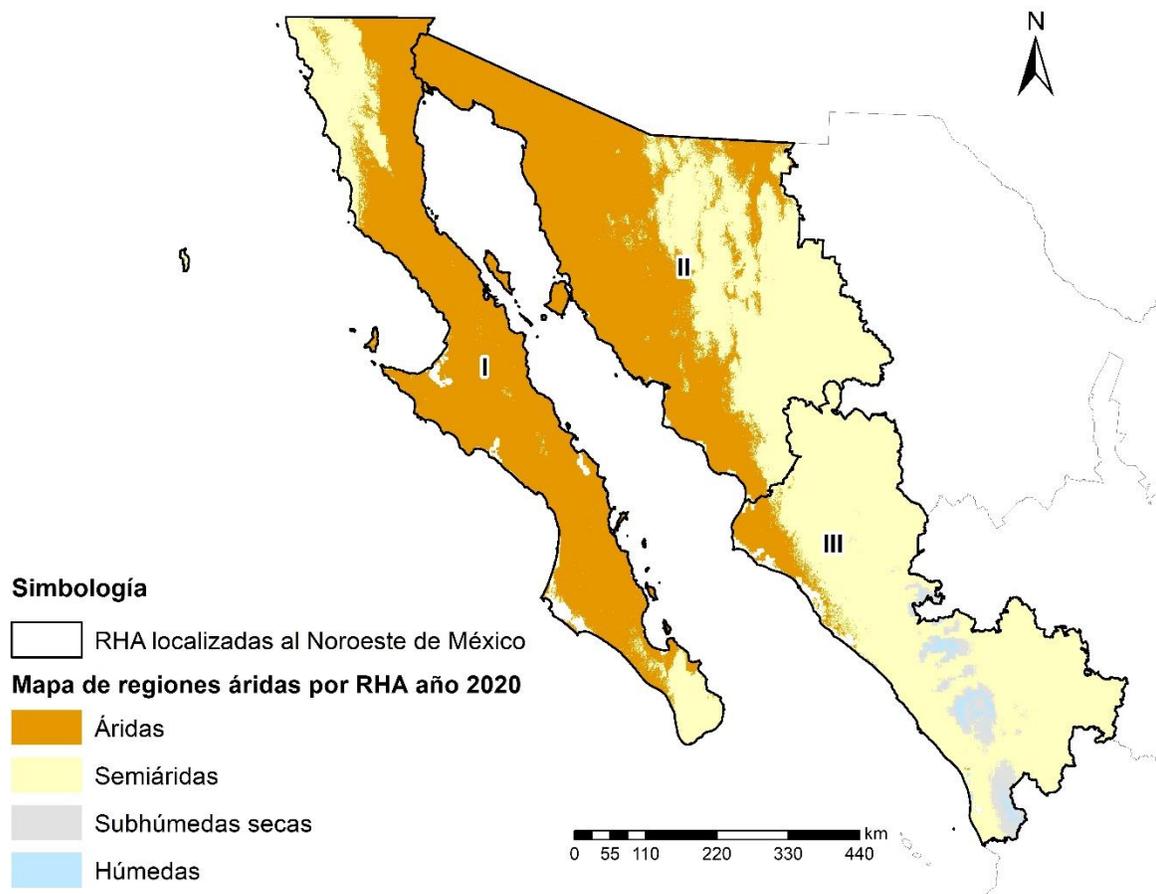
Categoría	Año 2020	
	km <sup>2</sup>	%
Árido	238290.25	47.74
Semiárido	246389.31	49.37
Subhúmedo – seco	11160.56	2.24
Húmedo	3254.81	0.65

## **5.1.5 Indicadores cuantitativos y geospaciales de aridez 2020**

### **5.1.5.1 Indicadores a nivel RHA**

También se obtuvo el mapa de regiones áridas por RHA, en el cual se puede observar que en las regiones I y II predominan las zonas áridas y semiáridas (Figura 25). A nivel RHA, en la región I sobresalen las regiones áridas con 111,729.19 km<sup>2</sup> (77.39% de la superficie total de la región), mientras que las semiáridas cubren el 32,575.69 km<sup>2</sup> (22.56%), así mismo, las regiones subhúmedas secas representan tan solo menos del 1%, en esta región no se observan zonas húmedas (Tabla 19).

Igualmente, en la región II, sobresalen las zonas áridas con 117,571.06 km<sup>2</sup> (57.03%), mientras que las semiáridas 88,390.69 km<sup>2</sup> (42.58%), en esta región se observa menos del 1% entre las zonas subhúmedas secas y húmedas. Por su parte, en la región III representa mayor superficie de zonas semiáridas con 125,422.94 km<sup>2</sup> (84.42%), mientras que las regiones áridas representan 8,990.00 km<sup>2</sup> (6%), en esta región se aprecia mayor superficie de regiones subhúmedas secas y húmedas con alrededor del 10% entre ambas categorías (Tabla 18).



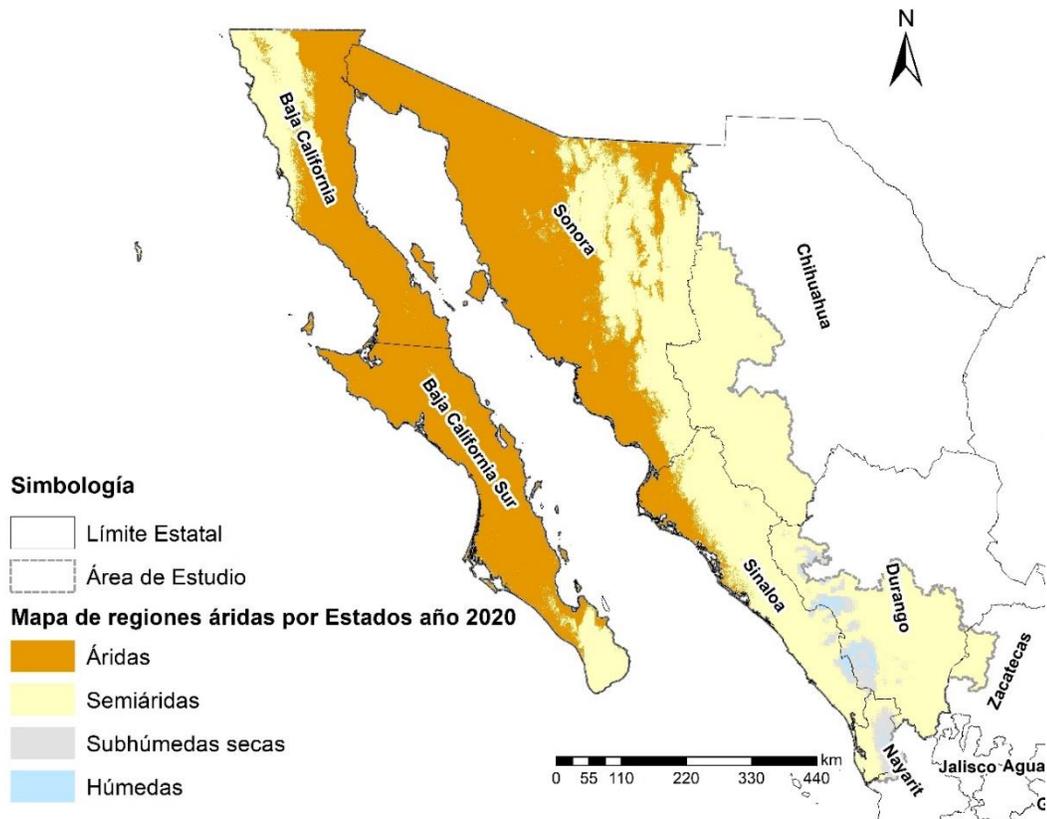
**Figura 25.** Mapa de regiones áridas por RHA año 2020.

**Tabla 18.** Superficie en km<sup>2</sup> y porcentajes de regiones áridas por RHA.

Superficie de regiones áridas por RHA para el año 2020								
RHA	Áridas		Semiáridas		Subhúmedas - secas		Húmedas	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
I	111,729.19	77.39	32,575.69	22.56	61.13	0.04	0	0.00
II	117,571.06	57.03	88,390.69	42.87	183.19	0.09	19	0.01
III	8,990.00	6.05	125,422.94	84.42	10,916.25	7.35	3,235.81	2.18

### 5.1.5.2 Indicadores a nivel estatal

Así mismo, se generó el mapa de zonas áridas a nivel estatal (Figura 26) en el cual de los estados que cuentan con el 100% de su superficie en el área de estudio (Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa), el estado de Sonora representa mayor aridez con 117,372.81 km<sup>2</sup> (23.52%), seguido de Baja California Sur con 61,141.56 km<sup>2</sup> (12.25%), por su parte, en el estado de Sinaloa se observa mayor superficie de regiones semiáridas con 44,018.44 km<sup>2</sup> (8.82%), así como también cuenta con mayor área subhúmedas secas y húmedas (1,631.38 km<sup>2</sup> y 511.94 km<sup>2</sup> respectivamente) (Tabla 19).



**Figura 26.** Mapa de regiones áridas a nivel estatal año 2020.

**Tabla 19.** Superficie en km2 y porcentajes de regiones áridas a nivel estatal.

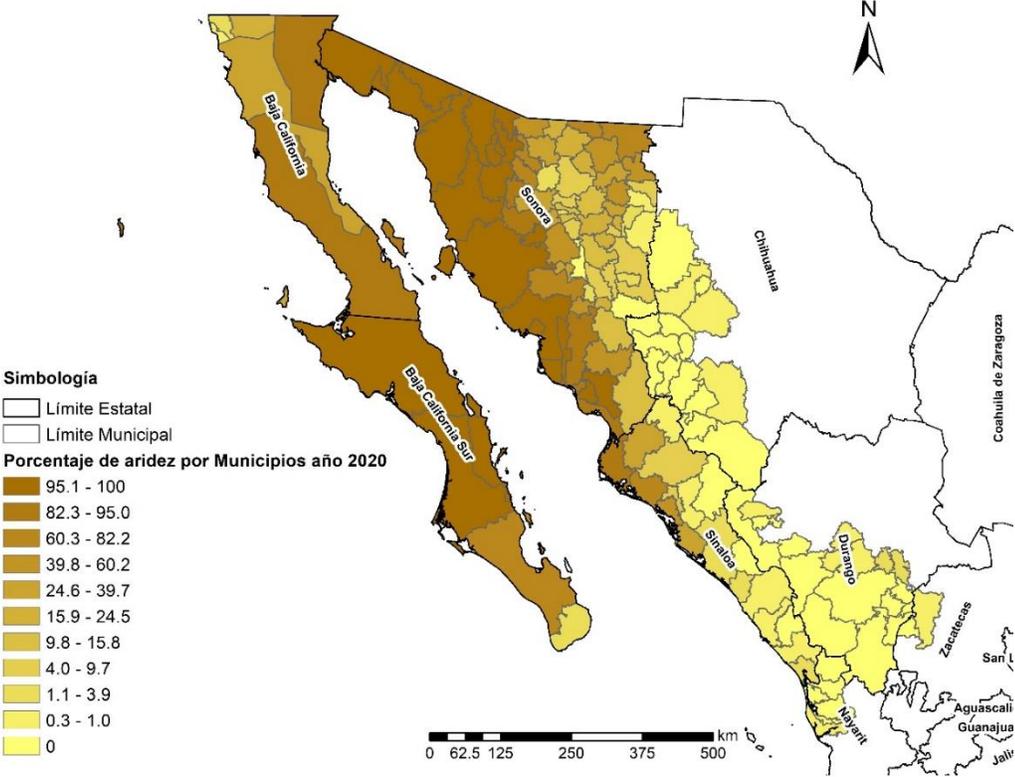
Superficie de regiones áridas a nivel estatal año 2020								
Estado	Áridas		Semiáridas		Subhúmedas - secas		Húmedas	
	km2	%	km2	%	km2	%	km2	%
Baja California	50,506.19	10.12	22,594.69	4.53	19.06	0.00	0.00	0.00
Baja California Sur	61,141.56	12.25	9,850.94	1.97	42.06	0.01	0.00	0.00
Chihuahua	133.69	0.03	54,067.94	10.83	191.94	0.04	69.25	0.01
Durango	119.38	0.02	43,424.25	8.70	5,898.88	1.18	1,979.19	0.40
Nayarit	20.63	0.00	4,957.06	0.99	3,219.44	0.65	654.13	0.13
Sinaloa	8,722.25	1.75	44,018.44	8.82	1,631.38	0.33	511.94	0.10
Sonora	117,372.81	23.52	62,859.56	12.59	68.31	0.01	0.00	0.00
Zacatecas	25.19	0.01	43,14.13	0.86	83.38	0.02	35.94	0.01

### 5.1.5.3 Indicadores de aridez a nivel municipal

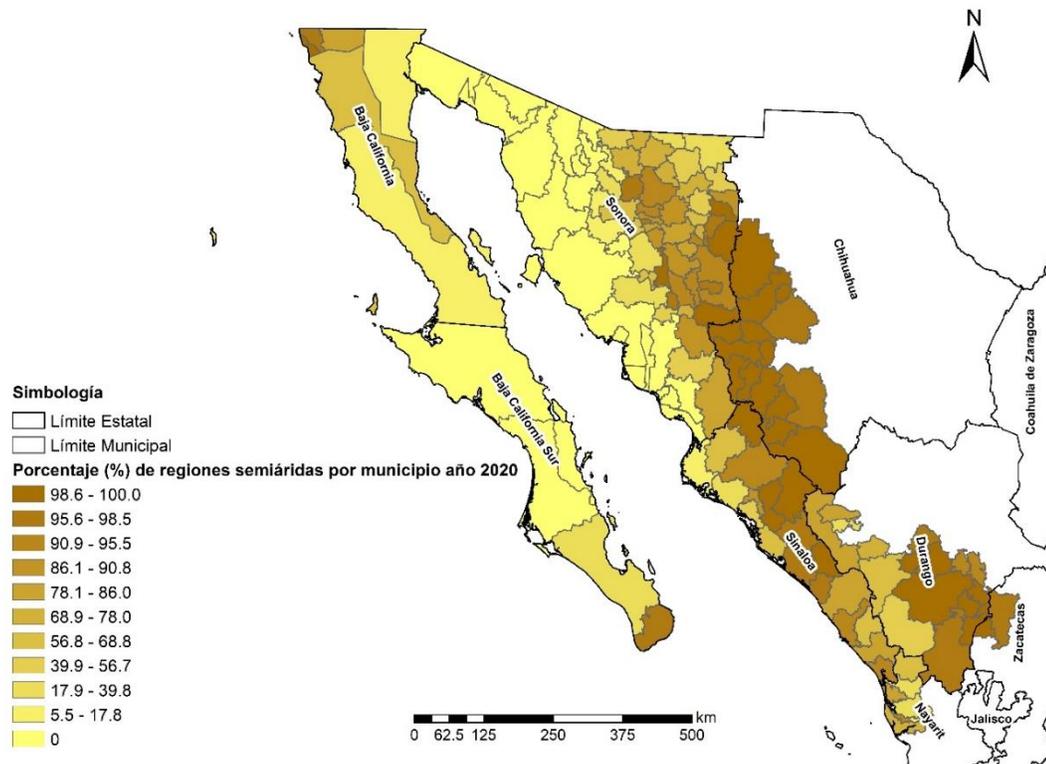
Por su parte, se generaron indicadores de aridez a nivel municipal, destacando los municipios más áridos (Figura 27) y semiáridos (Figura 28) de la región noroeste de México. Dichos indicadores muestran que los municipios con más del 90% de superficie de aridez se encuentran en los estados de Sonora (Atil, Oquitoa, Etchojoa, Altar, Caborca, Pitiquito, Hermosillo, San Miguel de Horcasitas, Puerto Peñasco, Tubutama, Navojoa, San Luis Río Colorado, General Plutarco Elías Calles, Sáric, Empalme, Bécum, San Ignacio, Río Muerto, Trincheras, Guaymas, Benito Juárez, Huatabampo, Cajeme), Baja California (Mexicali), Baja California Sur ( Mulegé, Comondú, Loreto) y Sinaloa (Ahome).

Así mismo, los indicadores municipales de regiones semiáridas indican que los municipios con el 100% de su superficie de zonas semiáridas se encuentran en los estados de Chihuahua (Batopilas de Manuel Gómez Morín, Chínipas, Guazapares, Matachí, Morelos, Moris, Uruachi), Durango (Nombre de Dios, Vicente Guerrero) y Sonora (Yécora), mientras que los municipios con arriba del 90% de su superficie

semiárida se encuentran en los estados de Baja California (Playas de Rosarito, Tijuana), Baja California Sur (Los Cabos), Chihuahua ( Maguarichi, Guadalupe y Calvo, Temósachic, Urique, Madera, Ocampo, Guachochi, Guerrero), Durango (Durango, Poanas, Canatlán, Súchil, Nuevo Ideal, Mezquital, Guadalupe Victoria, Pánuco de Coronado), Sinaloa (Choix, Cosalá, Badiraguato, Mocolito, Elota, Culiacán, Escuinapa, Mazatlán, Sinaloa, Salvador Alvarado), Sonora (Villa Pesqueira, Huachinera, Nácori Chico, Arivechi, Cucurpe, San Felipe de Jesús, Bacadéhuachi, San Javier, Sahuaripa, Divisaderos, Arizpe, Banámichi, Soyopa, Bacanora, Baviácora, Bacerac) y Zacatecas (Chalchihuites, Sombrerete).



