



Aplicación de evaluación multicriterio para modelar factores climáticos y ambientales en la identificación de regiones áridas en el noroeste de México

Application of multicriteria assessment to evaluate climatic and environmental factors in the identification of arid regions in northwestern Mexico

Ramón Fernando López Osorio

Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México
ferrlop@uas.edu.mx
ORCID: 0009-0007-0981-5539

Lidia Yadira Pérez Aguilar

Facultad de Informática Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México
lidiaperez@uas.edu.mx
ORCID: 0000-0003-4467-0690

Yedid Guadalupe Zambrano Medina

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México
yedidzambrano@uas.edu.mx
ORCID: 0000-0001-8820-0688

Evangelina Ávila Aceves

Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México
evangelinaavila.facite@uas.edu.mx
ORCID: 0000-0003-2382-5470

doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.12.28.006>

Recibido: Junio 14, 2024
Aceptado: Agosto 25, 2024

Resumen: En México, las regiones áridas abarcan más de la mitad del territorio, siendo la desertificación, degradación y sequías los principales problemas en estos ecosistemas, causados principalmente por eventos climáticos y actividades antropogénicas. La presente investigación tuvo como objetivo la aplicación de técnicas de evaluación Multicriterio (EMC) para modelar factores que favorecen el aumento de la aridez, y poder identificar zonas con distintos niveles de aridez en la región Noroeste de México para el año 2023. Se utilizó el Método de Jerarquía Analítica (AHP) y Sumatoria Lineal Ponderada (WLC) en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El modelado se realizó con imágenes satelitales, las cuales fueron: Temperatura, Humedad del Suelo, Precipitación, Pendientes, Índice De Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) Modelo Digital de

Elevaciones (MDE), Cobertura Vegetal y Evapotranspiración. Los resultados muestran que gracias a la efectiva integración de los factores con la técnica EMC se pudo identificar regiones con diferentes niveles de aridez; la región norte y noroeste presenta mayor superficie árida con 41%, mientras que las regiones semiáridas, localizadas al oeste representan un 30% de superficie, por su parte, las regiones subhúmedas se localizaron en el sureste con un 27% de la superficie.

Palabras clave: *Evaluación Multicriterio, Aridez, Jerarquía Analítica, Lógica Difusa, SIG.*

Abstract: In Mexico, arid regions cover more than half of the territory, with desertification, degradation and droughts being the main problems in these ecosystems, caused mainly by climatic events and anthropogenic activities. The objective of this research was to apply multicriteria assessment (MCE) techniques to model factors that favor the increase in aridity, and to be able to identify areas with different levels of aridity in the Northwest region of Mexico by 2023. The Analytical Hierarchy Method (AHP) and Weighted Linear Summation (WLC) were used in a Geographic Information Systems (GIS) environment. The modeling was carried out with satellite images, which were: Temperature, Soil Moisture, Precipitation, Slopes, Normalized Differential Vegetation Index (NDVI), Digital Elevation Model (DEM), Vegetation Cover and Evapotranspiration. The results show that thanks to the effective integration of the factors with the EMC technique, regions with different levels of aridity could be identified; the northern and northwestern regions have a greater arid surface area with 41%, while the semi-arid regions, located in the west, represent 30% of the surface area, while the sub-humid regions were located in the southeast with 27% of the surface area.

Keywords: *Multicriteria Evaluation, Aridity, Analytical Hierarchy, Fuzzy Logic, GIS.*

1. Introducción

Los ecosistemas áridos abarcan aproximadamente el 43% de la superficie terrestre a nivel mundial, caracterizados principalmente por una disponibilidad limitada de agua, cambios extremos de temperatura y precipitación, lo que ocasiona una disminución en la humedad del suelo y aumento significativo de la evapotranspiración del agua [1], [2], [3], [4].

Así mismo, estas regiones se encuentran mayormente sobre suelos degradados y el principal problema que enfrentan es la desertificación ocasionada por factores relacionados con eventos climáticos y actividades antropogénicas como el uso del fuego, el sobre pastoreo, extracción de madera entre otras [4], [5], [6].

Existen diversas técnicas para medir y analizar las regiones áridas y los más utilizados se centran en el uso de Índices de Aridez (IA), que resultan ser un método rápido y fácil de implementar por la poca cantidad de variables que requieren, tal es el caso IA de Martonne [7], [8] y el IA de Köppen [9] que solo utilizan precipitación y temperatura. Otro IA muy utilizado es el propuesto por la FAO y el PNUMA que requieren precipitación y evapotranspiración para ser generados [10], [11], [12], [13].