**Figura 27.** Mapas de aridez a nivel Municipal. Representación porcentual de municipios más áridos año 2020.



**Figura 28.** Mapas de aridez a nivel Municipal. Representación porcentual de municipios más semiáridos año 2020.

#### 5.1.5.4 Indicadores de uso de suelo

Por su parte, la tabla 20 muestra los indicadores de aridez a nivel de uso de suelo los cuales indican que las regiones áridas se acentúan mayormente en los tipos de suelo acuícola (76%), matorrales (86%) y desprovisto de vegetación (73%). Mientras que las regiones semiáridas se encuentran principalmente en los tipos de suelos de Bosque (87.2%), Selva (83%) y Vegetación Secundaria (76.71%). Por su parte, las regiones con mayor superficie húmedas se encuentran en los Bosques (7.3%), vegetación secundaria (3%) y selvas (2.3%). Así mismo, se obtuvo que los bosques son los usos de suelos que presentaron mayor superficie húmeda (2.38%)

**Tabla 20.** Superficie en km2 y porcentajes de regiones áridas a nivel de uso de suelo.

<b>Superficie de regiones áridas a nivel de uso de suelo año 2020</b>								
<b>Tipo de Uso de Suelo</b>	<b>Áridas</b>		<b>Semiáridas</b>		<b>Subhúmedas - secas</b>		<b>Húmedas</b>	
	<b>km2</b>	<b>%</b>	<b>km2</b>	<b>%</b>	<b>km2</b>	<b>%</b>	<b>km2</b>	<b>%</b>
Acuícola	980.13	76.93	286.88	22.52	3.25	0.26	3.81	0.3
Agricultura	20,771.25	39.43	30,723.38	58.33	990.19	1.88	190.25	0.36
Asentamientos humanos	1,546.63	45.01	1840	53.54	37.56	1.09	12.19	0.35
Bosque	2,963.56	3.11	83,047.88	87.2	6,956.5	7.3	2,266.88	2.38
Desprovisto de Vegetación	742.75	76.79	1,211.56	22.85	13.94	0.29	4.19	0.07
Dunas costeras	461.19	58.37	325.5	41.2	2.19	0.28	1.19	0.15
Matorral	17,4523	86.04	28,270.13	13.94	54.56	0.03	2.31	0
Palmar natural	21.88	51.93	20	47.48	0.25	0.59	0	0
Pastizal	15,208.31	39.34	22,782.06	58.93	556.88	1.44	110.88	0.29
Selva	7,855.25	14	46,561.75	83	1,331.19	2.37	347.44	0.62
Vegetación Secundaria	7799	19.49	30,698.75	76.71	1,204.94	3.01	314.13	0.78

## 5.2 Resultados del modelo de simulación Geoespacial de zonas áridas

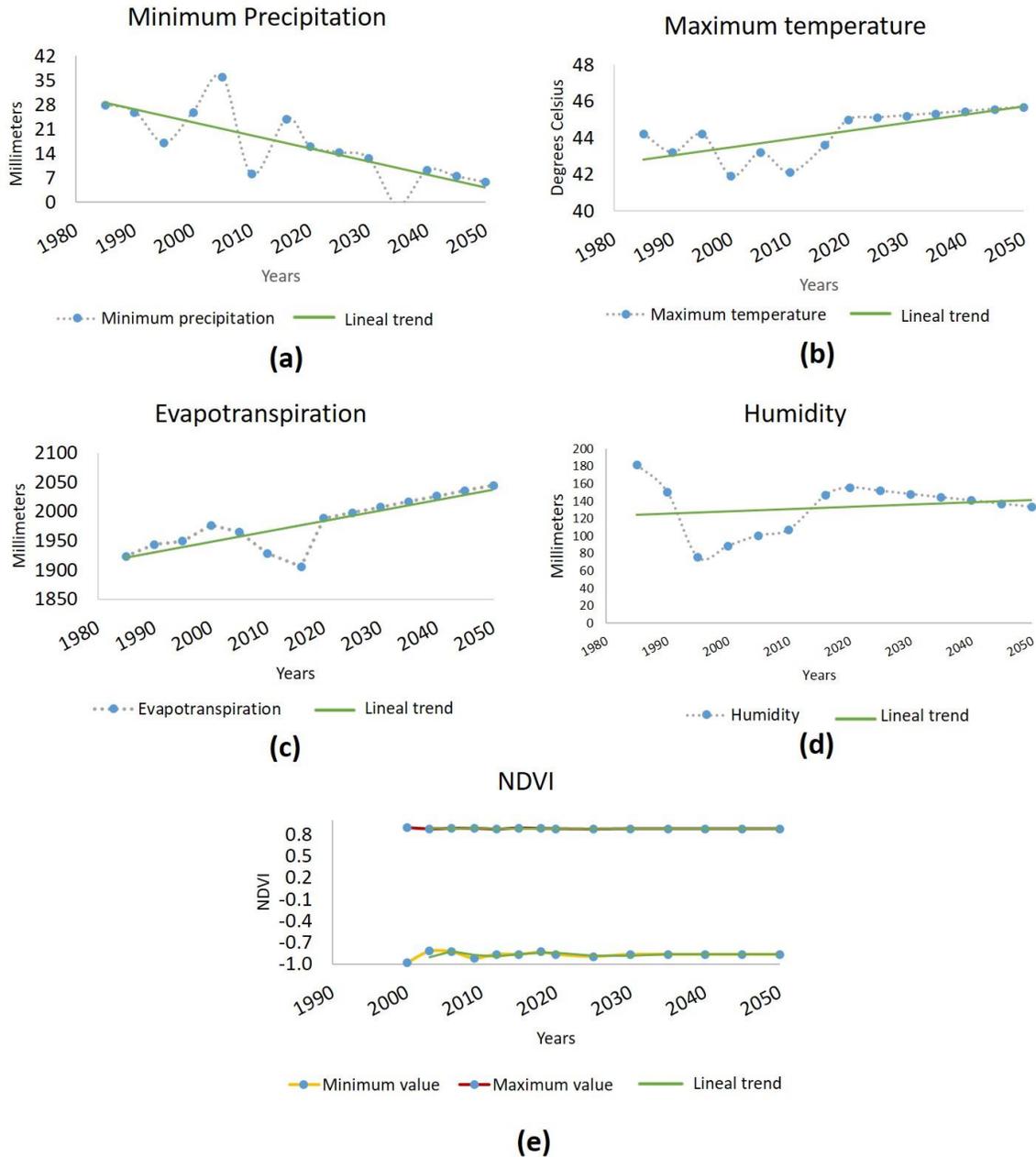
### 5.2.1 Tasas Anuales para las variables utilizadas

A partir del análisis de series de tiempo de las variables y periodos utilizados (1985-2020 y 2000-2020) se obtuvieron las tasas de anuales (Tabla 21), donde se muestran los cambios por periodos, la tasa de cambio anual, y las tendencias de cambio hacia los años 2030 y 2050, dichos datos se utilizaron para generar los mapas de tendencia. De acuerdo con los resultados se puede decir que, en un escenario de tendencia, se acentúa una disminución de las precipitaciones de 0.34 mm anual por lo que para el

año 2050 se vería una disminución de 10.29 mm (Figura 29a), mientras que la temperatura se estima un aumento de 0.023 °C anual, que proyectado al año 2050 se refleja un incremento de 0.69 °C (Figura 29b), así mismo la evapotranspiración aumentará 56.23 mm (Figura 29c) y la humedad disminuirá 22.11 mm (Figura 29d) para el año 2050 en la región de estudio, por su parte, la cobertura vegetal estaría reduciéndose de acuerdo a los valores de cambio observados en el NDVI (Figura 29e).

**Tabla 21.** Tazas de cambio desde el año 1985 hasta 2020

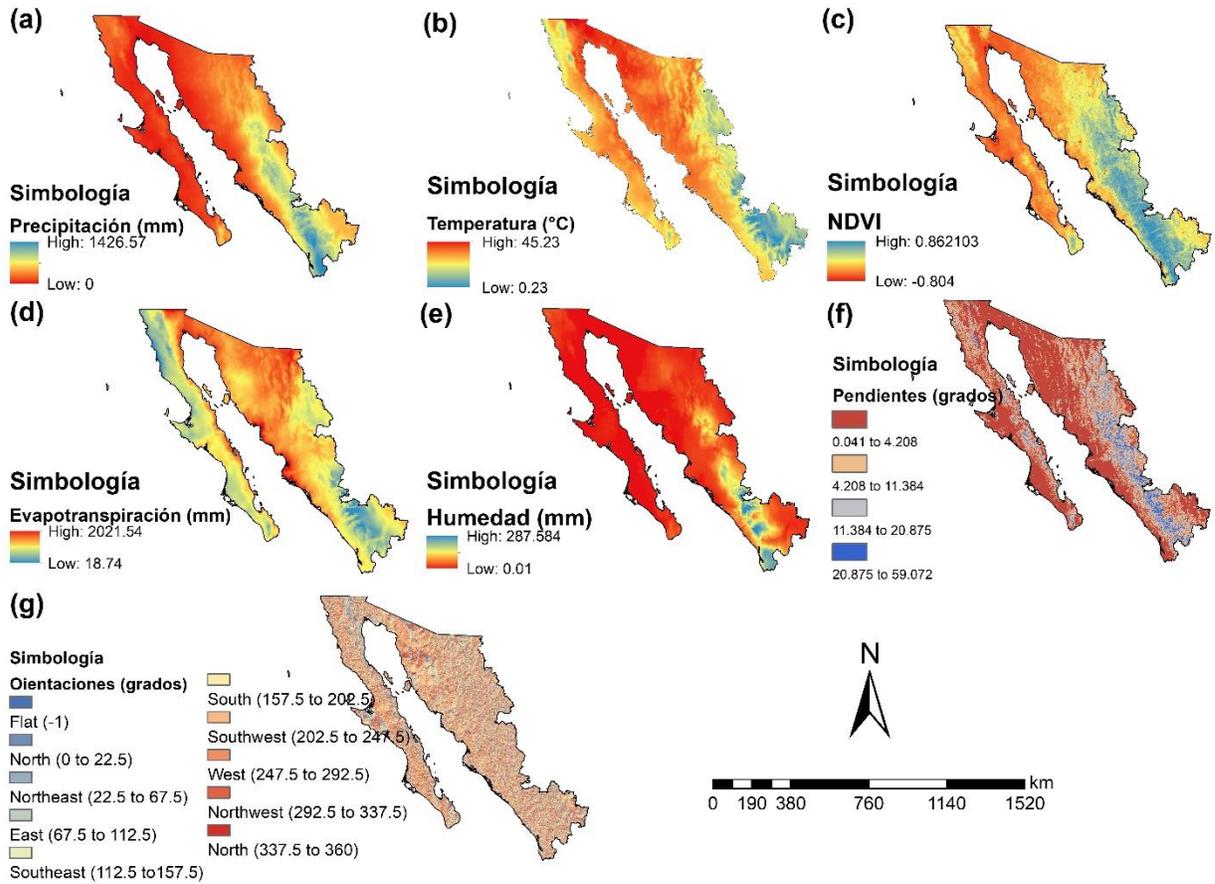
<b>Dato</b>	<b>1990</b>	<b>1995</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>Tasa de cambio anual</b>	<b>Tasa de cambio al 2030</b>	<b>Tasa de cambio al 2050</b>
Precipitación Mínima	-0.4	-1.8	1.8	2	-5.6	3.2	-1.6	-0.34	-3.43	-10.29
temperatura Máxima	-0.2	0.2	-0.46	0.26	-0.22	0.3	0.28	0.023	0.23	0.69
Evapotranspiración	4.16	1.1	5.44	-2.34	-7.26	-4.54	16.56	1.87	18.74	56.23
Humedad	-6.24	-14.9	2.66	2.36	1.36	7.84	1.76	-0.74	-7.37	-22.11
<b>NDVI</b>	<b>2003</b>	<b>2006</b>	<b>2009</b>	<b>2012</b>	<b>2015</b>	<b>2018</b>	<b>2020</b>	<b>Tasa de cambio anual</b>	<b>Tasa de cambio al 2030</b>	<b>Tasa de cambio al 2050</b>
Valor Mínimo	0.054	-0.003	-0.030	0.019	0.000	0.011	-0.011	-0.006	-0.060	-0.180
Valor Máximo	-0.008	0.003	0.001	-0.005	0.006	-0.003	-0.008	-0.001	-0.010	-0.030



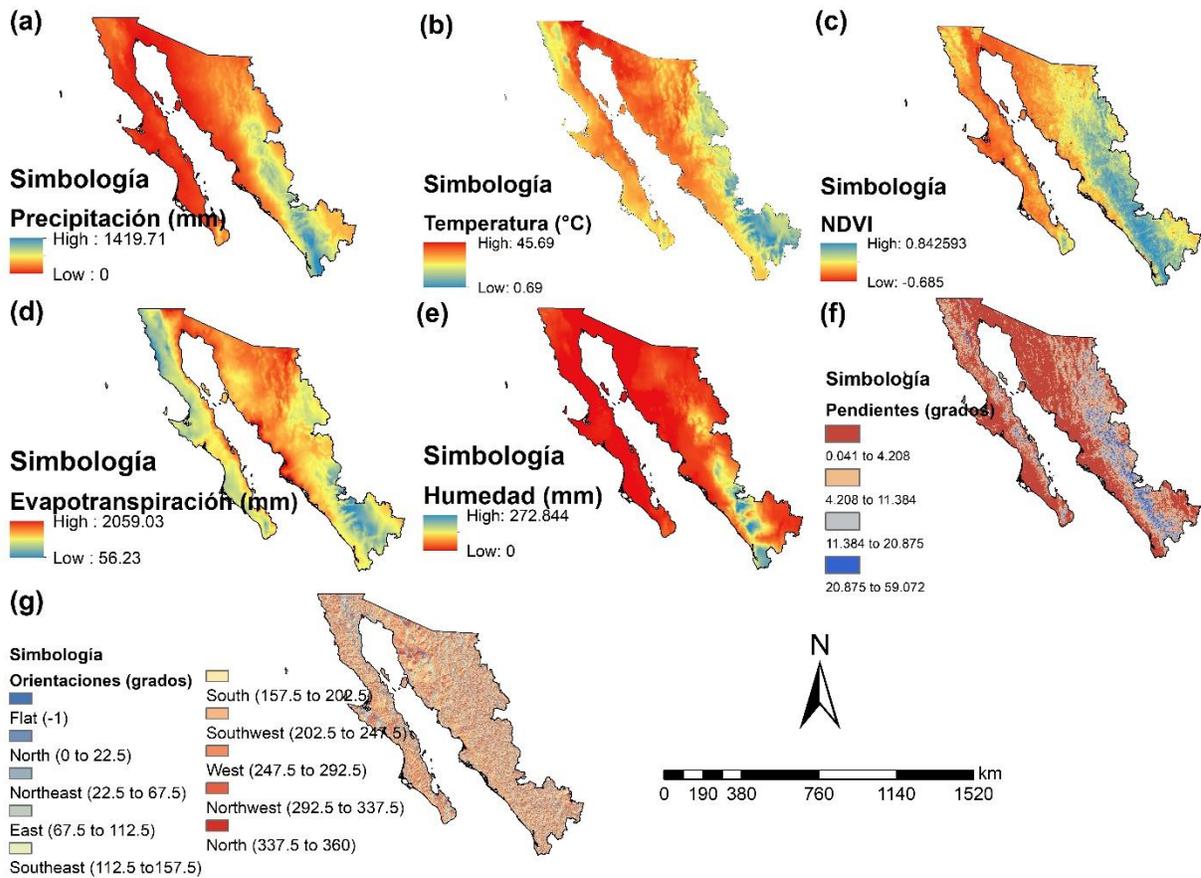
**Figura 29.** Líneas de tendencia de las variables años 2030-2050.

### 5.2.2 Variables obtenidas para los años 2030 y 2050

Como resultado del procesamiento y estandarización de los datos utilizando como base el año 2020 y aplicando la tasa de cambio de la tabla 21, se obtuvieron las variables para los años 2030 (Figura 30) y 2050 (Figura 31).



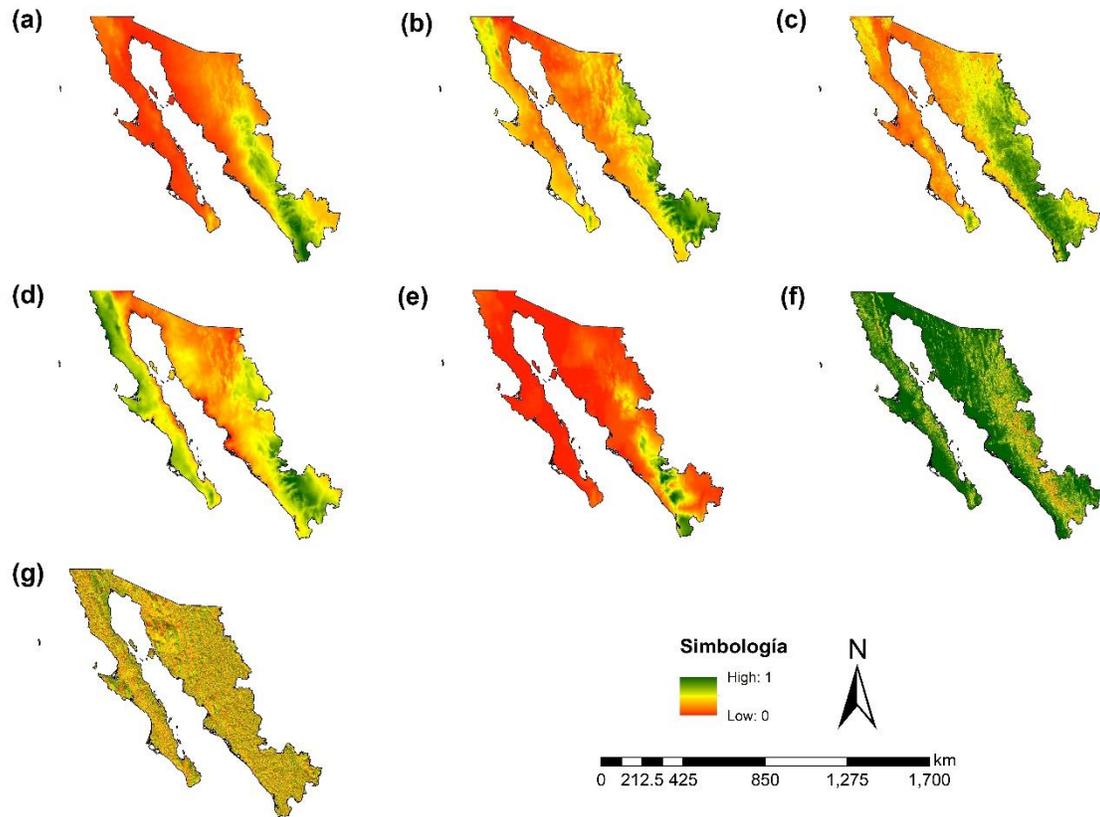
**Figura 30.** Variables obtenidas del modelo de tendencia a aridez. Año 2030. Leyenda: (a) Precipitación, (b) Temperatura, (c) NDVI, (d) Evapotranspiración, (e) Humedad, (f) Pendientes, (g) Orientaciones



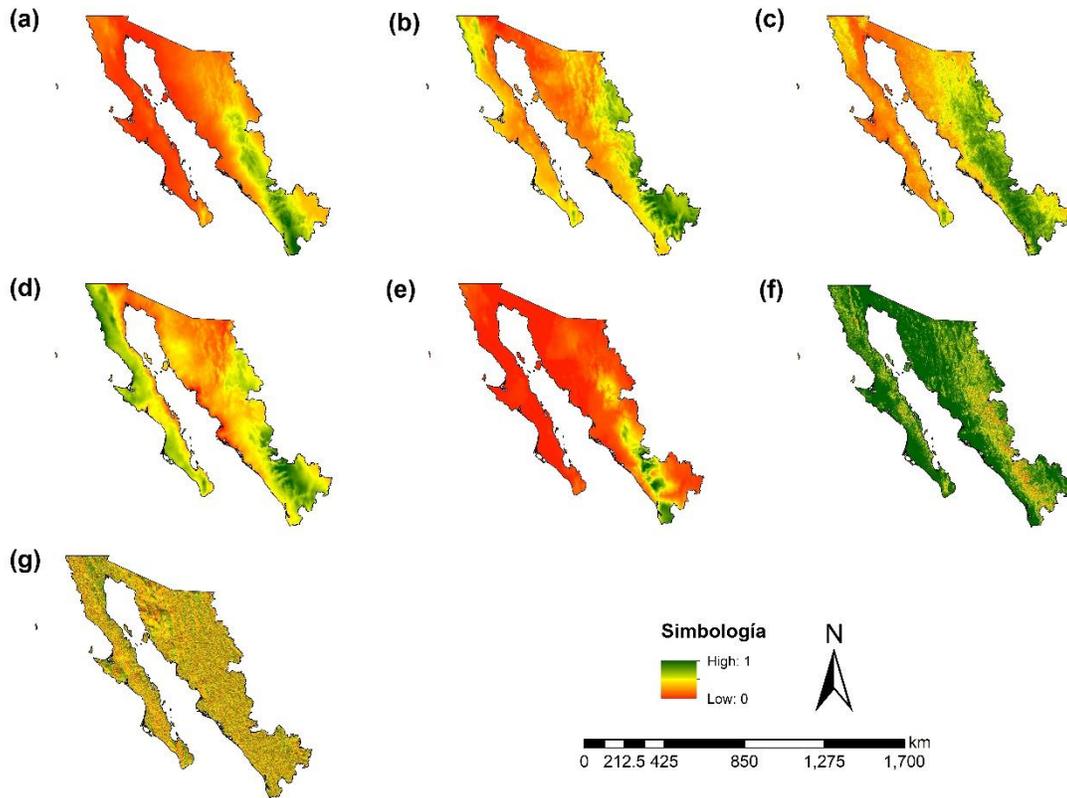
**Figura 31.** Variables obtenidas del modelo de tendencia a aridez. Año 2050. Leyenda: (a) Precipitación, (b) Temperatura, (c) NDVI, (d) Evapotranspiración, (e) Humedad, (f) Pendientes, (g) Orientaciones

### 5.2.3 Factores normalizados

Aplicando la técnica de estandarización de las variables utilizando el método de lógica difusa, se obtuvieron los factores normalizados para los años 2030 y 2050 (Figura 32 y 33).