Por su parte, las técnicas para la toma de decisiones basadas en EMC son ampliamente utilizadas en diversas áreas como la medicina, veterinaria, el turismo, aspectos sanitarios entre otras [14], [15], [16], [17]. Además, en los últimos años, se han implementado enfoques de EMC para la evaluación de la idoneidad del suelo empleando SIG [18], [19], [20], [21], [22], [23]. Entre ellos, WLC es el más utilizado y consiste en combinar un conjunto de mapas que forman parte de los criterios necesarios para dicho procedimiento [21], [24].

Así mismo, AHP es un método utilizado para evaluar un proceso de toma de decisiones el cual separa la decisión en elementos basados en sus propias características [25]. Con el fin de calcular las prioridades para cada elemento, en AHP se utiliza una escala de 17 jerarquías de importancia relativa para la construcción de la matriz de comparación entre pares de factores y de este modo, determinar el peso de los indicadores [21], [22], [26], [27], [28].

Por consiguiente, el objetivo de esta investigación es aplicar técnicas para la toma de decisiones basada en EMC para modelar factores climáticos y ambientales que favorecen el proceso de la aridez y aplicando la clasificación del IA de la UNEP para identificar los diferentes niveles de aridez en la región Noroeste de México, tomando como periodo de evaluación en año 2023

2. Estado del arte

Si bien, la aridez es una característica climática que se relaciona con la escasez de precipitaciones necesarias para sustentar la vegetación, en los climas áridos las lluvias son altamente irregulares, y los largos periodos de sequía son bastante frecuentes [29]. Uno de los estudios más significativos relacionados con la aridez es la segunda edición del Atlas Mundial de Desertificación [30], en el cual se generó un IA que clasifica las zonas áridas, y se definió que las tierras secas corresponden a regiones donde el cociente entre precipitación y evapotranspiración potencial se sitúa entre 0.05 ml y 0.65 ml. Según este estudio, se determinó que el 61 % del territorio mexicano presenta algún grado de aridez.

Así mismo, en [13], evaluaron los registros históricos de 5,088 estaciones meteorológicas de la red de monitoreo climático del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), utilizando la técnica de *Thin Plate Smoothing Spline* y basándose en la metodología de [30] para generar mapas de precipitación pluvial y evaporación, en el cual obtuvieron un mapa con los índices de aridez provenientes de la división de la precipitación y la evapotranspiración, concluyendo que en 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.

Además, en [7] adaptaron y calibraron el modelo de aridez hidroclimática modificando el índice de aridez de Martonne para ajustarlo al estudio del balance hídrico en las zonas secas de las cuencas de La Paz y Comondú, en Baja California Sur. Utilizando el método de los mínimos cuadrados, seleccionaron un modelo numérico alternativo que estuviera altamente correlacionado con el déficit hídrico y que fuera sensible a niveles bajos de precipitación, el cual permitió desarrollar un índice mensual con un alto potencial de aplicación en estudios hidrológicos de regiones áridas y semiáridas, con el propósito de comprender los procesos hidrológicos y a contribuir eficazmente en la lucha contra la sequía y la desertificación ambiental

En relación con la sequía, y dado que no existe una única variable hidrológica que permita definir con precisión su inicio, duración y final, [31] desarrolló un marco de trabajo multivariado, el Índice Estandarizado Multivariado de Sequía, que incluye la creación de un índice de precipitación, un índice de humedad y un índice de escurrimiento bajo diferentes condiciones hidrometeorológicas y climáticas. Como resultado, se generan mapas que identifican de manera objetiva la evolución espacio-temporal de la magnitud y severidad de la sequía a nivel nacional, considerando distintas escalas temporales. Sin embargo, este observatorio no ofrece escenarios proyectivos que anticipen de alguna manera la problemática de la sequía en el país.

En este mismo contexto, el estudio más reciente sobre este problema es el Nuevo Atlas Mundial de Desertificación [32], el cual destaca, entre otros aspectos, que más del 75 % de la superficie terrestre ya se encuentra degradada, y se anticipa que más del 90 % podría estarlo para el año 2050. Además, señala que la rápida deforestación complicará aún más la mitigación de los efectos del cambio climático.

3. Materiales y métodos

3.1. Área de estudio

La región de estudio se ubica en la región Noroeste de México y está conformada por tres Regiones Hidrológico Administrativas: I_Península de Baja California y II_Noroeste y III_Pacífico Norte (Figura 1), se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas extremas de: 32° 39' y 21° 22' latitud Norte y 118° 52' y 103° 20' longitud Oeste. Colinda Oeste con el océano Pacífico, al Norte con Phoenix, Arizona, al Este con Chihuahua y Durango, y al Sur con Nayarit, abarcando completamente los estados de Baja California, Baja California Sur, Sinaloa y Sonora, y parte de los estados de Chihuahua, Durango, Nayarit y Zacatecas, representando aproximadamente el 25.7% del territorio mexicano [33].

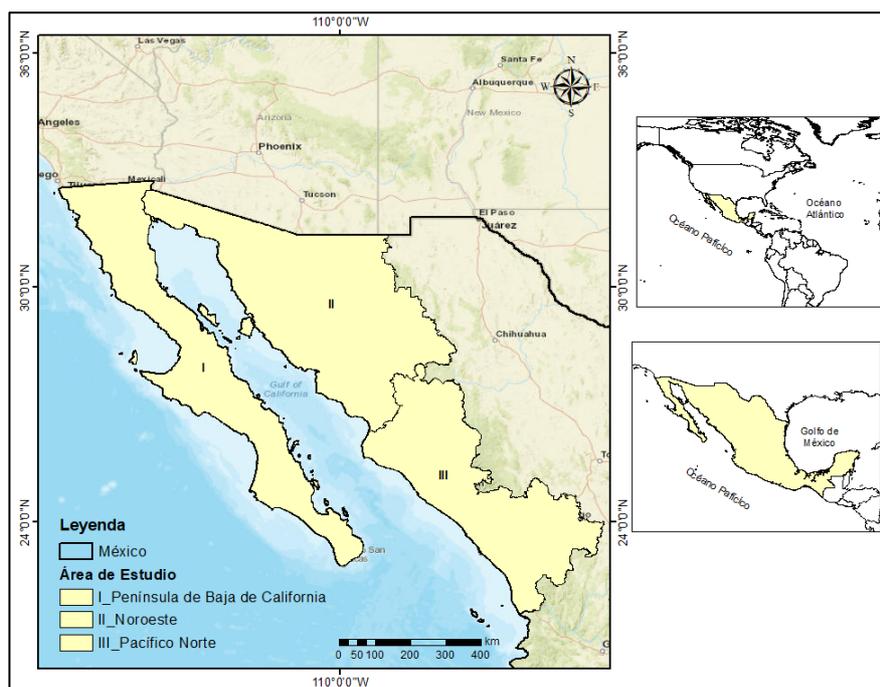


Figura 1. Localización del área de estudio.

3.1.1. Características geográficas y climáticas de la región

La región Noroeste de México, administrativamente está formada por 169 municipios: 5 en Baja California, 6 en Baja California Sur, 27 en Chihuahua, 23 en Durango, 10 en Nayarit, 18 en Sinaloa, 72 en Sonora y 8 en Zacatecas. En la parte Oeste, predominan los climas semidesértico, templado, templado húmedo y desértico. La precipitación media anual es de 169 mm. Así mismo, las lluvias son muy escasas y con una gran variabilidad. La temperatura media anual en esta región oscila entre los 10 y 24°C.

Por su parte, en la zona Norte, predominan los climas secos, semiseco, subhúmedos y templado y la temperatura media anual es de 20°C. Así mismo, en la región sur y sureste predominan los climas templado subhúmedo y cálido. La temperatura media anual oscila entre 16 y 18°C, con mínimas bajo de cero en ciertas épocas, sobre todo en las partes serranas de la región, y máximas mayores de 24°C. Lo que respecta a la precipitación media anual es de 747 mm, valor muy cercano a la media nacional de 760 mm [34], [35], [36].

3.2. Datos

Para realizar el modelado de factores ambientales y climáticos mediante un enfoque Multicriterio y así identificar zonas áridas en la región Noroeste de México, se seleccionaron algunos factores identificados previamente con base al estudio generado en [22], a una revisión de la literatura y consulta a expertos (Tabla 1) y se seleccionó como periodo de evaluación el año 2023.

Tabla 1. Factores, Tipo de dato, resolución espacial, fuente de los datos (año 2023).