**Figura 32.** Factores obtenidos como resultado de la estandarización. Año 2030. Leyenda: (a) Precipitación, (b) Temperatura, (c) NDVI, (d) Evapotranspiración, (e) Humedad, (f) Pendientes, (g) Orientaciones

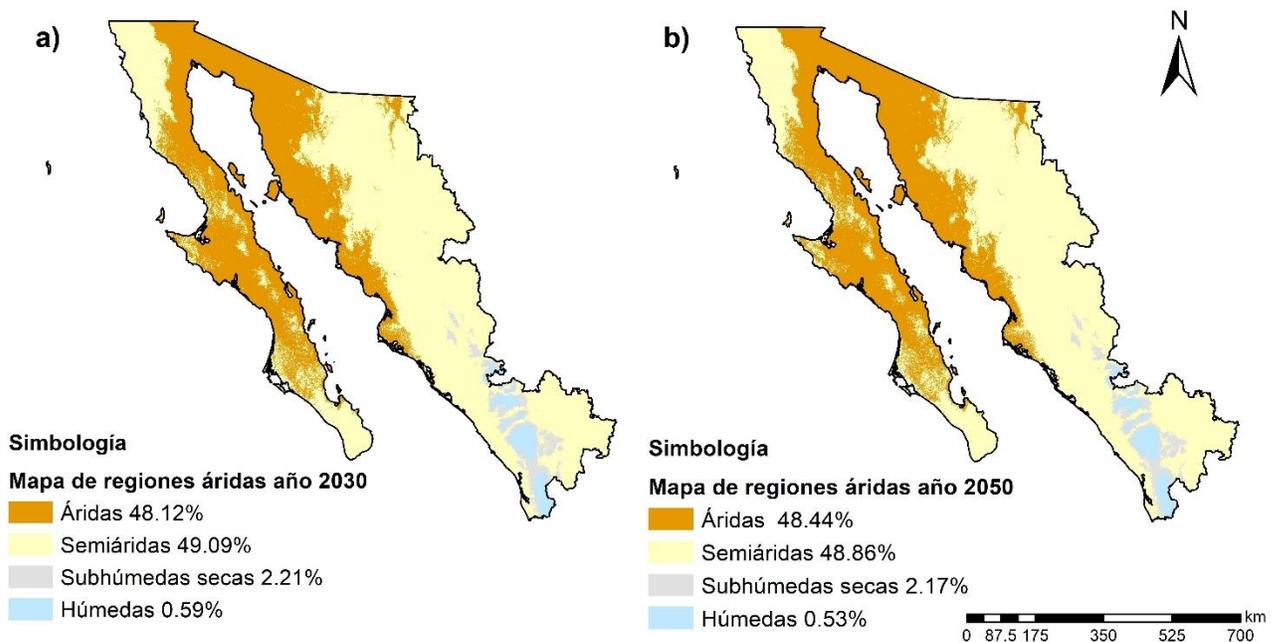


**Figure 33.** Factores obtenidos como resultado de la estandarización. Año 2050. Leyenda: (a) Precipitación, (b) Temperatura, (c) NDVI, (d) Evapotranspiración, (e) Humedad, (f) Pendientes, (g) Orientaciones

#### 5.2.4 Indicadores cuantitativos y geospaciales de tendencia a aridez años 2030 y 2050

A través de la técnica EMC se evaluaron los factores considerados impulsores del proceso de aridez. A los mapas de aptitud a tendencias obtenidos, se aplicó la clasificación basado en el IA de la UNEP (Tabla 22) para obtener el mapa de zonas áridas. Los mapas de tendencia muestran que para el año 2030, las regiones áridas representarán un 48.12% de la superficie de estudio, lo que significa un aumento del 3.53% respecto al año 2020, mientras que en las regiones semiáridas se reflejaría una pérdida de 1.28%, así mismo, las regiones subhúmedas secas y húmedas estarían disminuyendo en conjunto aproximadamente 2.24% (Figura 34a).

En cuanto a los resultados obtenidos para el año 2050 refleja que las regiones áridas representan un 48.44% de la superficie del área de estudio, lo que significa un aumento de 2.97% respecto al año 2020, así mismo, las regiones semiáridas se siguen manteniendo sin mucho cambio con tan solo 0.83% de pérdida de superficie, mientras que las regiones subhúmedas secas y húmedas continúan la tendencia a disminuir con 2.14% (Figura 34b).



**Figura 34.** Mapas de tendencia a aridez. a) Año 2030. b) Año 2050.

En la tabla 10 se muestran las superficies y porcentajes de cambio por cada región para cada año del modelo de tendencia, en el cual se puede observar que las regiones áridas podrían ir en aumento de seguir la tendencia de las altas temperaturas y las bajas precipitaciones, así mismo, las regiones subhúmedas secas y húmedas son las que han perdido mayor superficie.

**Tabla 22.** Superficies y porcentajes de cambio por periodo de tendencia respecto al año base 2020.

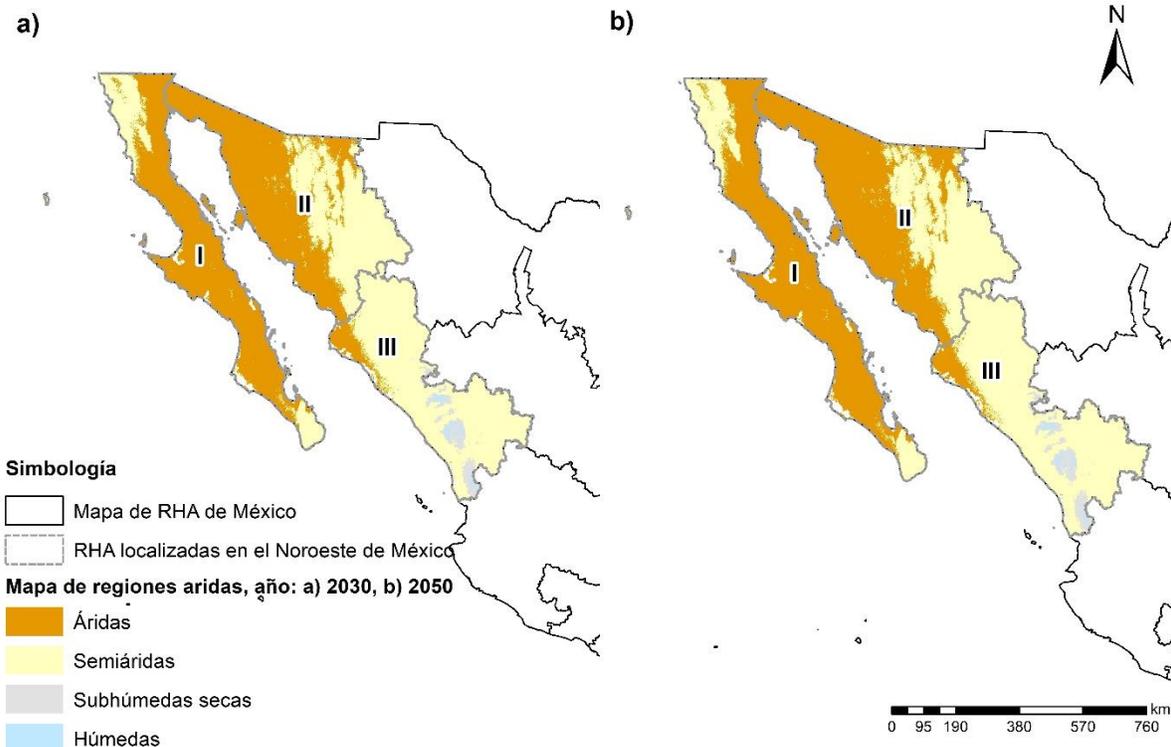
Región	Año base		Tendencia			
	2020		2030		2050	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
Árido	238,290.25	47.74	240,164.63	48.12	24,1760.75	48.44
Semiárido	246,389.31	49.37	244,995.75	49.09	24,3867.44	48.86
Subhúmedo seco	11,160.56	2.24	11,008.13	2.21	10,838.06	2.17
Húmedo	3,254.81	0.65	2,926.44	0.59	2,628.69	0.53

#### 5.2.4.1 Indicadores a nivel RHA

Por su parte, en la tabla 23 se muestran los indicadores de tendencia a nivel RHA obtenidos, los cuales reflejan que las zonas más áridas seguirán aumentando en la RHA-II Noroeste para los años 2030 y 2050 con una superficie de 118,521 km<sup>2</sup> y 119,298.44 km<sup>2</sup> respectivamente observando un aumento del 0.7% respecto al año 2020 (Figura 35).

Así mismo, las regiones semiáridas se reflejan mayormente en la RHA-III Pacífico Norte, mismo que se observa una tendencia de aumento para el año 2050 con un 0.2% respecto al año 2020 con superficies de 125,693.81 km<sup>2</sup> para el año 2030 y 125,934.75 km<sup>2</sup> para el 2050. Sin embargo, la tendencia de zonas semiáridas y subhúmedas secas en las RHA-I y RHA-II, se observa una disminución, lo que puede entenderse un aumento de aridez en esas regiones.

Por su parte, las tendencias de regiones húmedas y subhúmedas se reflejan con mayor superficie en las RHA-III Pacífico Norte, mismas que van en decremento, esto se puede concluir a que se refleja un aumento en las regiones áridas y semiáridas de esta zona.



**Figura 35.** Mapas de tendencia a aridez por RHA. a) Año 2030. b) Año 2050

**Tabla 23.** Superficies y porcentajes de cambio por RHA para los años 2030 y 2050.

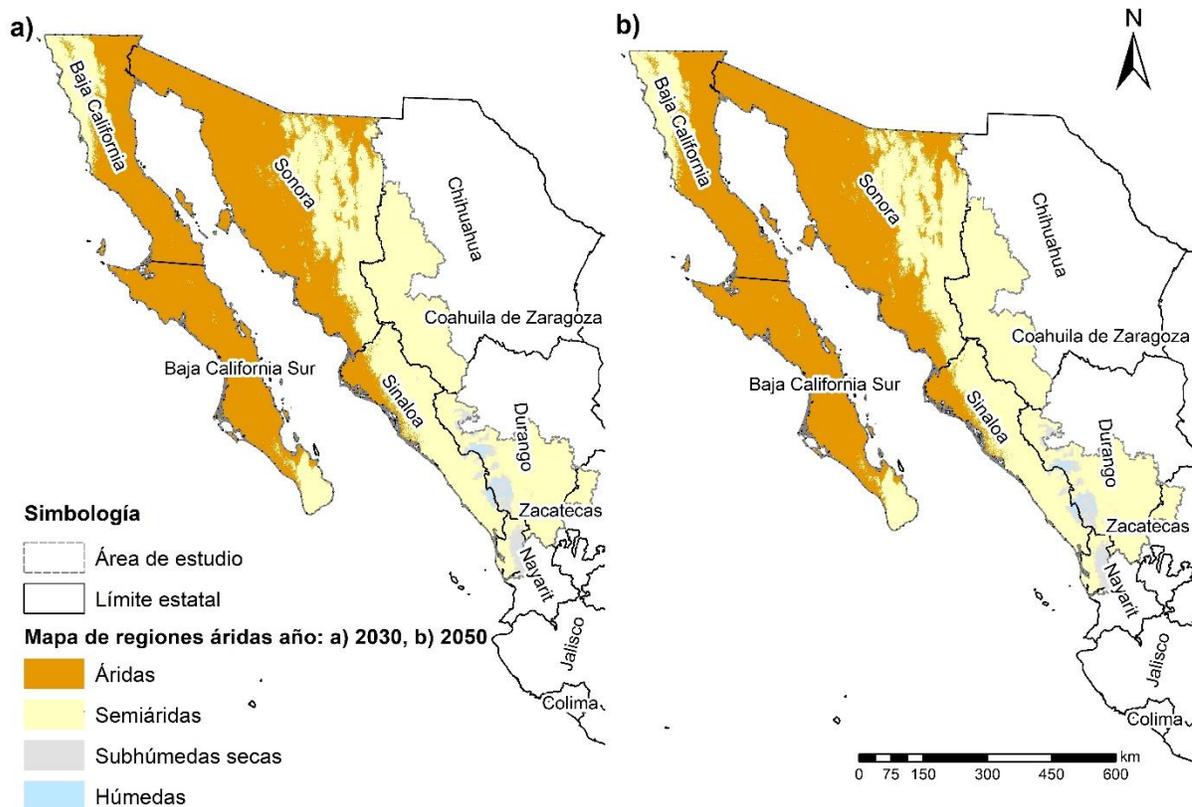
RHA	Superficie de regiones áridas para el año 2030 (km <sup>2</sup> )				Superficie de regiones áridas para el año 2050 (km <sup>2</sup> )			
	Árido	Semiárido	Subhúmedo seco	Húmedo	Árido	Semiárido	Subhúmedo seco	Húmedo
I	112,457.69	31,852.94	55.38	0	113,107.50	31,221.06	37.44	0
II	118,521.06	87,449.00	175.31	18.56	119,298.44	86,711.63	136.38	17.50
III	9,185.88	125,693.81	10,777.44	2,907.88	9,354.81	125,934.75	10,664.25	2,611.19
Totales	24,0164.63	244,995.75	11,008.13	2,926.44	24,1760.75	243,867.44	10,838.06	2,628.69

#### 5.2.4.2 Indicadores de tendencia a nivel estatal

Así mismo, se generó el mapa de tendencia a aridez a nivel estatal (Figura 36) en el cual se observa que los estados que cuentan con el 100% de su superficie en el área de estudio (Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa), el estado de Sonora

sigue representando mayor zonas áridas y semiáridas para el 2030 con 118,311 km<sup>2</sup> y 61,925.75 km<sup>2</sup> respectivamente, mientras que para el año 2050, la aridez seguirá en aumento con 119,079.19 km<sup>2</sup>, sin embargo, las regiones semiáridas disminuirán a 61,179.81 km<sup>2</sup>.

Seguidamente, Baja California Sur refleja una superficie de regiones áridas de 61,399.13 km<sup>2</sup> al año 2030 y para el 2050 seguirá en aumento con 61,597.44 km<sup>2</sup>. Por su parte, en el estado de Sinaloa para el año 2020 se observa mayor superficie de regiones semiáridas con 43,933.13 km<sup>2</sup>, mismas que se ven en decremento hacia el año 2050 con 43,869.63 km<sup>2</sup>, a su vez, las regiones subhúmedas y húmedas se manifiestan en decremento ya que se aprecia un aumento de regiones áridas para este estado (Tabla 24).



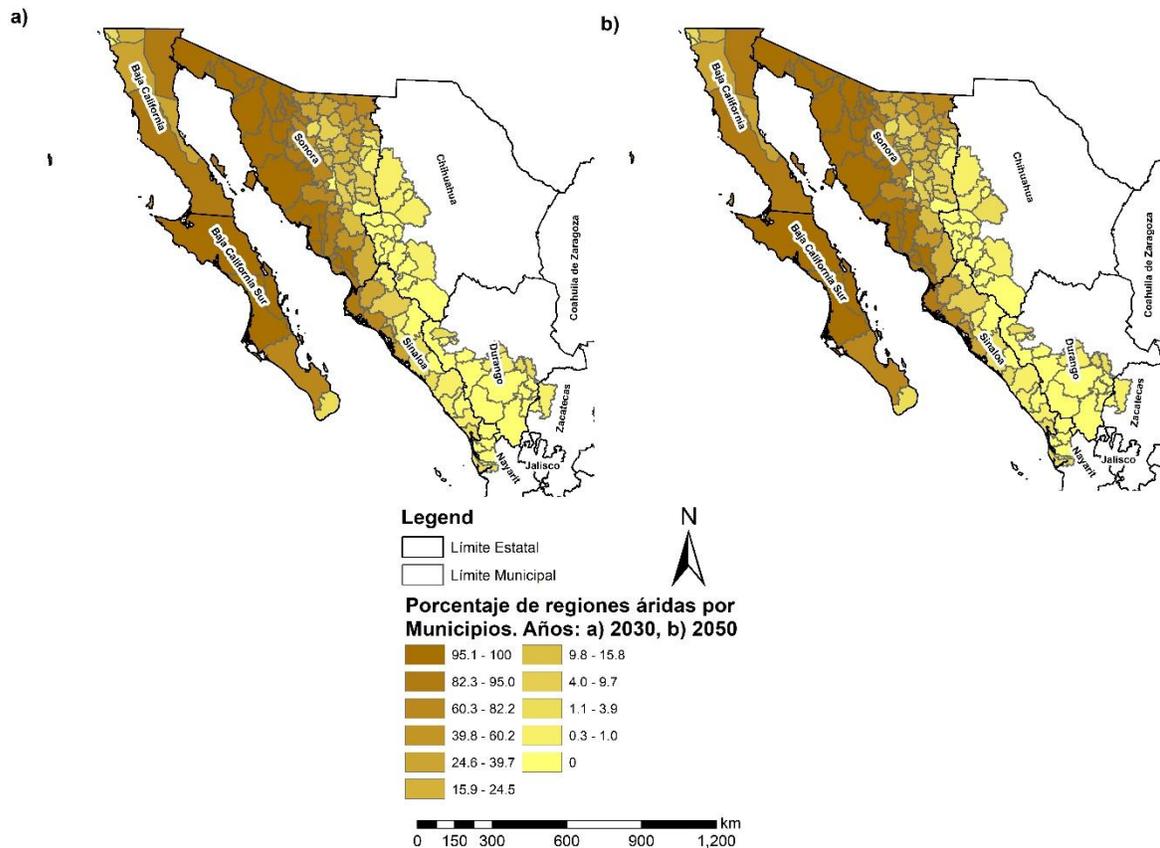
**Figura 36.** Mapas de tendencia a aridez a nivel estatal. a) Año 2030. b) Año 2050

**Tabla 24.** Superficies y porcentajes de cambio por estado para los años 2030 y 2050.

Estado	Superficie de regiones áridas para el año 2030 (km <sup>2</sup> )				Superficie de regiones áridas para el año 2050 (km <sup>2</sup> )			
	Árido	Semiárido	Subhúmedo seco	Húmedo	Árido	Semiárido	Subhúmedo seco	Húmedo
Baja California	50,976.44	22,127.94	15.56	0	51,427.06	21,687.63	5.25	0
Baja California Sur	61,399.13	9,595.50	39.94	0	61,597.44	9,404.81	32.31	0
Chihuahua	148.69	54,060.38	187.44	66.31	134.38	43,926.69	5,794.94	1,565.69
Durango	127.63	43,700.06	5,836.06	1757.94	160	54,071.13	174.00	57.69
Nayarit	22.38	5041.06	3,203.13	584.69	23.75	5,117.31	3,180.06	530.13
Sinaloa	8,900.31	43,933.13	1,571.63	478.94	9,056.38	43,869.63	1,509.69	448.31
Sonora	118,311	61,925.75	63.94	0	119,079.19	61,179.81	41.69	0
Zacatecas	29	4,310.44	85	34.19	31.44	4,309.19	95.50	22.50
Total	239,914.56	244,694.25	11,002.69	2922.06	51,427.06	21,687.63	5.25	0.00

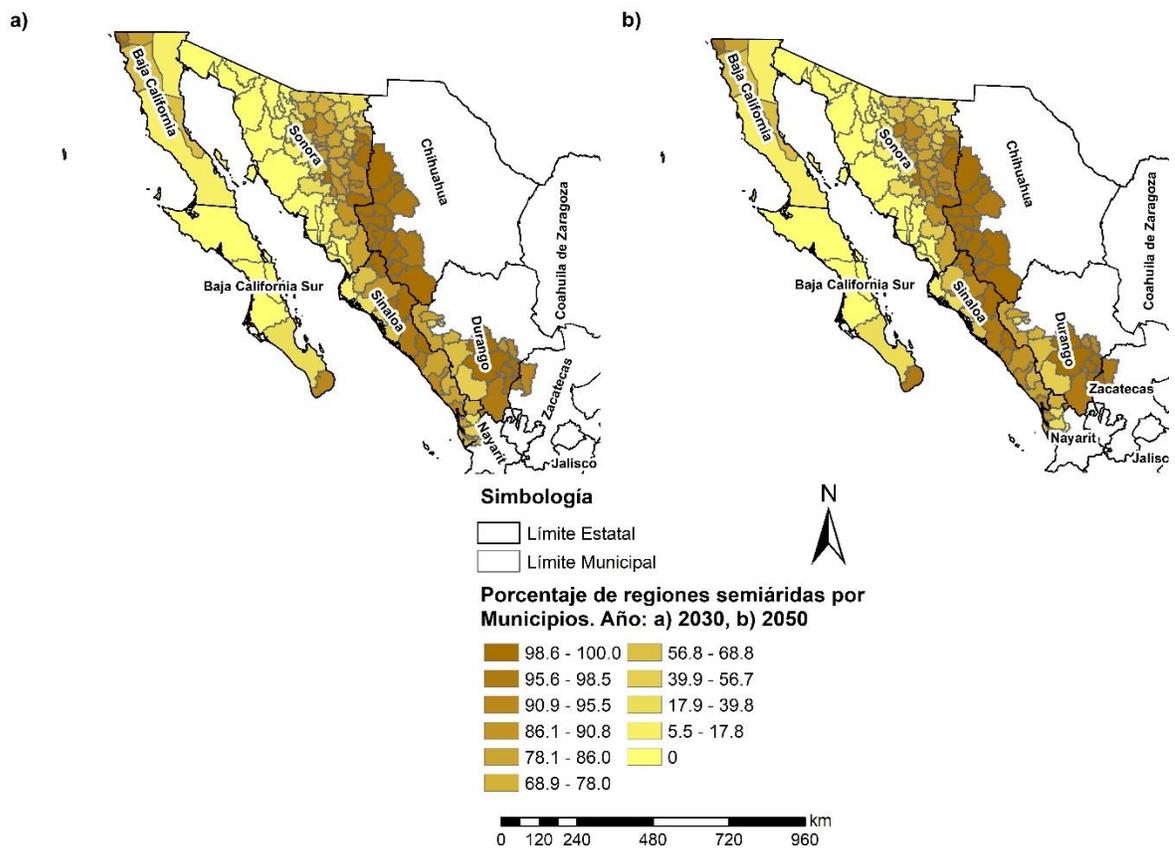
### 5.2.4.3 Indicadores de tendencia a nivel municipal

Por su parte, se generaron indicadores de tendencia a aridez a nivel municipal para el año 2030 (Figura 37) y 2050 (Figura 38), en los cuales destacan los municipios más áridos y semiáridos de la región noroeste de México. Dichos indicadores muestran que los municipios con más del 90% de superficie de aridez se encuentran en los estados de Sonora (Atil, Oquitoa, Etchojoa, Altar, Caborca, Pitiquito, Hermosillo, San Miguel de Horcasitas, Puerto Peñasco, Tubutama, Navojoa, San Luis Río Colorado, General Plutarco Elías Calles, Sáric, Empalme, Bácum, San Ignacio, Río Muerto, Trincheras, Guaymas, Benito Juárez, Huatabampo, Cajeme, empalme, Benjamín Hill), Baja California (Mexicali), Baja California Sur (Mulegé, Comondú, Loreto) y Sinaloa (Ahome).



**Figura 37.** Mapas de tendencia a aridez a nivel Municipal. Representación de municipios más áridos. a) Año 2030. b) Año 2050.

Así mismo, los indicadores municipales de regiones semiáridas indican que los municipios con el 100% de su superficie de zonas semiáridas se encuentran en los estados de Chihuahua (Batopilas de Manuel Gómez Morín, Chínipas, Guazapares, Matachí, Morelos, Moris, Uruachi) y Durango (Nombre de Dios, Vicente Guerrero), mientras que los municipios con arriba del 90% de su superficie semiárida se encuentran en los estados de Sonora (Villa Pesqueira, Nácori Chico, Arivechi, Cucurpe, Huachinera, San Felipe de Jesús, San Javier, Bacadéhuachi, Sahuaripa, Divisaderos, Soyopa, Banámichi, Bacanora), Baja California (Playas de Rosarito, Tijuana), Baja California Sur (Los Cabos), Chihuahua (Maguarichi, Guadalupe y Calvo, Temósachic, Urique, Madera, Ocampo, Guachochi, Guerrero), Durango (Durango, Poanas, Canatlán, Súcil, Nuevo Ideal, Coronado, Guadalupe Victoria, Pánuco de Coronado, Mezquital), Sinaloa (Choix, Cosalá, Badiraguato, Mocorito, Elota, Culiacán, Escuinapa, Mazatlán, Sinaloa), y Zacatecas (Chalchihuites, Sombrerete).



**Figura 38.** Mapas de tendencia a aridez a nivel Municipal. Representación de municipios más semiáridos. a) Año 2030. b) Año 2050.

#### 5.2.4.4 Indicadores de uso de suelo

Por su parte, la tabla 25 muestra los indicadores de tendencia a aridez a nivel de uso de suelo para el año 2030, la cual indica que las regiones áridas seguirán predominando en los tipos de suelo acuícola (77.26%), matorrales (86.47%) y desprovisto de vegetación (76.99%). Mientras que las regiones semiáridas seguirán predominando principalmente en los tipos de suelos de Bosque (87.45%), Selva (82.71%) y Vegetación Secundaria (76.46%). Por su parte, las regiones con mayor superficie húmeda seguirán en los Bosques (2.13%), vegetación secundaria (0.70%) y selvas (0.5%).

**Tabla 25.** Superficie en km2 y porcentajes de tendencia de regiones áridas a nivel de uso de suelo año 2030.

<b>Superficie de regiones áridas a nivel de uso de suelo año 2030</b>									
<b>Tipo de Uso de Suelo</b>	<b>Áridas</b>		<b>Semiáridas</b>		<b>Subhúmedas - secas</b>		<b>Húmedas</b>		<b>Total</b>
	<b>km2</b>	<b>%</b>	<b>km2</b>	<b>%</b>	<b>km2</b>	<b>%</b>	<b>km2</b>	<b>%</b>	
Acuícola	984.38	77.26	282.75	22.19	3.19	0.25	3.75	0.29	1274.06
Agricultura	20,977.31	39.82	30552.88	58.00	964.25	1.83	180.63	0.34	52675.06
Asentamientos humanos	1560.38	45.41	1828.25	53.20	36.63	1.07	11.13	0.32	3436.38
Bosque	3057.94	3.21	83285.69	87.45	6858.69	7.20	2032.50	2.13	95234.81
Desprovisto de Vegetación	6176.38	76.99	1817.63	22.66	22.44	0.28	5.44	0.07	8021.88
Dunas costeras	466.13	59.00	320.63	40.58	2.13	0.27	1.19	0.15	790.06
Matorral	175399.06	86.47	27397.19	13.51	52.25	0.03	1.50	0.00	202850.00
Palmar natural	22.50	53.41	19.50	46.29	0.13	0.30	0.00	0.00	42.13
Pastizal	15506.88	40.11	22500.50	58.20	552.50	1.43	98.25	0.25	38658.13
Selva	8063.63	14.37	46395.81	82.71	1325.63	2.36	310.56	0.55	56095.63
Vegetación Secundaria	7950.06	19.87	30594.94	76.46	1190.31	2.97	281.50	0.70	40016.81

Así mismo, la tabla 26 muestra los indicadores de tendencia a aridez a nivel de uso de suelo para el año 2050, la cual indica que las regiones áridas seguirán aumentando en los tipos de suelo acuícola (77.55%), matorrales (86.84%) y desprovisto de vegetación (77.14%). Por su parte, de igual forma, las regiones semiáridas seguirán aumentando principalmente en los Bosques (87.67%), mientras que la Selva y Vegetación Secundaria presentarán un decremento (82.45%) y (76.25%) respectivamente. Por su parte, las regiones con mayor superficie húmedas seguirán en los Bosques con decremento (1.93%).

**Tabla 26.** Superficie en km<sup>2</sup> y porcentajes de tendencia de regiones áridas a nivel de uso de suelo año 2050.

<b>Superficie de regiones áridas a nivel de uso de suelo año 2050</b>									
<b>Tipo de Uso de Suelo</b>	<b>Áridas</b>		<b>Semiáridas</b>		<b>Subhúmedas - secas</b>		<b>Húmedas</b>		<b>Total</b>
	<b>km<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>km<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>km<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	<b>km<sup>2</sup></b>	<b>%</b>	
Acuícola	988.06	77.55	279.75	21.96	2.69	0.21	3.56	0.28	1274.06
Agricultura	21155.88	40.16	30419.69	57.75	929.56	1.76	169.94	0.32	52675.06
Asentamientos humanos	1571.63	45.73	1820.13	52.97	36.13	1.05	8.50	0.25	3436.38
Bosque	3144.00	3.30	83491.88	87.67	6765.25	7.10	1833.69	1.93	95234.81
Desprovisto de Vegetación	6188.00	77.14	1809.63	22.56	19.19	0.24	5.06	0.06	8021.88
Dunas costeras	468.75	59.33	318.31	40.29	1.81	0.23	1.19	0.15	790.06
Matorral	176150.00	86.84	26658.94	13.14	40.88	0.02	0.19	0.00	202850.00
Palmar natural	23.06	54.75	19.06	45.25	0.00	0.00	0.00	0.00	42.13
Pastizal	15746.13	40.73	22282.25	57.64	549.25	1.42	80.50	0.21	38658.13
Selva	8245.44	14.70	46253.50	82.45	1317.00	2.35	279.69	0.50	56095.63
Vegetación Secundaria	8079.81	20.19	30514.31	76.25	1176.31	2.94	246.38	0.62	40016.81

### **5.3 Resultados del Sistema de Apoyo a la Toma de Decisión Espacial Web (SADEW)**

La interfaz del Geoportal web para el monitoreo de zonas áridas está desarrollado en los lenguajes JavaScript y HTML principalmente, el cual integra, además, algunos componentes necesarios para la correcta visualización de la información. Este sistema se conecta con el servidor de mapas, el cual provee toda la información solicitada por el usuario de una manera visualmente entendible. Para acceder a SADEW, se implementó la autenticación de usuarios, el cual verifica en la base de datos si se encuentra esa información para permitir el acceso al sistema. Una vez ingresado correctamente, se puede acceder a todas las funcionalidades que el Geoportal para el monitoreo de zonas áridas provee.

### 5.3.1 Funcionalidades de SADEW

#### 5.3.1.1 Autenticación de usuarios

Para el ingreso a SADEW es necesario autenticarse con un correo o nombre de usuario y contraseña, este permitirá el acceso siempre y cuando existan los datos en la base de datos (Figura 39).

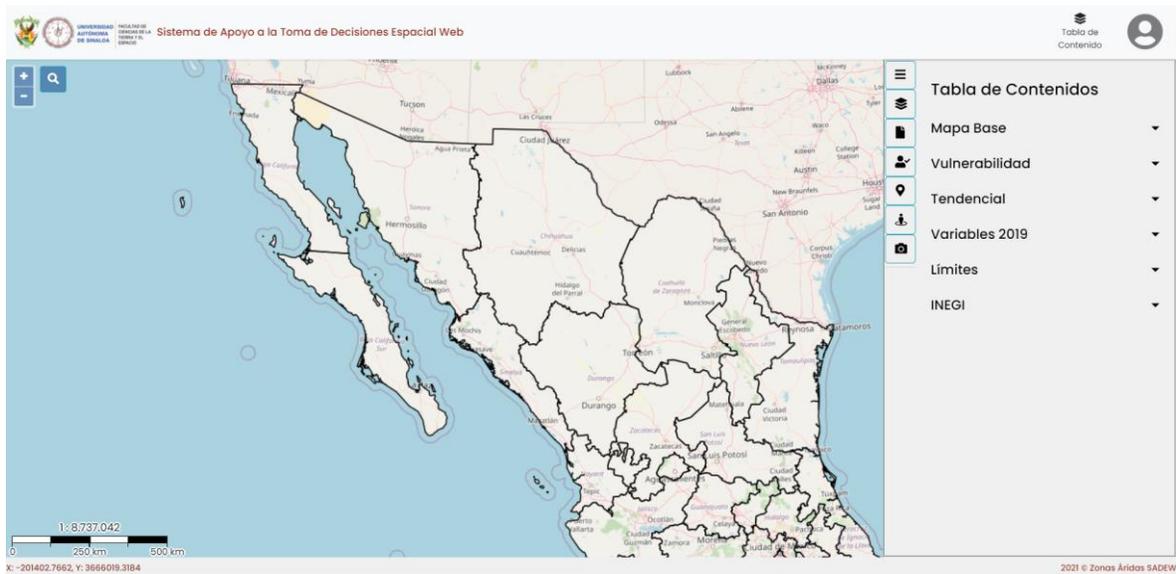


**Figura 39.** Acceso principal de la plataforma web.

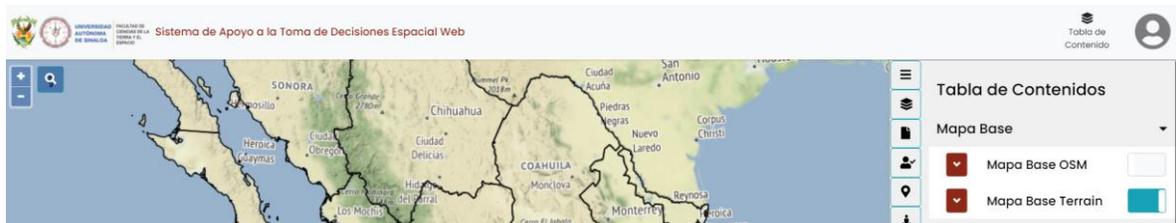
#### 5.3.1.2 Tabla de contenido

En la tabla de contenido se encuentran todas las capas mostradas y por mostrar (cuando se realice una búsqueda en específico). Esta sección se desarrolló con código js (JavaScript) y CSS (Hojas de Estilo en Cascada por sus siglas en inglés Cascading Style Sheets), así como los mapas base, mapas de vulnerabilidad, variables y algunas capas predefinidas obtenidas de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

En la tabla de contenido se muestran todas las categorías correspondientes al monitoreo de regiones áridas, como: vulnerabilidad, tendencia, variables y algunos mapas base como límites y otras capas de interés obtenidas de INEGI (Figura 40 y 41).



**Figura 40.** Vista general y acceso a la tabla de contenido del geoportal web.



**Figura 41.** Mapas base.

### 5.3.1.3 Búsqueda

La búsqueda principal en el Geoportal web es por año, para lo cual se desarrolló un Webservices que incluye la búsqueda de información en la base de datos, si el año

consultado se encuentra, muestra todos los mapas correspondientes a ese año, tales como variables y mapas de vulnerabilidad. Por el contrario, si el año deseado no se encuentra en la base de datos procede a realizar todo el procesamiento desde la descarga hasta la visualización, siempre y cuando se encuentren datos disponibles en las plataformas fuentes de información.

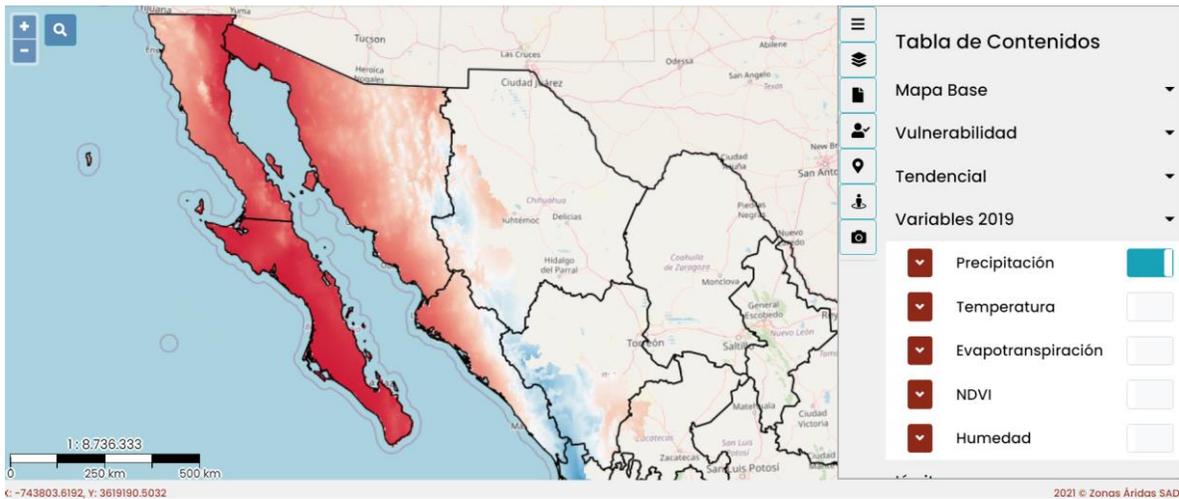
La búsqueda que se realiza por año, muestra todos los mapas correspondientes a ese año, tales como variables y mapas de vulnerabilidad, siempre y cuando exista la información en la base de datos, de lo contrario, genera toda la información (Figura 42, 43 y 44).



**Figura 42.** Búsqueda por año



**Figura 43.** Mapas de vulnerabilidad a aridez.



**Figura 44.** Muestra de variables del año consultado

#### 5.3.1.4 Escenario de tendencia

Para generar los mapas de tendencia a aridez, el usuario puede elegir el año al que se desea proyectar el escenario, de esta manera, el sistema realiza los cálculos correspondientes tomando como base los principales factores causantes de aridez,

para así desplegar los mapas que muestren una tendencia de esta condición (Figura 45).



Figura 45. Panel para generar mapas de tendencia a aridez.

### 5.3.1.5 Indicadores

Los indicadores que se generan en el sistema web son principalmente indicadores cuantitativos, los cuales muestran superficies de regiones áridas a diferentes niveles, mismos que se complementan con los mapas generados de aridez, tales como: Indicadores de aridez a nivel general (Figura 46), indicadores a nivel RHA (Figura 47), indicadores a nivel estatal (Figura 48), Indicadores a nivel municipal (Figura 49) e indicadores de uso de suelo.



REGIONES ÁRIDAS NOROESTE DE MÉXICO



INDICADORES CUANTITATIVOS DE ARIDEZ (SUPERFICIES EN km2)

Categorías	Superficie km2	Total
Hiperárido	1.75	1.75
Árido	312705.31	312705.31
Semiárido	183960.31	183960.31
Subhúmedo Seco	2394.62	2394.62
Húmedo	32.94	32.94
Total	499094.94	499094.94

Figura 46. Indicadores cuantitativos y geospaciales de aridez de la región Noroeste de México en PDF.