Factores	Datos	Tipo de Dato	Resolución Espacial/Escala	Fuente
Climáticos	Precipitación		4 km	Conjuntos de datos CHIRPS
	Temperatura		1km	MODIS/ USGS
	Evapotranspiración	Raster	4 km	Conjuntos de datos TerraClimate
	Humedad		4 km	Conjuntos de datos TerraClimate
Ambientales	MDE	Raster	90 m	SRTM, (Shuttle Radar Topography Mission)

	NDVI		500 m	MODIS/ USGS
	Pendientes		90 m	A partir del DEM
	Cobertura Vegetal		15 m	http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/
Datos Administrativos	Regiones Hidrológicas			*CONABIO, Proveniente de *CONAGUA
	Administrativa	Vector	1:250,000,000	http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/
	Limite Estatal			http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/

*CONAGUA: Comisión Nacional del Agua, *INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, *CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Para validar y confirmar los resultados y de esta forma asegurar que el mapa de regiones áridas generado refleja adecuadamente los datos, se descargó el mapa del IA en formato *raster* (Figura 2) desarrollado por [12] del año 2019 y publicado por el Consorcio para Información Espacial (CSI), es la comunidad que realiza investigaciones en ciencias geoespaciales [37].

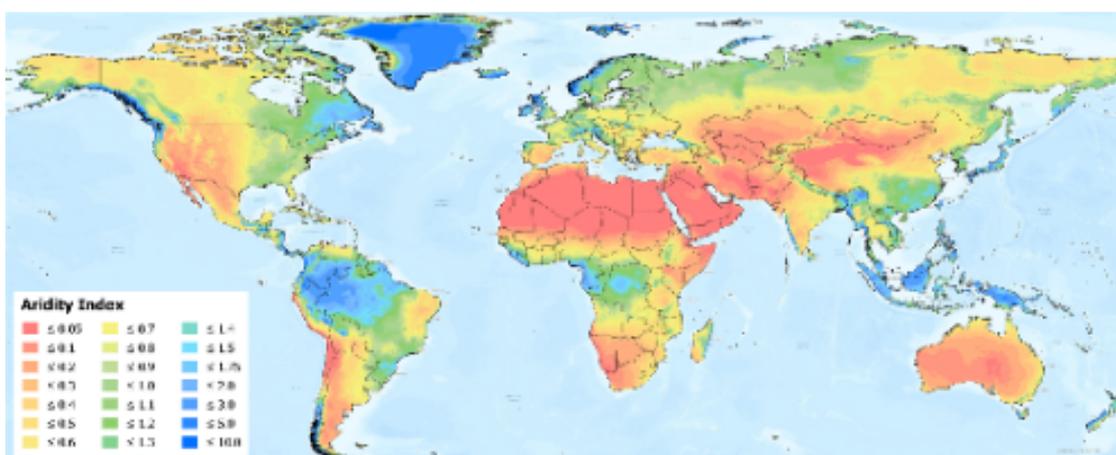


Figura 2. Distribución geográfica global de regiones áridas, delimitada en función del índice de aridez CSI. Fuente: <https://csidotinfo.wordpress.com/data/global-aridity-and-pet-database/>

Para realizar el procesamiento de los datos se emplearon diversas herramientas computacionales dedicadas al manejo de datos geoespaciales, las cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Software utilizado para el modelado de Factores mediante EMC.

Software	Versión	Fuente
QGIS	3.36.3	https://www.qgis.org/es/site/
ArcGIS	10.3	https://enterprise.arcgis.com/es/portal/10.3/use/develop-app-portal-obsolete.htm
Terrset	2020	https://clarklabs.org/terrset/

3.3. Metodología

La presente investigación tiene la finalidad de identificar zonas áridas en la región Noroeste de México, utilizando métodos de toma de decisiones EMC, para ello se retomó la metodología descrita en [22], incorporando dos parámetros más y descartando el factor de Orientaciones. Primeramente, se requirió identificar y descargar dichos factores.

Posteriormente, se realizó el pre-procesamiento y estandarización de los datos, tomando en cuenta las especificaciones técnicas del área de estudio. Seguidamente, se realizó la homogenización de los factores

aplicando un sistema de inferencia difusa, lo que implicó ponderar los factores y obtener los pesos de cada uno. Este procedimiento se basó en el AHP.

Para integrar los datos se utilizó un WLC y como resultado se generó un mapa de aridez y al mismo se le aplicó la clasificación basada en el IA propuesto por el UNEP para obtener un mapa de zonas áridas el cual indica el nivel de aridez para la región de estudio.