REGIONES ÁRIDAS A NIVEL REGION HIDROLÓGICO ADMINISTRATIVO



INDICADORES CUANTITATIVOS DE ARIDEZ (SUPERFICIES EN km2)

RHA / Categoría (superficie km2)	Hiperárido	Árido	Semiárido	Subhúmedo Seco	Húmedo	Total
<b>Península de Baja California</b>	0.0	128778.0	15588.0	0.0	0.0	144366.0
<b>Noroeste</b>	1.75	159298.75	46863.38	0.06	0.0	206163.94
<b>Pacífico Norte</b>	0.0	24628.56	121508.94	2394.56	32.94	148565.0
<b>Total</b>	1.75	312705.31	183960.31	2394.62	32.94	499094.94

Figura 47. Indicadores cuantitativos y geoespaciales de aridez a nivel RHA de la región Noroeste de México en PDF.



REGIONES ÁRIDAS A NIVEL ESTATAL



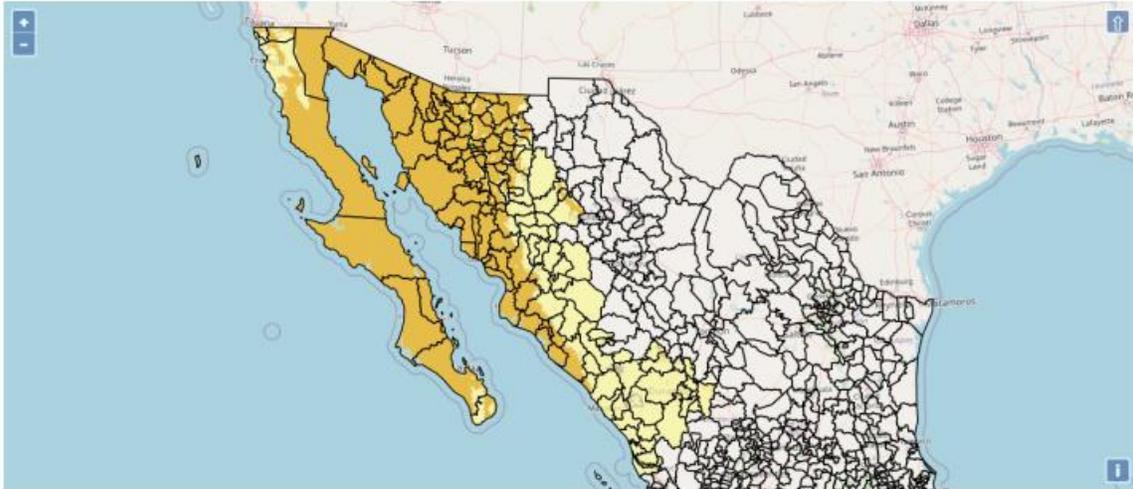
INDICADORES CUANTITATIVOS DE ARIDEZ (SUPERFICIES EN km2)

Estados / Categorías(Superficie km2)	Hiperárido	Árido	Semiárido	Subhúmedo Seco	Húmedo	Total
Sinaloa	0.0	22903.5	31547.06	426.56	6.88	54884.0
Sonora	1.75	156517.69	23781.25	0.0	0.0	180300.69
Zacatecas	0.0	523.31	3935.31	0.0	0.0	4458.62
Nayarit	0.0	0.0	8843.5	7.75	0.0	8851.25
Durango	0.0	853.5	48581.81	1960.31	26.06	51421.69
Chihuahua	0.0	2821.62	51641.19	0.0	0.0	54462.81
Baja California Sur	0.0	67621.94	3412.62	0.0	0.0	71034.56
Baja California	0.0	60952.19	12167.75	0.0	0.0	73119.94
<b>Total</b>	1.75	312705.31	183960.31	2394.62	32.94	499094.94

Figura 48. Indicadores cuantitativos y geospaciales de aridez a nivel estatal de la región Noroeste de México en PDF.



REGIONES ÁRIDAS A NIVEL REGION HIDROLÓGICO ADMINISTRATIVO



INDICADORES CUANTITATIVOS DE ARIDEZ (SUPERFICIES EN km2)

Estado	Municipio	Hiperárido	Árido	Semiárido	Subhúmedo Seco	Húmedo	Total
Baja California	Ensenada	0.0	11625.5	8341.5	0.0	0.0	19967.0
Baja California	Mexicali	0.0	14609.88	422.56	0.0	0.0	15032.44
Baja California	Tecate	0.0	1433.31	1468.25	0.0	0.0	2901.56
Baja California	Tijuana	0.0	516.62	570.88	0.0	0.0	1087.5
Baja California	Playas de Rosarito	0.0	65.56	446.56	0.0	0.0	512.12
Baja California	San Quintín	0.0	32900.19	1023.94	0.0	0.0	33924.12
Baja California Sur	Comondú	0.0	17139.81	7.38	0.0	0.0	17147.19
Baja California Sur	Mulegé	0.0	30655.38	3.19	0.0	0.0	30658.56
Baja California Sur	La Paz	0.0	13657.56	1440.0	0.0	0.0	15097.56
Baja California Sur	Los Cabos	0.0	1745.88	1962.5	0.0	0.0	3708.38
Baja California Sur	Loreto	0.0	4544.69	0.06	0.0	0.0	4544.75
Chihuahua	Batopilas de Manuel Gómez Morín	0.0	1.5	2119.94	0.0	0.0	2121.44
Chihuahua	Chinipas	0.0	0.94	1976.5	0.0	0.0	1977.44
Chihuahua	Guachochi	0.0	223.44	6687.25	0.0	0.0	6910.69
Chihuahua	Guadalupe y Calvo	0.0	0.0	9535.25	0.0	0.0	9535.25
Chihuahua	Guazapares	0.0	0.0	1811.88	0.0	0.0	1811.88
Chihuahua	Guerrero	0.0	1493.81	4205.12	0.0	0.0	5698.94

Figura 49. Indicadores cuantitativos y geospaciales de aridez a nivel Municipal de la región Nororeste de México en PDF.

### **5.3.1.6 Otras funcionalidades**

Además, se incluyen funciones como: identificación de capas la cual muestra los metadatos, geolocalización, captura de pantalla, la cual genera una imagen en formato jpg de lo que se está visualizando en el Geoportal, descarga de información, la cual permite descargar un archivo de tipo Zip el cual contiene el archivo shapefile del mapa a descargar. Contiene además la herramienta de Open Street Maps, la cual se enlaza con el api de google Maps.

## Capítulo VI. Conclusiones y futuras líneas de investigación

El aumento de la aridez es una causa inevitable de desertificación, ya sea indirectamente a través de una mayor variabilidad de las precipitaciones, así como, directamente a través de sequías prolongadas. Es por ello, que diversos estudios se han basado en datos climáticos para identificar la distribución global de regiones áridas.

Tal condición amenaza a muchos lugares del mundo y en México no es una excepción. Además, la gravedad de la aridez es alta en esta área de estudio, ya que la mayor parte de las regiones áridas se encuentran sobre suelos degradados que amenazan con expandirse si se siguen llevando las mismas prácticas sobre el uso del suelo y el manejo de los recursos hídricos en estas regiones.

Esta investigación utilizó un modelo geoespacial basado en el método de evaluación multicriterio y en la técnica sumatoria lineal ponderada para la identificación de regiones áridas y semiáridas a nivel local, utilizando variables climáticas, ambientales y territoriales globales, las cuales se integraron para obtener el mapa vulnerabilidad a aridez. Como periodo de evaluación se tomó el año 2020 (más reciente con datos disponibles al momento de realizar este estudio), sin embargo, este análisis se puede realizar para cualquier año siempre y cuando existan datos disponibles.

El mapa de zonas áridas resultante proporciona información relevante sobre el estado actual de estas regiones ya que los resultados mostraron que en la región noroeste de México predominan zonas semiáridas y subhúmedas secas, que comparados con estudios previos de zonas áridas no están tan alejados de la realidad, tal es el caso del Atlas de zonas áridas de México (SAGARPA & SIAP, 2014), el mapa de climas de INEGI (INEGI, 2008) y el mapa de rangos de humedad del portal de geoinformación de CONABIO (CONABIO, 1990).

A nivel hidrológico administrativo, los resultados mostraron que las regiones más afectadas con condiciones áridas y semiáridas se encuentran en la RHA Península de

Baja California y Noroeste, por su parte, a nivel estatal, estados más afectados con tales condiciones son los estados de Baja California, Baja California Sur y Sonora, parte de Sinaloa y Durango.

Además, se considera importante modelar con precisión cada una de las variables con respecto a sus impactos sobre las amenazas de aridez. Así mismo, los trabajos futuros deberían centrarse en una evaluación más detallada que considere la cobertura vegetal, los recursos hídricos, el clima local y otros indicadores socioeconómicos en la evaluación de los peligros de esta condición. Por lo tanto, esta investigación será útil para facilitar que los investigadores y los responsables políticos contribuyan al uso de los recursos hídricos terrestres naturales de manera sostenible para proteger el ecosistema y mejorar la economía de la región.

Por su parte, el cambio climático es la principal causa de la aridez a nivel global (Abrha & Hagos, 2019; Maliva & Missimer, 2012) y es considerado una grave amenaza para el medio ambiente y la humanidad (Bagheri et al., 2019). Estudios realizados prevén que esta problemática afecte la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración potencial y, por lo tanto, afecte la ocurrencia y la severidad de la sequía (Abrha & Hagos, 2019) por tal motivo, las regiones áridas se ven amenazadas por esta condición además de enfrentar otros problemas como la desertificación y la degradación del suelo, por lo que estos ecosistemas son muy sensibles a variabilidad climática y al cambio ambiental global (Pontifes et al., 2018).

Las regiones áridas del noroeste de México también se ven afectadas por dichos cambios, lo cual genera gran impacto principalmente ambiental, social y económico (Del-Toro-Guerrero & Kretzschmar, 2020; Ortega-Gaucin et al., 2018). Es por ello que se han realizado diversos estudios de zonas áridas utilizando diferentes índices de (Campos-Aranda, 2016; Díaz-Padilla et al., 2011; Diéguez et al., 2014; SEMARNAT, 2014.; Tabari et al., 2014), sin embargo, no se han generado modelos de tendencia de esta condición que permita conocer el estado de las zonas áridas a mediano y largo plazo, por lo cual, los mapas de tendencia del modelo propuesto en este estudio proporcionan información importante y de utilidad sobre el estado futuro de las

regiones secas para el noroeste de México ya que las zonas áridas y semiáridas seguirán predominando con un aumento de la aridez, así mismo, se presenta una disminución de las regiones húmedas.

De igual forma, el análisis temporal y los datos obtenidos del modelo de tendencia a aridez de acuerdo con las series de tiempo de datos históricos analizados, mostraron un aumento en la temperatura y evapotranspiración a corto y largo plazo, así como también una disminución en la precipitación, humedad y cobertura vegetal, representando una tendencia al aumento de regiones áridas, mismas que se localizan dentro del desierto de Sonora, en su mayoría en la zona noroeste y centro del área de estudio, en las cuales predominan los climas de tipo seco y semiseco.

Por su parte, las regiones subhúmedas secas y húmedas enfrentan una disminución de superficie, localizadas al sureste de la región y ubicadas en su mayor parte en el estado de Chihuahua, lo cual determina que las simulaciones del modelo geoespacial resultantes son lógicas.

Por lo tanto, podemos afirmar que los métodos empleados ayudaron a generar información apreciable para resolver problemas de manejo de regiones áridas y plantear objetivos óptimos a esta problemática. Así mismo, las técnicas de EMC aplicadas fueron fundamentales para el desarrollo del modelo de tendencia a aridez. Por ello, el resultado de este modelo geoespacial nos permitió estimar las tasas de cambio de los factores de aridez y a su vez se logró generar mapas de vulnerabilidad a aridez hacia los años 2030 y 2050, tomando como base el año 2020.

De tal forma que, la información generada en esta investigación sirve como indicadores para tomar decisiones importantes en el manejo, mitigación y planificación y adaptación a los ecosistemas áridos, que están directamente relacionadas con el cambio climático a nivel local, regional y global. Además, el modelo resultante, proporciona información importante sobre los potenciales impactos ambientales, territoriales, económicos y sociales que podría ocasionar el aumento de la aridez en el

noroeste de México, así como plantearse políticas de planificación y alternativas de desarrollo de un punto de vista más sustentables.

Por tal motivo, los resultados obtenidos muestran que este tipo de estudios pueden contribuir de manera importante al manejo de los ecosistemas áridos y de apoyo a la toma de decisiones, ya que aportan información sobre una aproximación del estado futuro de las regiones áridas y semiáridas. Una de las principales aportaciones de esta investigación, fue la simulación de un modelo geoespacial de tendencia que contempla unos de los procesos de gran importancia dentro de las tierras secas como lo es la aridez, utilizando algunos aspectos metodológicos novedosos a la problemática que enfrenta el noroeste de México.

Por su parte, en este estudio se analizaron las variaciones a través del tiempo de las diferentes factores que intervienen en el proceso de aridez, el cual arroja que las regiones subhúmedas secas y húmedas seguirán perdiendo superficie, favoreciendo al aumento de las regiones áridas, esto podía considerarse como una alerta y poner mayor atención en estas estadísticas, ya que de seguir la tendencia hacia la pérdida de humedad, podrían acentuarse situaciones de sequía, lo que provocaría problemas mayores como la degradación de las regiones objeto de este estudio.

Por otro lado, es importante resaltar que, la simulación del modelo de tendencia requirió de un esfuerzo importante, sobre todo para analizar los criterios y sus variaciones a través del tiempo y con ello, determinar una aproximación a futuro, además, puede servir para discutir exhaustivamente sobre la problemática que puede ocasionar el aumento de aridez en el territorio ya que los escenarios futuros que contemplan aspectos de aridez, sequía y degradación del suelo están bajo sistemas, cuestiones sociales y ecológicas interrelacionadas.

Asimismo, el planteamiento metodológico seguido para la implementación de los escenarios planteados es factible de ser utilizado para generar otras líneas evolutivas

que podrían ser propuestas por las instituciones involucradas en la planificación y manejo de regiones áridas.

Finalmente, se puede decir que la metodología utilizada en este análisis se presenta como la base para generar, integrar y modelar variables geoespaciales que favorecen el proceso de aridez y además puede ser considerada una alternativa para el estudio continuo de las regiones áridas a futuro, misma que puede ser aplicable a nivel global, ya que las variables consideradas se presentan de manera global y con esto apoyar en la toma de decisiones territorial, ambiental y económico y sobre todo, ser de gran apoyo para el desarrollo de políticas públicas para mitigar el impacto y efecto de la aridez en la región, así como también, tomar medidas de adaptación que garanticen el bienestar humano, ambiental, económico y social en esas regiones con el fin de proveer información actualizada para la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos de la región.

## Referencias

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data* 2018 5:1, 5(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Abrha, H., & Hagos, H. (2019). Future drought and aridity monitoring using multi-model approach under climate change in Hintalo Wejerat district, Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 5(4), 1963–1972. <https://doi.org/10.1007/S40899-019-00350-1/FIGURES/4>
- Aburas, M. M., Ho, Y. M., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (2016). The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 380–389. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2016.07.007>
- AdapteCCa. (2019). *Visor de Escenarios de Cambio Climático*. Visor de Escenarios de Cambio Climático. <http://escenarios.adaptecca.es/info>
- Akbari, M., Neamatollahi, E., & Neamatollahi, P. (2019). Evaluating land suitability for spatial planning in arid regions of eastern Iran using fuzzy logic and multi-criteria analysis. *Ecological Indicators*, 98, 587–598. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.035>
- Aldababseh, A., Temimi, M., Maghelal, P., Branch, O., & Wulfmeyer, V. (2018). Multi-criteria evaluation of irrigated agriculture suitability to achieve food security in an arid environment. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/su10030803>
- An, Q., He, H., Nie, Q., Cui, Y., Gao, J., Wei, C., Xie, X., & You, J. (2020). Spatial and Temporal Variations of Drought in Inner Mongolia, China. *Water* 2020, Vol. 12, Page 1715, 12(6), 1715. <https://doi.org/10.3390/W12061715>
- Apache. (2021). *Welcome! - The Apache HTTP Server Project*. <https://httpd.apache.org/>
- Arámbula, L. A. T. (2005). *PROBLEMÁTICA Y ALTERNATIVAS DE DESARROLLO DE LAS ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS DE MÉXICO*. <https://www.redalyc.org/pdf/4555/455545052003.pdf>
- Arreguín Cortés, F. I., López Pérez, M., Rodríguez López, O., & Montero Martínez, M. J. (2015). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. <https://bpo.sep.gob.mx/#/recurso/526/document/1>
- Asadi Zarch, M. A., Sivakumar, B., & Sharma, A. (2015). Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). *Journal of Hydrology*, 526, 183–195. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2014.09.071>

- Astaburuaga G., R. (2004). El agua en las zonas áridas de Chile. *ARQ (Santiago)*, 57, 68–73. <https://doi.org/10.4067/S0717-69962004005700018>
- Aydi, A. (2018). Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using a GIS-based multi-criteria decision analysis. *Groundwater for Sustainable Development*, 7, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.06.003>
- Azareh, A., Rafiei Sardooi, E., Choubin, B., Barkhori, S., Shahdadi, A., Adamowski, J., & Shamshirband, S. (2019). Incorporating multi-criteria decision-making and fuzzy-value functions for flood susceptibility assessment. *Geocarto International*, 34. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1695958>
- Bagheri, M., Zaiton Ibrahim, Z., Bin Mansor, S., Abd Manaf, L., Badarulzaman, N., & Vaghefi, N. (2019). Shoreline change analysis and erosion prediction using historical data of Kuala Terengganu, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 78(15), 1–21. <https://doi.org/10.1007/S12665-019-8459-X/FIGURES/9>
- Belkin, M., Rakhlin, A., & Tsybakov, A. B. (2020). Does data interpolation contradict statistical optimality? *A/STATS 2019 - 22nd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*.
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N., & Perroni, Y. (2018). Biomass and productivity in mexican arid lands. *Madera y Bosques*, 24(Special Issue). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Campos-Aranda, D. F. (2016). Estudio de sequías meteorológicas anuales por medio del índice de aridez, en el estado de Zacatecas, México. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(3), 405–417. <https://doi.org/10.1016/J.RIIT.2016.07.010>
- Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Arteaga-Ramírez, R., & Vázquez-Peña, M. A. (2017). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 08(1), 35–52. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-03>
- Charabi, Y., & Gastli, A. (2011). PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*, 36(9), 2554–2561. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.037>
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., & von Maltitz, G. (2018). *World Atlas of Desertification* (3rd ed.). Office of the European Union. <https://wad.jrc.ec.europa.eu/download>
- Christensen, H., Bachand, C. L., & Walsh, J. E. (2022). Extreme Precipitation Events in Alaska: Historical Trends and Projected Changes. *Atmosphere 2022, Vol. 13, Page 388*, 13(3), 388. <https://doi.org/10.3390/ATMOS13030388>
- Conabio. (2020). *Portal de Información Geográfica - CONABIO*.
- CONABIO. (1990). *Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad [14,117] - CONABIO*. Portal de Geoinformación. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

- CONAFOR. (2013). Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación. In *Informe final* (Vol. 136, Issue 1, p. 160). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- CONAFOR. (2015). *La Comisión Nacional de las Zonas Áridas (CONAZA) | Innovación Forestal*. Revista Electrónica de Divulgación Científica Forestal. [https://www.conafor.gob.mx/innovacion\\_forestal/?p=2177](https://www.conafor.gob.mx/innovacion_forestal/?p=2177)
- CONAGUA. (2012a). *Región Hidrológico-Administrativa I Península de Baja California*. <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/1-sgp-17-12pbc.pdf>
- CONAGUA. (2012b). *Región Hidrológico-Administrativa II Noroeste*. [www.semarnat.gob.mxwww.conagua.gob.mxwww.conagua.gob.mx/conagua07/temas/programashidricosregionales2030.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/www.conagua.gob.mx/www.conagua.gob.mx/conagua07/temas/programashidricosregionales2030.pdf)
- CONAGUA. (2012c). *Región Hidrológico-Administrativa III Pacífico Norte*. [www.semarnat.gob.mxwww.conagua.gob.mxwww.conagua.gob.mx/conagua07/temas/programashidricosregionales2030.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/www.conagua.gob.mx/www.conagua.gob.mx/conagua07/temas/programashidricosregionales2030.pdf)
- CONAGUA. (2019). *Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)*. Comisión Nacional Del Agua, Gobierno de México. <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/spi>
- CONAGUA. (2022). *Monitor de Sequía en México*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- CONAGUA, & UNAM. (2019). *Monitor de Sequía Multivariado en México (MoSeMM)*. CONAGUA. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/monitor-de-sequia-multi-parametrico-de-mexico-mosemm?state=published>
- CONAZA. (2019a). *Firman convenio de coordinación CONAZA y Financiera Nacional de Desarrollo, con impacto directo en pequeños productores | Comisión Nacional de Zonas Áridas | Gobierno | gob.mx*. <https://www.gob.mx/conaza/prensa/firman-convenio-de-coordinacion-conaza-y-financiera-nacional-de-desarrollo-con-impacto-directo-en-pequenos-productores-191526>
- CONAZA. (2019b). *Participa CONAZA en acciones para mejorar el uso y conservación sustentable del suelo y agua en Zacatecas | Comisión Nacional de Zonas Áridas | Gobierno | gob.mx*. <https://www.gob.mx/conaza/prensa/participa-conaza-en-acciones-para-mejorar-el-uso-y-conservacion-sustentable-del-suelo-y-agua-en-zacatecas>
- Criado, M., Martínez-Graña, A., Santos-Francés, F., Valeda, S., & Zazo, C. (2017). Multi-criteria analyses of urban planning for city expansion: A case study of Zamora, Spain. *Sustainability (Switzerland)*, 9(10), 1850. <https://doi.org/10.3390/su9101850>
- Csábrági, A., Molnár, S., Tanos, P., & Kovács, J. (2017). Application of artificial neural networks to the forecasting of dissolved oxygen content in the Hungarian section

- of the river Danube. *Ecological Engineering*, 100, 63–72. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2016.12.027>
- D’Odorico, P., Bhattachan, A., Davis, K. F., Ravi, S., & Runyan, C. W. (2013). Global desertification: Drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources*, 51, 326–344. <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2012.01.013>
- Dadhich, A. P., Goyal, R., & Dadhich, P. N. (2021). Assessment and Prediction of Groundwater using Geospatial and ANN Modeling. *Water Resources Management*, 35(9), 2879–2893. <https://doi.org/10.1007/S11269-021-02874-8/FIGURES/7>
- Davies, J., Poulsen, L., Schulte-Herbrüggen, B., Mackinnon, K., Crawhall, N., Henwood, W. D., Dudley, N., Smith, J., & Gudka, M. (2012). *Conservación de la biodiversidad de las tierras áridas*. [https://cmsdata.iucn.org/downloads/drylands\\_book\\_spanish\\_march\\_2014.pdf](https://cmsdata.iucn.org/downloads/drylands_book_spanish_march_2014.pdf)
- De Pauw, E., Göbel, W., & Adam, H. (2000). Agrometeorological aspects of agriculture and forestry in the arid zones. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(1–2), 43–58. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00118-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00118-0)
- Del-Toro-Guerrero, F. J., & Kretzschmar, T. (2020). Precipitation-temperature variability and drought episodes in northwest Baja California, México. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100653. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2019.100653>
- Díaz-Padilla, G., Sánchez-Cohen, I., Guajardo-Panes, R. A., Del Ángel-Pérez, A. L., Ruíz-Corral, A., Medina-García, G., & Ibarra-Castillo, D. (2011). Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVII(Especial), 267–275. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.069>
- Diéguez, E. T., Mancera, G. M., Falcón, A. C., Garibay, A. N., Valdez Cepeda, R. D., García Hernández, J. L., & Amador, B. M. (2014). Análisis de la sequía y desertificación mediante índices de aridez y estimación de la brecha hídrica en Baja California Sur, noroeste de México. *Investigaciones Geográficas*, 85(85), 66–81. <https://doi.org/10.14350/rig.32404>
- Dunkerley, D. (2020). The Ecohydrology of Desert Environments: What Makes it Distinctive? In S. E. Michael I Goldstein, Dominick A DellaSala (Ed.), *Encyclopedia of the World’s Biomes* (first, pp. 23–35). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11803-2>
- Easdale, M. H., López, D. R., Bianchi, E., Bruzone, O., Villagra, S. E., Siffredi, G. L., Gaitán, J. J., Umaña, F., & Oricchio, P. (2012). Una herramienta para monitorear sequías en regiones áridas y semiáridas de Patagonia Norte. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, vol.38(2). [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1669-23142012000200010&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1669-23142012000200010&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Etemadi, S., & Khashei, M. (2021). Etemadi multiple linear regression. *Measurement*,

186, 110080. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2021.110080>

- FAO. (1992). *Marco internacional de programas de cooperación para la agricultura y el desarrollo rural sostenibles*. <http://www.fao.org/3/V0265S/V0265S05.htm>
- FAO. (1993). *Desarrollo sostenible de tierras áridas y lucha contra la desertificación*. <http://www.fao.org/3/V0265S/V0265S00.htm>
- FAO. (2007). *Secuestro de carbono en tierras áridas*. <http://www.fao.org/3/Y5738s/Y5738s.pdf>
- FAO. (2019a). *Análisis y comentarios relativos al Capítulo 12 del Programa 211. Ordenación de los ecosistemas frágiles: lucha contra la desertificación y la sequía*. 2019. <http://www.fao.org/3/V0265S/V0265s06.htm>
- FAO. (2019b). *Desarrollo sostenible de tierras áridas y lucha contra la desertificación*. <http://www.fao.org/3/V0265S/V0265S04.htm>
- FAO. (2020, September). *Elaboración de un programa mundial sobre agricultura sostenible en zonas áridas en colaboración con el Marco mundial sobre la escasez de agua en la agricultura en un clima cambiante*. COAG. <http://www.fao.org/3/nd412es/nd412es.pdf>
- Feizizadeh, B., & Blaschke, T. (2013). GIS-multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: Comparing three methods for the Urmia lake basin, Iran. *Natural Hazards*, 65(3), 2105–2128. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0463-3>
- Fernandez, J. P. R., Franchito, S. H., & Rao, V. B. (2019). Future Changes in the Aridity of South America from Regional Climate Model Projections. *Pure and Applied Geophysics*, 176(6), 2719–2728. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02108-4>
- Gaur, M. K., & Squires, V. R. (2017). Geographic extent and characteristics of the world's arid zones and their peoples. In *Climate Variability Impacts on Land Use and Livelihoods in Drylands* (pp. 3–20). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56681-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56681-8_1)
- Gaur, M. K., & Squires, V. R. (2018a). *Climate Variability Impacts on Land Use and Livelihoods in Drylands*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56681-8>
- Gaur, M. K., & Squires, V. R. (2018b). Geographic Extent and Characteristics of the World's Arid Zones and Their Peoples. In *Climate Variability Impacts on Land Use and Livelihoods in Drylands* (pp. 3–20). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56681-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56681-8_1)
- Gavrilov, M. B., Lukić, T., Janc, N., Basarin, B., & Marković, S. B. (2019). Forestry Aridity Index in Vojvodina, North Serbia. *Open Geosciences*, 11(1), 367–377. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0029>
- Gebremedhin, M. A., Gebrerufael, -, Kahsay, H., Hailemariam, -, & Fanta, G. (2018). Assessment of spatial distribution of aridity indices in Raya valley, northern Ethiopia. *Springer*, 8, 217. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0868-6>
- GeoServer. (2021). *GeoServer*. <http://geoserver.org/>

- Girvetz, E. H., & Zganjar, C. (2014). Dissecting indices of aridity for assessing the impacts of global climate change. *Climatic Change*, 126(3–4), 469–483. <https://doi.org/10.1007/S10584-014-1218-9/FIGURES/9>
- González Medrano, F. (2012). *Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://agua.org.mx/biblioteca/las-zonas-aridas-y-semiari-das-de-mexico-y-su-vegetacion/>
- Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M. Á., Vázquez-Alarcón, A., & Ruíz-Puga, P. (2013). LOS PROCESOS DE DESERTIFICACIÓN Y LAS REGIONES ÁRIDAS. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XIX(1), 45–66. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.10.077>
- Greve, P., Roderick, M. L., Ukkola, A. M., & Wada, Y. (2019). The aridity Index under global warming. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AB5046>
- Gutiérrez-Ruacho, O. G., Brito-Castillo, ; L, Sahagún, ; L Villarruel, & Troyo-Diéguéz, ; E. (2012). DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN Y SU RELACIÓN CON LA VEGETACIÓN DEL ESTADO DE SONORA SPATIAL DISTRIBUTION OF TEMPERATURE AND PRECIPITATION AND ITS RELATIONSHIP TO VEGETATION IN THE STATE OF SONORA. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 2, 106–111. <http://www.chapingo.mx/revistas>
- Gutiérrez, M., & Rodríguez, J. (2015). Metodología para la elaboración del mapa de aridez del estado nueva esparta, venezuela. *Terra Nueva Etapa*. <https://www.redalyc.org/pdf/721/72142329007.pdf>
- Henríquez, Cristián, Azócar, G., & Aguayo, M. (2006). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 36, 61–74. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022006000200004>
- Henríquez, Cristian, Azócar, G., & Romero, H. (2006). Monitoring and modeling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. *Habitat International*, 30(4), 945–964. <https://doi.org/10.1016/J.HABITATINT.2005.05.002>
- Hernández-Clemente, R., & Hornero, A. (2021). Monitoreo y evaluación de la desertificación con teledetección. *Ecosistemas*, 30(3), 2240–2240. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2240>
- INECC. (2007). *Instituto Nacional de Ecología - Bioclimatología*. 2007. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/451/cap3.html>
- INEGI. (2008). *Climatología*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- INEGI. (2015). Población-INEGI. In *Censos y conteos. Población y Vivienda*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>

- INEGI. (2021). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI*. INEGI; Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/>
- IPCC. (2020). *El Informe Especial del IPCC sobre Cambio Climático y la Tierra*. [https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/WEB-IPCC-Land\\_Latin-America\\_Spanish\\_24March2020.pdf](https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/WEB-IPCC-Land_Latin-America_Spanish_24March2020.pdf)
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). *Linear Regression*. In: *An Introduction to Statistical Learning. Springer Texts in Statistics*. 59–128. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1418-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1418-1_3)
- Jat, M. K., Garg, P. K., & Khare, D. (2008). Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10(1), 26–43. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2007.04.002>
- Jiang, G., Gu, X., Zhao, D., Xu, J., Yang, C., Wang, S., Li, Y., Li, B.-L., Jiang, C. :, Gu, G. :, Zhao, X. :, Xu, D. :, Yang, J. :, Wang, C. :, Li, S. :, & Li, Y. ; (2021). The Study of Drought in Future Climate Scenarios in the Huang-Huai-Hai Region. *Water* 2021, Vol. 13, Page 3474, 13(23), 3474. <https://doi.org/10.3390/W13233474>
- Kahsay, A., Haile, M., Gebresamuel, G., & Mohammed, M. (2018). GIS-based multi-criteria model for land suitability evaluation of rainfed teff crop production in degraded semi-arid highlands of Northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(4), 1467–1486. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0499-9>
- Kimura, R., & Moriyama, M. (1976). *Recent Trends of Annual Aridity Indices and Classification of Arid Regions with Satellite-Based Aridity Indices*. <https://doi.org/10.1007/s41976-019-00014-w>
- Kumari, N., Srivastava, A., & Dumka, U. C. (2021). A Long-Term Spatiotemporal Analysis of Vegetation Greenness over the Himalayan Region Using Google Earth Engine. *Climate* 2021, Vol. 9, Page 109, 9(7), 109. <https://doi.org/10.3390/CLI9070109>
- Kuncheva, L. I. (1996). *Fuzzy sets*. 79–115. [https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1850-5\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1850-5_4)
- Lilia Magaña, A., Eduardo Morales Santos, A., & Sánchez Rodríguez, R. A. (2014). *Desarrollo de Estrategias de Adaptación al Cambio Climático en Municipios Vulnerables del Noroeste de México*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/106830/CGACC\\_2015\\_No.3\\_Analisis\\_clima\\_regional.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/106830/CGACC_2015_No.3_Analisis_clima_regional.pdf)
- Lin, H., Wang, J., Li, F., Xie, Y., Jiang, C., & Sun, L. (2020). Drought Trends and the Extreme Drought Frequency and Characteristics under Climate Change Based on SPI and HI in the Upper and Middle Reaches of the Huai River Basin, China. *Water* 2020, Vol. 12, Page 1100, 12(4), 1100. <https://doi.org/10.3390/W12041100>
- Llanes Cárdenas, O. (2012). *Análisis espectrales de indicadores de acuíferos asociados a ecosistemas de zonas áridas en el Noroeste de México* [Centro de

investigaciones Biológicas del Noroeste, C.c.].  
[http://dSPACE.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/297/llanes\\_o.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dSPACE.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/297/llanes_o.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Lobato-Sánchez, R. (2016). El monitor de la sequía en México. In *Tecnología y ciencias del agua* (Vol. 7, Issue 5). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222016000500197](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500197)
- Lobato Sánchez, R., Altamirano del Carmen, M. Á., Hoyos Reyes, C., López Pérez, M., Salas Salinas, M. A., & Rosario de la Cruz, J. G. (2019). Procedimientometodológicopara la elaboración de un monitor de la persistencia de la sequía en México. *Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua*. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-01-06>
- López Beltrán, M. A., Aguilar Villegas, J. M., & Plata Rocha, W. (2016, June). Integración de imágenes del sensor MODIS y cartografía temática para la simulación de modelos geospaciales para obtener zonas propensas a desertificación en el Estado de Sinaloa, México. *Revista Cartográfica* 92 , 173–189. [https://www.researchgate.net/publication/315453961\\_Integracion\\_de\\_imagenes\\_del\\_sensor\\_MODIS\\_y\\_cartografia\\_tematica\\_para\\_simulacion\\_de\\_modelos\\_geoespaciales\\_para\\_obtener\\_zonas\\_propensas\\_a\\_desertificacion\\_en\\_el\\_estado\\_de\\_Sinaloa\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/315453961_Integracion_de_imagenes_del_sensor_MODIS_y_cartografia_tematica_para_simulacion_de_modelos_geoespaciales_para_obtener_zonas_propensas_a_desertificacion_en_el_estado_de_Sinaloa_Mexico)
- Maestre, F. T., Quero, J. L., Gotelli, N. J., Escudero, A., Ochoa, V., Delgado-Baquerizo, M., García-Gómez, M., Bowker, M. A., Soliveres, S., Escolar, C., García-Palacios, P., Berdugo, M., Valencia, E., Gozalo, B., Gallardo, A., Aguilera, L., Arredondo, T., Blones, J., Boeken, B., ... Zaady, E. (2012). Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands. *Science*, 335(6065), 214–218. <https://doi.org/10.1126/science.1215442>
- Maestre, F. T., Salguero-Gómez, R., & Quero, J. L. (2012). It is getting hotter in here: Determining and projecting the impacts of global environmental change on drylands. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1606), 3062–3075. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0323>
- Manguet, M. (1999). Aridity. In *Aridity*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03906-9>
- Maliva, R., & Missimer, T. (2012). *Aridity and Drought* (pp. 21–39). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-29104-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29104-3_2)
- Maryati, I., Sumartini, T. S., & Sofyan, D. (2021). Experiences of Pearson formula in analysis regression. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1098(3), 032088. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1098/3/032088>
- Mas, J.-F., Lemoine-Rodríguez, R., Taud, H., Mas, J.-F., Lemoine-Rodríguez, R., & Taud, H. (2016). Toward a near-real time forest monitoring system [Technical note]. *Investigaciones Geográficas*, 2016(91), 168–175.

<https://doi.org/10.14350/RIG.56889>

- Maulud, D. H., & Mohsin Abdulazeez, A. (2020). A Review on Linear Regression Comprehensive in Machine Learning. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 1(4), 140–147. <https://doi.org/10.38094/jastt1457>
- McNally, A., Arsenault, K., Kumar, S., Shukla, S., Peterson, P., Wang, S., Funk, C., Peters-Lidard, C. D., & Verdin, J. P. (2017). A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications. *Scientific Data* 2017 4:1, 4(1), 1–19. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.12>
- Mercado Mancera, G., Troyo Diéguez, E., Aguirre Gómez, A., Murillo Amador, B., Beltrán Morales, L., & García Hernández, J. (2010). Calibración y aplicación del índice de aridez de De Martonne para el análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y desertificación en zona áridas. *SciELO*, 26(1), 51–64. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792010000100004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792010000100004)
- Monjardin-Armenta, S. A., Plata-Rocha, W., Pacheco-Angulo, C. E., Franco-Ochoa, C., & Peraza, J. G. R. (2020). Geospatial simulation model of deforestation and reforestation using multicriteria evaluation. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su122410387>
- Nabati, J., Nezami, A., Neamatollahi, E., & Akbari, M. (2020). GIS-based agro-ecological zoning for crop suitability using fuzzy inference system in semi-arid regions. *Ecological Indicators*, 117, 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106646>
- NIDIS. (2019). *North American Drought Monitor*. North American Drought Monitor (NADM). <https://www.drought.gov/nadm/content/map/2019/09>
- NU. (1994). *CONVENCION INTERNACIONAL DE LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACION EN LOS PAISES AFECTADOS POR SEQUIA GRAVE O DESERTIFICACION, EN PARTICULAR EN AFRICA*. [https://observatoriop10.cepal.org/sites/default/files/documents/treaties/unccd\\_sp.pdf](https://observatoriop10.cepal.org/sites/default/files/documents/treaties/unccd_sp.pdf)
- NU. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Nunes de Oliveira, S., Abílio de Carvalho Júnior, O., Trancoso Gomes, R. A., Fontes Guimarães, R., & McManus, C. M. (2017). Deforestation analysis in protected areas and scenario simulation for structural corridors in the agricultural frontier of Western Bahia, Brazil. *Land Use Policy*, 61, 40–52. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2016.10.046>
- ONU. (2015). *ONU México » Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <http://www.onu.org.mx/agenda-2030/objetivos-del-desarrollo-sostenible/>
- ONU. (2019). *¿Qué son las zonas secas? | Forestería en las tierras secas |*

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. FAO. <http://www.fao.org/dryland-forestry/background/what-are-drylands/es/>