Para la validación de los resultados obtenidos, se realizó una comparación con el mapa del IA del CSI del año 2019 aplicando el índice Kappa y determinar el nivel de similitud entre los píxeles comparados. Todo lo descrito se representa en la Figura 3.

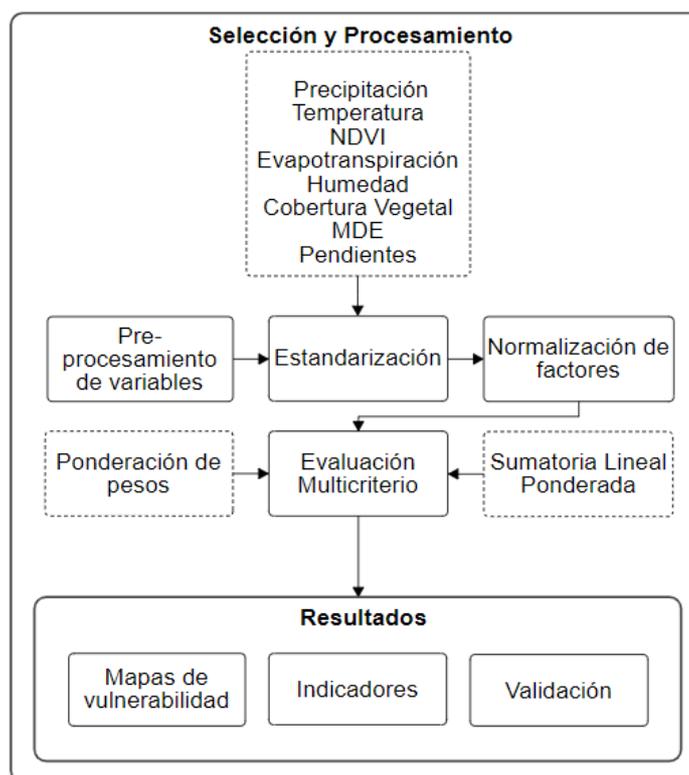


Figura 3. Esquema metodológico del proceso para obtener zonas áridas mediante EMC.

3.3.1. Descarga y procesamiento de los datos

Lo primero que se realizó fue la identificación de los datos provenientes de los diferentes sensores remotos para crear una base de datos geoespacial y ser procesada por los Software SIG. Una vez identificados, se realizó la descarga, localizando plataformas que facilitan el acceso y descarga gratuita de los mismos.

Seguidamente, se creó un mapa base del área de estudio, para lo cual se utilizó el mapa de Regiones Hidrológico Administrativo del portal de CONABIO [38], es un mapa binario donde el 0 indica el área excluida y el 1 indica la región que será objeto de este estudio. Esta máscara cual se utilizó como base para procesar todas las variables, tiene una resolución espacial de 250 metros el tamaño del píxel, 5111 renglones y 5830 columnas (Figura 4).

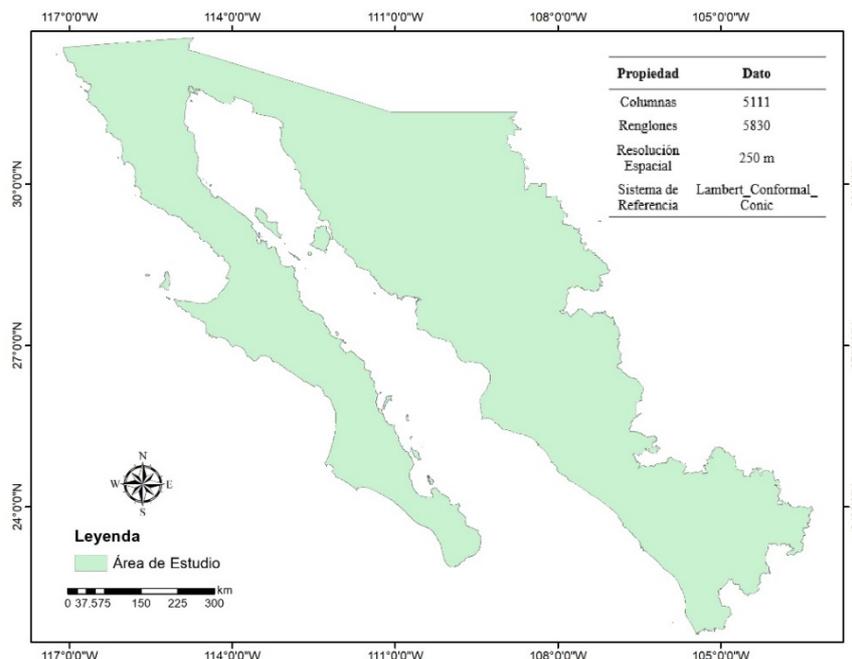


Figura 4. Especificaciones técnicas de la máscara de restricción del área de estudio.