- Orr B.J., A.L. Cowie, V.M. Castillo Sánchez, P. Chasek, N.D. Crossman, A. Erlewein, G. Louwagie, M. Maron, G.I. Metternicht, S. Minelli, A.E. Tengberg, S. Walter, & and S. Welton. (2017). *MARCO CIENTÍFICO CONCEPTUAL PARA LA NEUTRALIDAD EN LA DEGRADACIÓN DE LAS TIERRAS* (Vol. 112).
- Ortega-Gaucin, D., Bartolón, J. D. la C., & Bahena, H. V. C. (2018). Drought Vulnerability Indices in Mexico. *Water* 2018, Vol. 10, Page 1671, 10(11), 1671. <https://doi.org/10.3390/W10111671>
- Overmars, K. P., & Verburg, P. H. (2006). Multilevel modelling of land use from field to village level in the Philippines. *Agricultural Systems*, 89(2–3), 435–456. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2005.10.006>
- Özkan, B., Dengiz, O., & Turan, İ. D. (2020). Site suitability analysis for potential agricultural land with spatial fuzzy multi-criteria decision analysis in regional scale under semi-arid terrestrial ecosystem. *Scientific Reports* 2020 10:1, 10(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79105-4>
- Panday, P. K., Coe, M. T., Macedo, M. N., Lefebvre, P., & Castanho, A. D. d. A. (2015). Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, 523, 822–829. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2015.02.018>
- Patel, M., Kok, K., & Rothman, D. S. (2007). Participatory scenario construction in land use analysis: An insight into the experiences created by stakeholder involvement in the Northern Mediterranean. *Land Use Policy*, 24(3), 546–561. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2006.02.005>
- Pei, F., Zhou, Y., & Xia, Y. (2021). Application of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for the Detection of Extreme Precipitation Change. *Forests* 2021, Vol. 12, Page 594, 12(5), 594. <https://doi.org/10.3390/F12050594>
- Perez-Aguilar, L. Y., Plata-Rocha, W., Monjardin-Armenta, S. A., Franco-Ochoa, C., & Zambrano-Medina, Y. G. (2021). The Identification and Classification of Arid Zones through Multicriteria Evaluation and Geographic Information Systems—Case Study: Arid Regions of Northwest Mexico. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2021, Vol. 10, Page 720, 10(11), 720. <https://doi.org/10.3390/IJGI10110720>
- PNUD. (2015). *Objetivo 15: Vida en la tierra | El PNUD en México*. <http://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/post-2015/sdg-overview/goal-15.html>
- Pontifes, P. A., García-Meneses, P. M., Gómez-Aíza, L., Monterroso-Rivas, A. I., Caso-Chávez, M., Pontifes, P. A., García-Meneses, P. M., Gómez-Aíza, L., Monterroso-Rivas, A. I., & Caso-Chávez, M. (2018). Land use/land cover change and extreme climatic events in the arid and semi-arid ecoregions of Mexico. *Atmósfera*, 31(4), 355–372. <https://doi.org/10.20937/ATM.2018.31.04.04>

- Pontius, R. G., & Cheuk, M. L. (2007a). A generalized cross-tabulation matrix to compare soft-classified maps at multiple resolutions. *Eng. Remote Sens*, 20(1), 1–30. <https://doi.org/10.1080/13658810500391024>
- Pontius, R. G., & Cheuk, M. L. (2007b). A generalized cross-tabulation matrix to compare soft-classified maps at multiple resolutions. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/13658810500391024*, 20(1), 1–30. <https://doi.org/10.1080/13658810500391024>
- Pontius, R. G. J. (2000). *Quantification error versus location error in comparison of categorical maps*. 66. [http://www2.clarku.edu/~rpontius/pontius\\_2000\\_pers.pdf](http://www2.clarku.edu/~rpontius/pontius_2000_pers.pdf)
- PostgreSQL. (2021). *PostgreSQL: The world's most advanced open source database*. <https://www.postgresql.org/>
- PyPI. (2022). *psycopg2 · PyPI*. 2022. <https://pypi.org/project/psycopg2/>
- Python. (2021). *Welcome to Python.org*. <https://www.python.org/>
- Quichimbo, E. A., Singer, M. B., & Cuthbert, M. O. (2020). Characterising groundwater–surface water interactions in idealised ephemeral stream systems. *Hydrological Processes*, 34(18), 3792–3806. <https://doi.org/10.1002/hyp.13847>
- Quinton, J. N., Govers, G., Van Oost, K., & Bardgett, R. D. (2010). The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. *Nature Geoscience*, 3(5), 311–314. <https://doi.org/10.1038/ngeo838>
- Real Rangel, R. A. (2016). *MONITOREO DE SEQUÍAS EN MÉXICO A TRAVÉS DE ÍNDICES MULTIVARIADOS*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Reed, S. C., Coe, K. K., Sparks, J. P., Housman, D. C., Zelikova, T. J., & Belnap, J. (2012). Changes to dryland rainfall result in rapid moss mortality and altered soil fertility. *Nature Climate Change*, 2(10), 752–755. <https://doi.org/10.1038/nclimate1596>
- Rivera, A., Mendoza, G., Martínez, F., & Servin, C. (2010). *Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México)*. 11(2), 144–154. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449945029006>
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- SAGARPA. (2011). *Presenta SAGARPA proyecto de desarrollo en zonas áridas*. <http://www.sagarpa.mx/Delegaciones/sanluispotosi/boletines/Paginas/BOL23021.aspx>
- SAGARPA, & SIAP. (2014). *Atlas de las Zonas Áridas de México*. SAGARPA. <https://www.gismexico.com/azam/azam.html>
- Salinas-Zavala, C. A., Lluch-Belda, D., Hernández-Vázquez, S., & Lluch-Cota, D. B.

- (1998). La aridez en el noroeste de México. Un análisis de su variabilidad espacial y temporal. *Atmosfera*, 11(1), 29–44. [https://www.researchgate.net/publication/236262465\\_La\\_aridez\\_en\\_el\\_Noroeste\\_de\\_Mexico\\_Un analisis\\_de\\_su\\_variabilidad\\_espacial\\_y\\_temporal](https://www.researchgate.net/publication/236262465_La_aridez_en_el_Noroeste_de_Mexico_Un analisis_de_su_variabilidad_espacial_y_temporal)
- Sánchez-Cano, J. E. (2019). *Desarrollo sostenible de zonas áridas y semiáridas frente al cambio climático* (UJED (ed.); Primera). <https://play.google.com/books/reader?id=m36kDwAAQBAJ&pg=GBS.PP1&hl=es>
- Schwinning, S., Sala, O. E., Loik, M. E., & Ehleringer, J. R. (2004). Thresholds, memory, and seasonality: understanding pulse dynamics in arid/semi-arid ecosystems. *Oecologia*, 141(2), 191–193. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1683-3>
- Selenium. (2022). *Downloads | Selenium*. <https://www.selenium.dev/downloads/>
- SEMARNAT. (n.d.). *El Medio Ambiente en México 2013-2014*. 2014. Retrieved August 25, 2021, from [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_resumen14/03\\_suelos/3\\_3.html#a1\\_2](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/03_suelos/3_3.html#a1_2)
- SEMARNAT. (2014). *El Medio Ambiente en México 2013-2014*. SEMARNAT. [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_resumen14/03\\_suelos/3\\_3.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/03_suelos/3_3.html)
- SEMARNAT. (2015). *Programa Nacional Manejo Sustentable de Tierras*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31167/pnacdd.pdf>
- SEMARNAT. (2019). *Consulta temática de recursos forestales*. Glosario de Recursos Forestales. [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D3\\_GLOS\\_RFORESTA&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_GLOS_RFORESTA&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce)
- Sevtap Selcuk-Kestel, A., Sebnem Duzgun, H., & Oduncuoglu, L. (2012). A GIS-based software for lifeline reliability analysis under seismic hazard. *Computers & Geosciences*, 42, 37–46. <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2012.01.015>
- Sillero, N., & Tarroso, P. (2010). Free GIS for herpetologists: free data sources on Internet and comparison analysis of proprietary and free/open source software. *Acta Herpetologica*, 74(4), 63–85. <https://doi.org/10.1515/MAMM.2010.055/HTML>
- Singh, S., Reddy, C. S., Pasha, S. V., Dutta, K., Saranya, K. R. L., & Satish, K. V. (2017). Modeling the spatial dynamics of deforestation and fragmentation using Multi-Layer Perceptron neural network and landscape fragmentation tool. *Ecological Engineering*, 99, 543–551. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2016.11.047>
- Son, B., Her, Y., & Kim, J.-G. (2006). A Design and Implementation of Forest-Fires Surveillance System based on Wireless Sensor Networks for South Korea Mountains. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 6(9).

- Steiniger, S., & Hay, G. J. (2009). Free and open source geographic information tools for landscape ecology. *Ecological Informatics*, 4(4), 183–195. <https://doi.org/10.1016/J.ECOINF.2009.07.004>
- Tabari, H., Hosseinzadeh Talaei, P., Mousavi Nadoushani, S. S., Willems, P., & Marchetto, A. (2014). A survey of temperature and precipitation based aridity indices in Iran. *Quaternary International*, 345, 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.03.061>
- Thapa, R. B., Shimada, M., Watanabe, M., Motohka, T., & Shiraishi, T. (2013). L-band SAR data and spatially explicit model to analyse forest loss between 2007 and 2030 in central Sumatra | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. *IEEE*. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6705022>
- Thompson, R. D. (1975). *The climatology of the arid world*. University of Reading. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19776719066>
- UICN. (2007). *Las zonas áridas contribuyen a la economía más de lo que se ha reconocido hasta hoy* | UICN. <https://www.iucn.org/es/content/las-zonas-áridas-contribuyen-la-economía-más-de-lo-que-se-ha-reconocido-hasta-hoy>
- UNCCD. (2017). *CONVENCIÓN DE LA NACIONES UNIDAS DE LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACIÓN*. [https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-08/UNCCD\\_Convention\\_text\\_SPA.pdf](https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-08/UNCCD_Convention_text_SPA.pdf)
- UNEP. (1997). *World Atlas of Desertification* (2da ed.). Oxford University Press.
- UNESCO. (1977). *Development of arid and semi-arid lands: obstacles and prospects*. [https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarcdf\\_0000024592\\_spa&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach\\_import\\_f78e9d60-f183-4b1e-bbc4-6109e21e5b0b%3F\\_%3D024592spao.pdf&locale=es&multi=true&ark=/ark:/48](https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarcdf_0000024592_spa&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach_import_f78e9d60-f183-4b1e-bbc4-6109e21e5b0b%3F_%3D024592spao.pdf&locale=es&multi=true&ark=/ark:/48)
- Velasco, I., & Pimentel, E. (2010). Zonificación agroclimática de Papadakis aplicada al estado de Sinaloa, México. *Investigaciones Geográficas*, 73, 85–102. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112010000300007&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112010000300007&lng=es&nrm=iso)
- Verbist, K., Santibañez, F., Gabriels, D., & Soto, G. (2010). *ATLAS de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe Elaborado por*. [http://www.cazalac.org/mapa\\_zo.php](http://www.cazalac.org/mapa_zo.php)
- Verburg, P. H., Overmars, K. P., Huigen, M. G. A., de Groot, W. T., & Veldkamp, A. (2006). Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines. *Applied Geography*, 26(2), 153–173. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2005.11.005>
- Villagra, P. E., Meglioli, P. A., Pugnaire, F. I., Vidal, B., Aranibar, J., & Jobbágy, E. (2013). *La regulación de la partición del agua en zonas áridas y sus consecuencias en la productividad del ecosistema y disponibilidad de agua para los habitantes*. [http://iis1.eeza.csic.es/eeza/documentos/2013\\_Villagra\\_et\\_al\\_Proagua.pdf](http://iis1.eeza.csic.es/eeza/documentos/2013_Villagra_et_al_Proagua.pdf)

- Villarruel Saahagún, Leopoldo. (2015). *Indicadores para el manejo integral de cuencas de zonas áridas: estudio de caso con enfoque holístico en la subcuenca la Haciendita, Sonora* [Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.]. [https://doi.org/http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/474/villarruel\\_l.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://doi.org/http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/474/villarruel_l.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Vipin, V. (2012). Image Processing Based Forest Fire Detection. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(2). [www.ijetae.com](http://www.ijetae.com)
- Wang, W., Chen, X., Shi, P., & Van Gelder, P. H. A. J. M. (2008). Detecting changes in extreme precipitation and extreme streamflow in the Dongjiang River Basin in southern China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(1), 207–221. <https://doi.org/10.5194/HESS-12-207-2008>
- Zabihi, H., Alizadeh, M., Langat, P. K., Karami, M., Shahabi, H., Ahmad, A., Said, M. N., & Lee, S. (2019). GIS multi-criteria analysis by ordered weighted averaging (OWA): Toward an integrated citrus management strategy. *Sustainability (Switzerland)*, 11(4), 1009. <https://doi.org/10.3390/su11041009>
- Zarei, A. R., & Mahmoudi, M. R. (2021). Evaluation and Comparison of the Effectiveness Rate of the Various Meteorological Parameters on UNEP Aridity Index Using Backward Multiple Ridge Regression. *Water Resources Management*, 35(1), 159–177. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02716-z>

## Anexos

```
if __name__ == '__main__':
    variable = sys.argv[1]
    prYearActual = sys.argv[2]
    path = sys.argv[3]

    rutaYear = path + "\\src\\data\\variables\\" + variable + "\\" + prYearActual

    listadoMeses = os.listdir(rutaYear)
    for mes in listadoMeses:
        if mes != "promedio_anual":
            rutaMes = rutaYear + "\\" + mes

            listadoDias = os.listdir(rutaMes)
            for dia in listadoDias:
                if dia != "promedio_mensual":
                    rutaDia = rutaMes + "\\" + dia

                    listadoImagenes = os.listdir(rutaDia)
                    for file in listadoImagenes:
                        pathFile = rutaDia + "\\" + file

                        partesFile = file.split("_")
                        if partesFile[0] == "ds":
                            nombreFile = partesFile[1].replace('.hdf', '')
                            fileGenerado = rutaDia + "\\" + "gc_" + nombreFile + ".tif"
                            print(fileGenerado)
                            if not glob.glob(fileGenerado):
                                arcpy.gp.RasterCalculator_sa("""(\\""" + pathFile + """)*0.02)-273.15""", fileGenerado)
```

**Anexos 1.** Fragmento del algoritmo en Python para aplicar el factor escala y la conversión de °K a °C de la variable temperatura.

```
if variable == "indice_de_vegetacion":
    imagenFactorEscalaSalida = rutaDia + "\\" + "fe_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + ".tif"
    print(imagenFactorEscalaSalida)
    if not glob.glob(imagenFactorEscalaSalida):
        arcpy.gp.RasterCalculator_sa("""(\\""" + imagenCorreccion4 + """)*0.0001""", imagenFactorEscalaSalida)
```

**Anexos 2.** Fragmento del algoritmo en Python para aplicar el factor escala a la variable NDVI.

```

listadoMeses = os.listdir(rutaYear)
for mes in listadoMeses:
    rutaMes = rutaYear + "\\" + mes

    listadoDias = os.listdir(rutaMes)
    for dia in listadoDias:
        rutaDia = rutaMes + "\\" + dia
        print(rutaDia + "\\" + "ms_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + ".tif")
        if not glob.glob(rutaDia + "\\" + "ms_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + ".tif"):

            listadoImagenes = os.listdir(rutaDia)

            imagenes = ""
            for file in listadoImagenes:
                #separar por el punto
                prueba = file.split(".")
                if prueba[0] == "gc":
                    prueba2 = prueba[1].split(".")
                    if prueba2[ len(prueba2) - 1 ] == "tif":
                        imagenes += rutaDia + "\\" + file + ";"

            ubicacionDeSalida = rutaDia
            nombreArchivoGenerado = "ms_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + ".tif"
            arcpy.MosaicToNewRaster_management(imagenes, ubicacionDeSalida, nombreArchivoGenerado, "", tipoDato,

```

**Anexos 3.** Fragmento del algoritmo en Python para realizar el mosaico del área de estudio.

```

if(variable == 'temperatura' or variable == 'indice_de_vegetacion'):
    listadoMeses = os.listdir(rutaYear)
    for mes in listadoMeses:
        if mes != "promedio_anual":
            rutaMes = rutaYear + "\\" + mes

            listadoDias = os.listdir(rutaMes)
            for dia in listadoDias:
                if dia != "promedio_mensual":
                    rutaDia = rutaMes + "\\" + dia
                    print(rutaDia + "\\" + "ct_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + ".tif")
                    if not glob.glob(rutaDia + "\\" + "ct_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + ".tif"):
                        if glob.glob(rutaDia + "\\" + "ms_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + ".tif"):
                            arcpy.Clip_management(in_raster=rutaDia + "\\" + "ms_" + prYearActual + "_" + mes +
                                out_raster=rutaDia + "\\" + "ct_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + ".tif", in
                                    clipping_geometry="ClippingGeometry", maintain_clipping_extent="NO_MAINTAIN_EXTENT")
                else:
                    print(rutaYear + "\\" + "ct_" + variable + "_" + prYearActual + ".tif")
                    if not glob.glob(rutaYear + "\\" + "ct_" + variable + "_" + prYearActual + ".tif"):
                        if glob.glob(rutaYear + "\\" + "ds_" + variable + "_" + prYearActual + ".tif"):
                            arcpy.Clip_management(rutaYear + "\\" + "ds_" + variable + "_" + prYearActual + ".tif", "-12192675.8

```

**Anexos 4.** Fragmento del algoritmo en Python para realizar el corte al área de estudio.

```

listadoMeses = os.listdir(rutaYear)
for mes in listadoMeses:
    rutaMes = rutaYear + "\\" + mes

    listadoDias = os.listdir(rutaMes)
    for dia in listadoDias:
        rutaDia = rutaMes + "\\" + dia

        imagenOriginal = rutaDia + "\\" + "ct_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + ".tif"
        imagenCorreccion1 = rutaDia + "\\" + "cr_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + "_1.tif"
        imagenCorreccion2 = rutaDia + "\\" + "cr_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + "_2.tif"
        imagenCorreccion3 = rutaDia + "\\" + "cr_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + "_3.tif"
        imagenCorreccion4 = rutaDia + "\\" + "cr_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + "_4.tif"

        print(imagenCorreccion1)
        if not glob.glob(imagenCorreccion1):
            if glob.glob(imagenOriginal):
                #valores nulos
                arcpy.gp.RasterCalculator_sa("IsNull(\\" + imagenOriginal + "\")", imagenCorreccion1)

        print(imagenCorreccion2)
        if not glob.glob(imagenCorreccion2):
            if glob.glob(imagenOriginal):
                arcpy.gp.RasterCalculator_sa("FocalStatistics(\\" + imagenOriginal + "\", NbrCircle(20, \"CELL\"), \"MEAN\")",
                imagenCorreccion2)

        print(imagenCorreccion3)
        if not glob.glob(imagenCorreccion3):
            if glob.glob(imagenOriginal) and glob.glob(imagenCorreccion1) and glob.glob(imagenCorreccion2):
                arcpy.gp.RasterCalculator_sa("Con(\\" + imagenCorreccion1 + "\"=1, \\" + imagenCorreccion2 + "\" , \\" + imagenOriginal + "\")",
                imagenCorreccion3)

        print(imagenCorreccion4)
        if not glob.glob(imagenCorreccion4):
            if glob.glob(imagenCorreccion3):
                #cortamos la imagen en nuestra area de estudio
                arcpy.Clip_management(in_raster=imagenCorreccion3, rectangle="-12192675.8357336 2322808.04247504 -9619868.78825134 3691975.67895926",
                out_raster=imagenCorreccion4, in_template_dataset=rutaAreaDataSet, nodata_value="0",
                clipping_geometry="ClippingGeometry", maintain_clipping_extent="NO_MAINTAIN_EXTENT")

```

**Anexos 5.** Fragmento del algoritmo en Python para realizar las correcciones por el método de vecino más cercano.

```

if __name__ == '__main__':
    variable = sys.argv[1]
    prYearActual = sys.argv[2]
    path = sys.argv[3]

    rutaYear = path + "\\src\\data\\variables\\" + variable + "\\" + prYearActual

    listadoMeses = os.listdir(rutaYear)
    for mes in listadoMeses:
        rutaMes = rutaYear + "\\" + mes

        imagenes = []
        listadoDias = os.listdir(rutaMes)
        for dia in listadoDias:
            rutaDia = rutaMes + "\\" + dia
            #utilizamos la cuarta imagen corregida
            imagenes.append(rutaDia + "\\" + "cr_" + prYearActual + "_" + mes + "_" + dia + "_4.tif")

        print(rutaMes + "\\" + "promedio_mensual" + "\\" + prYearActual + "_" + mes + ".tif")
        #crear el directorio promedio_mensual
        if not os.path.exists(rutaMes + "\\" + "promedio_mensual"):
            os.mkdir(rutaMes + "\\" + "promedio_mensual")

        imagenGenerada = rutaMes + "\\" + "promedio_mensual" + "\\" + "prm_" + prYearActual + "_" + mes + ".tif"
        if not glob.glob(imagenGenerada):
            prueba = ""
            for x in range(0, len(imagenes)):
                if x == (len(imagenes) - 1):
                    prueba += "\"" + imagenes[x] + "\" + \" + \"
                else:
                    prueba += "\"" + imagenes[x] + "\" + \" + \"

            arcpy.gp.RasterCalculator_sa("(" + prueba + ")/" + str(len(imagenes) - 1) + ")",
            imagenGenerada)

```

**Anexos 6.** Fragmento del algoritmo en Python para realizar el promedio mensual de las variables temperatura y NDVI.

```

if __name__ == '__main__':
    variable = sys.argv[1]
    prYearActual = sys.argv[2]
    path = sys.argv[3]

    rutaYear = path + "\\src\\data\\variables\\" + variable + "\\" + prYearActual

    imagenes = []
    listadoMeses = os.listdir(rutaYear)
    for mes in listadoMeses:
        rutaMes = rutaYear + "\\" + mes

        rutaPromedioMensual = rutaMes + "\\" + "promedio_mensual"
        #utilizamos la cuarta imagen corregida
        imagenes.append(rutaPromedioMensual + "\\" + "prm_" + prYearActual + "_" + mes + ".tif")

    print(rutaYear + "\\" + "promedio_anual" + "\\" + "pra_" + prYearActual + ".tif")
    if not os.path.exists(rutaYear + "\\" + "promedio_anual"):
        os.mkdir(rutaYear + "\\" + "promedio_anual")

    imagenGenerada = rutaYear + "\\" + "promedio_anual" + "\\" + "pra_" + prYearActual + ".tif"
    if not glob.glob(imagenGenerada):
        prueba = ""
        for x in range(0, len(imagenes)):
            if x == (len(imagenes) - 1):
                prueba += "\"" + imagenes[x] + "\"\n"
            else:
                prueba += "\"" + imagenes[x] + "\"\n" + ""

        arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\"(" + prueba + ")\"/\""+str(len(imagenes) - 1)+"\"",
            imagenGenerada)

```

**Anexos 7.** Fragmento del algoritmo en Python para realizar el promedio anual de las variables temperatura y NDVI.

```

if __name__ == '__main__':
    variable = sys.argv[1]
    prYearActual = sys.argv[2]
    path = sys.argv[3]

    rutaPromedioAnual = path + "\\src\\data\\variables\\" + variable + "\\" + prYearActual + "\\" + "promedio_anual"

    print(rutaPromedioAnual + "\\" + "prap_" + prYearActual + ".tif")
    if not os.path.exists(rutaPromedioAnual + "\\" + "prap_" + prYearActual + ".tif"):
        if os.path.exists(rutaPromedioAnual + "\\" + "pra_" + prYearActual + ".tif"):
            arcpy.ProjectRaster_management(in_raster=rutaPromedioAnual + "\\" + "pra_" + prYearActual + ".tif",
                out_raster=rutaPromedioAnual + "\\" + "prap_" + prYearActual + ".tif",
                out_coor_system="PROJCS[Mex_INEGI_Lambert_Conformal_Conic',GEOGCS['GCS_WGS_1984',DATUM['D_WGS_1984',SPHEROID['WGS_1984',6378137.0,298.25722356],
                resampling_type="NEAREST", cell_size="926.625433138334 926.625433138334",
                geographic_transform="", Registration_Point="",
                in_coor_system="PROJCS[Unknown_datum_based_upon_the_custom_spheroid_Sinusoidal',GEOGCS['GCS_Unknown_datum_based_upon_the_custom_spheroid',DATUM

```

**Anexos 8.** Fragmento del algoritmo en Python para realizar la reproyección de las variables.

```

if __name__ == '__main__':
    variable = sys.argv[1]
    prYearActual = sys.argv[2]
    path = sys.argv[3]

    rutaPromedioAnual = path + "\\src\data\variables\\" + variable + "\\" + prYearActual + "\\" + "promedio_anual"

    print(rutaPromedioAnual + "\\" + "prapm_" + prYearActual + ".tif")
    """if not os.path.exists(rutaPromedioAnual + "\\" + "prap_" + prYearActual + ".tif"):
        if os.path.exists(rutaPromedioAnual + "\\" + "pra_" + prYearActual + ".tif"):"""

```

**Anexos 9.** Fragmento del algoritmo en Python para aplicar las propiedades técnicas de la máscara de restricción del área de estudio.

```

dirPrincipal = path + "/src/data/variables/" + factor + "/" + prYearActual + "/"
inputImageName = "var_" + factor + "_" + prYearActual + ".rst"
outputImageNfName = "varn_" + factor + "_" + prYearActual + ".rst"

if(factor == 'temperatura' or factor == 'indiceDeVegetacion'):
    inputImageDir = dirPrincipal + "promedio_anual/" + inputImageName
else:
    inputImageDir = dirPrincipal + inputImageName

outputImageNf = dirPrincipal + outputImageNfName

outputImageFuzzyName = "fu_" + factor + "_" + prYearActual + ".rst"
outputImageFuzzyDir = path + "/src/data/factores/" + factor + "/" + prYearActual + "/" + outputImageFuzzyName

if not os.path.exists(path + "/src/data/factores/" + factor + "/"):
    os.mkdir(path + "/src/data/factores/" + factor + "/")

if not os.path.exists(path + "/src/data/factores/" + factor + "/" + prYearActual + "/"):
    os.mkdir(path + "/src/data/factores/" + factor + "/" + prYearActual)

print(outputImageFuzzyDir)
if not os.path.exists(outputImageFuzzyDir):
    if os.path.exists(inputImageDir):

        IdrApi = win32com.client.Dispatch('idrisi32.IdrisiAPIServer')
        IdrApi.SetWorkingDir(dirPrincipal)

        print(outputImageNf)
        if not os.path.exists(outputImageNf):
            IdrApi.RunModule('NANFIX', '2*' + inputImageDir + '*'+outputImageNf+'*0', 1, '', '', '', '', 1)

        dataset = gdal.Open(outputImageNf, gdal.GA_ReadOnly)
        band = dataset.GetRasterBand(1)
        minDato = band.GetMinimum()
        maxDato = band.GetMaximum()
        band = None

```

**Anexos 10.** Fragmento del algoritmo en Python para la normalización de las variables.

```

arrayFactores = factores.split(',')
arrayPesos = factore_pesos.split(',')

if not os.path.exists(path + "/src/data/evaluacion_multicriterio/"):
    os.mkdir(path + "/src/data/evaluacion_multicriterio/")

if not os.path.exists(path + "/src/data/evaluacion_multicriterio/" + prYearActual ):
    os.mkdir(path + "/src/data/evaluacion_multicriterio/" + prYearActual)

dirPrincipal = path + "/src/data/evaluacion_multicriterio/" + prYearActual + "/"

inputConfig = "conf_mce_" + prYearActual + ".dsf"
outputImageName = "mce_" + prYearActual + ".rst"
outputImageNce = dirPrincipal + outputImageName

print(outputImageNce)
if not os.path.exists(outputImageNce):

    if not os.path.exists(dirPrincipal + inputConfig):
        file = open(dirPrincipal + inputConfig, "w")
        file.write("1\n")
        file.write("7\n")
        file.write(directorioAREARst + "\n")
        for i in range(0, len(arrayFactores)):
            file.write(arrayFactores[i] + "\n")
            file.write(arrayPesos[i] + "\n")
        file.close()

    IdrApi = win32com.client.Dispatch('idrisi32.IdrisiAPIServer')
    IdrApi.SetWorkingDir(dirPrincipal)

    IdrApi.RunModule('MCE', ''+outputImageNce+''+dirPrincipal + inputConfig+''', 1, '', '', '', '', 1)

```

**Anexos 11.** Fragmento del algoritmo en Python para el método de evaluación multicriterio.

```

dirPrincipal = path + "/src/data/evaluacion_multicriterio/" + prYearActual + "/"

inputImageName = "mce_" + prYearActual + ".rst"
inputConfig = "config_reclass_" + prYearActual + ".rc1"
outputImageName = "rec_" + prYearActual + ".rst"
outputImageNce = dirPrincipal + outputImageName

print(outputImageNce)
if not os.path.exists(outputImageNce):

    if not os.path.exists(dirPrincipal + inputConfig):
        file = open(dirPrincipal + inputConfig, "w")
        file.write("0 0 0.01\n")
        file.write("1 0.01 0.2\n")
        file.write("2 0.2 0.5\n")
        file.write("3 0.5 0.65\n")
        file.write("4 0.65 1\n")
        file.write("-9999\n")
        file.close()

    IdrApi = win32com.client.Dispatch('idrisi32.IdrisiAPIServer')
    IdrApi.SetWorkingDir(dirPrincipal)

    IdrApi.RunModule('RECLASS', 'I'+inputImageName+''+outputImageNce+''*3* + inputConfig + '*1', 1, '', '', '', '', 1)

```

**Anexos 12.** Algoritmo en Python para clasificación del mapa de vulnerabilidad.

```

# Set pg password environment variable - others can be included in the statement
os.environ['PGPASSWORD'] = db_password

if tipo == "evaluacion_multicriterio":
cmd = '"C:/Program Files/PostgreSQL/10/bin/shp2pgsql" -I -s 4326 {} zonas_aridas {} | "C:/Program
Files/PostgreSQL/10/bin/psql" -U {} -d {} -h {} -p 5432'.format(dir_image, year, db_user,db_name,db_host)
else:
# Build command string
cmd = '"C:/Program Files/PostgreSQL/10/bin/raster2pgsql" -s 4326 -C -I -M {} | "C:/Program
Files/PostgreSQL/10/bin/psql" -U {} -d {} -h {} -p 5432'.format(dir_image, db_user,db_name,db_host)

subprocess.call(cmd, shell=True)

```

**Anexos 13.** Algoritmo en Python para incorporar los mapas a la base de datos.

```

filter = driver.find_element_by_name("filter")
filter.send_keys(mapa)
filter.send_keys(Keys.RETURN)

time.sleep(1)

driver.find_elements(By.XPATH, '//*[@text()="'+mapa+'"]')[1].click()

time.sleep(1)

driver.find_element(By.XPATH, '//*[@text()="Publicación"]').click()

if variable == "precipitacion":
    valor = 'za_1precipitacion'
elif variable == "temperatura":
    valor = 'za_2temperatura'
elif variable == "indiceDeVegetacion":
    valor = 'za_3ndvi'
elif variable == "evapotranspiracion":
    valor = 'za_4evapotranspiracion'
else:
    valor = 'za_5humedad'

#select tabs:panel:theList:2:content:styles:defaultStyle > za_1precipitacion za_2temperatura za_3ndvi za_4evapotranspiracion
selectrsHandling = driver.find_element_by_name("tabs:panel:theList:2:content:styles:defaultStyle")
for option in selectrsHandling.find_elements_by_tag_name('option'):
    if option.get_attribute("innerText") == valor:
        option.click()
        break

driver.find_element(By.XPATH, '//a[text()="Guardar"]').click()

except NoSuchElementException:
    pass

# Cerrar la ventana del navegador
driver.quit()

__name__ == '__main__':
constructor(sys.argv[1], sys.argv[2], sys.argv[3], sys.argv[4], sys.argv[5])

```

**Anexos 14.** Algoritmo en Python para incorporar los mapas al servidor de mapas.

```

categoria.name = 'SubMenuVariables'
categoria.subCategoria = 'Variables'
categoria.id_sub_categoria = 'SubMenuVariables' + year

for (var j = 0; j < 5; j++) {
  var item = {};
  if(j == 0){
    item.nombre = 'Precipitación ' + year
    item.id_collapse = 'collapsevar_precipitacion_' + year
    item.capa = 'var_precipitacion_' + year
    item.id_opacidad = 'var_precipitacion_' + year + '|Opacidad'
    item.visible = false
    item.url = 'http://'+config.getServidorGeoserver()+'/geoserver/zonas_aridas/ows?service=WMS&layers=zonas_aridas:var_
    item.url_simbologia = 'http://'+config.getServidorGeoserver()+'/geoserver/wms?REQUEST=GetLegendGraphic&VERSION=1.0.0

  }else if(j == 1){
    item.nombre = 'Evapotranspiración ' + year
    item.id_collapse = 'collapsevar_evapotranspiracion_' + year
    item.capa = 'var_evapotranspiracion_' + year
    item.id_opacidad = 'var_evapotranspiracion_' + year + '|Opacidad'
    item.visible = false
    item.url = 'http://'+config.getServidorGeoserver()+'/geoserver/zonas_aridas/ows?service=WMS&layers=zonas_aridas:var_
    item.url_simbologia = 'http://'+config.getServidorGeoserver()+'/geoserver/wms?REQUEST=GetLegendGraphic&VERSION=1.0.0

  }else if(j == 2){
    item.nombre = 'Humedad ' + year
    item.id_collapse = 'collapsevar_humedad_' + year
    item.capa = 'var_humedad_' + year
    item.id_opacidad = 'var_humedad_' + year + '|Opacidad'
    item.visible = false
    item.url = 'http://'+config.getServidorGeoserver()+'/geoserver/zonas_aridas/ows?service=WMS&layers=zonas_aridas:var_
    item.url_simbologia = 'http://'+config.getServidorGeoserver()+'/geoserver/wms?REQUEST=GetLegendGraphic&VERSION=1.0.0

  }else if(j == 3){
    item.nombre = 'Temperatura ' + year
    item.id_collapse = 'collapsevar_temperatura_' + year
    item.capa = 'var_temperatura_' + year
  }
}

```

**Anexos 15.** Fragmento del algoritmo para visualización de datos en el geoportal web.

```

//busquedas
$('#button#search').on('click', function () {
  if ($('#search').is(':visible')) {
    $('#search').hide();
    $('#tipo_busqueda').hide();
  } else {
    $('#search').show();
    $('#tipo_busqueda').show();
    $('#search').focus();
  }
});

$('#search').on('keyup', function (e) {
  if (e.key === 'Enter' || e.keyCode === 13) {
    if ($('#tipo_busqueda').val() > 0) {
      if ($('#search').val().length > 0) {
        var listPromise2 = [];
        var promise = new Promise(function(resolve, reject) {
          jQuery.ajax({
            type: 'GET',
            data: { buscar : $('#search').val(), tipo_busqueda: $('#tipo_busqueda').val() },
            cache: false,
            error: function(error){
              reject('error al consultar busqueda');
            },
            url: window.location.origin + window.location.pathname + '/' + "busquedas",
            success: function(result){
              if (result.code == 200) {
                resolve(result.data);
              }
            }
          });
        });
      }
    }
  }
});

```

**Anexos 16.** Fragmento del algoritmo para la búsqueda de zonas áridas por año en el geoportal web.

```

if(i == datos.length-1){//mapa de tendencia

    var oLi14 = document.createElement('li');

    var oA14 = document.createElement('a');
    oA14.setAttribute("href", '#' + datos[i].id);
    oA14.setAttribute("data-toggle", 'collapse');
    oA14.setAttribute("aria-expanded", 'false');
    oA14.classList = "dropdown-toggle";
    oA14.style.fontWeight = 500;
    oA14.style.whiteSpace = 'normal';
    oA14.innerHTML= datos[i].categoria;
    oLi14.appendChild(oA14);

    var oUlSecundario14 = document.createElement('ul');
    oUlSecundario14.classList = "collapse list-unstyled";
    oUlSecundario14.setAttribute("id", datos[i].id);

    for (var y = 0; y < datos[i].elementos.length; y++) {

        var oLi1 = document.createElement('li');

        var oA = document.createElement('a');
        oA.setAttribute("href", '#' + datos[i].elementos[y].id);
        oA.setAttribute("data-toggle", 'collapse');
        oA.setAttribute("aria-expanded", 'false');
        oA.classList = "dropdown-toggle";
        oA.style.fontWeight = 500;
        oA.style.whiteSpace = 'normal';
        oA.style.backgroundColor = 'darkgray';
        oA.innerHTML= datos[i].elementos[y].year;
        oLi1.appendChild(oA);
    }
}

```

**Anexos 17.** Fragmento del algoritmo para la búsqueda de mapas de tendencia de zonas áridas en el geoportal web.

```

//mostramos el boton en la seccion de indicadores a nivel estatal
if(datos[i].subCategorias[y].name == "SubMenuIndicadoresEstatal"){
    var oli3 = document.createElement('li');

    var oDivContenedor = document.createElement('div');
    oDivContenedor.classList = "row p-2 m-0";
    oDivContenedor.style.backgroundColor = 'white';

    var oDiv1 = document.createElement('div');
    oDiv1.classList = "col-12 col-md-12";

    var oButton = document.createElement('button');
    oButton.classList = "btn btn-sm btn-primary";
    oButton.setAttribute("id", datos[i].subCategorias[y].id_sub_categoria);
    oButton.setAttribute("name", datos[i].categoria);
    oButton.innerHTML= "Generar PDF..";
    oButton.addEventListener("click", funcionGenerarPdfIndicadoresNivelEstatal);

    oDiv1.appendChild(oButton);
    oDivContenedor.appendChild(oDiv1);

    oli3.appendChild(oDivContenedor);
    oULTercero.appendChild(oli3);
    oli2.appendChild(oULTercero);
}else if(datos[i].subCategorias[y].name == "SubMenuIndicadoresAridez"){
    var oli3 = document.createElement('li');

    var oDivContenedor = document.createElement('div');
    oDivContenedor.classList = "row p-2 m-0";
    oDivContenedor.style.backgroundColor = 'white';

    var oDiv1 = document.createElement('div');
    oDiv1.classList = "col-12 col-md-12";

    var oButton = document.createElement('button');

```

**Anexos 18.** Fragmento del algoritmo para generar indicadores a nivel estatal.

```

}
    var oli3 = document.createElement('li');

    var oDivContenedor = document.createElement('div');
    oDivContenedor.classList = "row p-2 m-0";
    oDivContenedor.style.backgroundColor = 'white';

    var oDiv1 = document.createElement('div');
    oDiv1.classList = "col-12 col-md-12";

    var oButton = document.createElement('button');
    oButton.classList = "btn btn-sm btn-primary";
    oButton.setAttribute("id", datos[i].subCategorias[y].id_sub_categoria);
    oButton.setAttribute("name", datos[i].categoria);
    oButton.innerHTML= "Generar PDF..";
    oButton.addEventListener("click", funcionGenerarPdfIndicadoresRegionesHidrologicas);

    oDiv1.appendChild(oButton);
    oDivContenedor.appendChild(oDiv1);

    oli3.appendChild(oDivContenedor);
    oULTercero.appendChild(oli3);
    oli2.appendChild(oULTercero);
}
oULSecundario.appendChild(oli2);

```

**Anexos 19.** Fragmento del algoritmo para generar indicadores a nivel RHA.