3.3.2. Estandarización de los datos

Seguidamente, se procedió a realizar la estandarización de las variables de acuerdo con las especificaciones técnicas del área de estudio. También se llevó a cabo la corrección de píxeles vacíos mediante el índice de vecino más cercano basado en la distancia promedio desde cada píxel nulo hasta el píxel vecino más cercano y de esta manera se generaron las variables que se utilizaron en el modelado de regiones áridas mediante EMC (Figura 5).

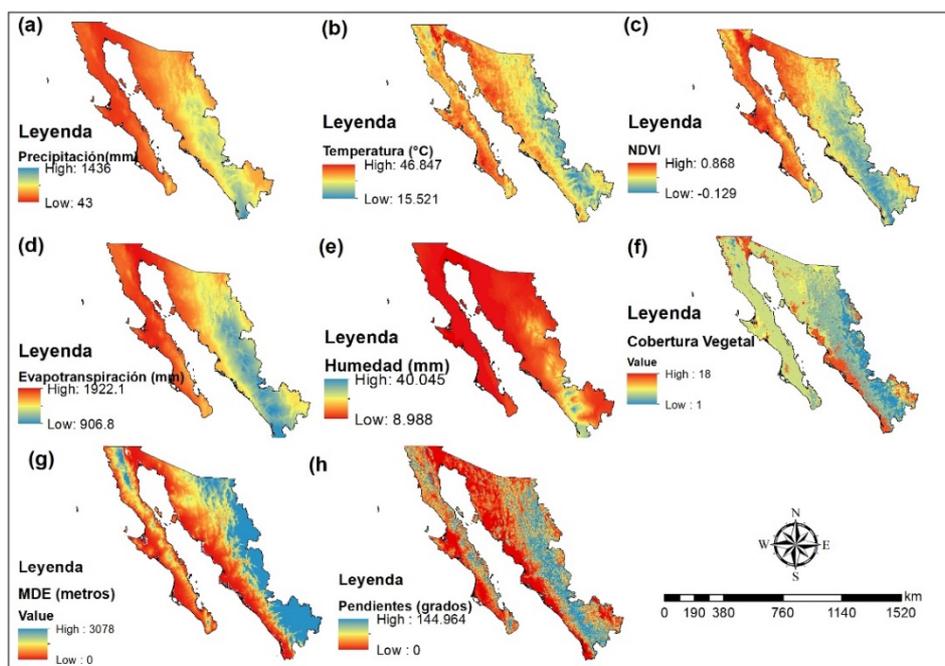


Figura 5. Variables Estandarizadas: a) Precipitación. b) Temperatura. c) NDVI. d) Evapotranspiración. e) Humedad. f) Cobertura Vegetal. g) MDE. h) Pendientes.

3.3.3. Normalización de Factores utilizando Lógica Difusa

Debido a que cada uno de los datos utilizados cuenta con unidades de medida diferente, se requirió realizar una homogenización, para ello se utilizó una función de normalización para convertir cada atributo en una escala comparable, asegurando que todos los parámetros tuvieran valores consistentes, lo cual facilitó su agregación posterior.

En esta investigación se utilizó el método de lógica difusa [39] para obtener una homogenización entre las diferentes unidades de medida de los factores, y el rango de escala 0 - 1 bits, donde valores cercanos a 0 representan regiones vulnerables a aridez y valores cercanos a 1 representan zonas menos aptas a presentar aridez. De este modo, se obtuvieron 7 factores normalizados (Tabla 3).

Tabla 3. Estandarización de los factores por el método de lógica difusa año 2023.

Factor	Valor Mínimo	Valor Máximo	Unidad	Función	Valor Mínimo Estandarizado	Valor Máximo Estandarizado
Precipitación	43	1,436	Milímetros	Lineal Decreciente		
Temperatura	15.5	46.8	°C	Lineal Creciente		
NDVI	-0.129	0.868	NDVI	Lineal Decreciente		
Evapotranspiración	906.8	1,922	Milímetros	Lineal Creciente	0	1
Humedad	8.9	40	Milímetros	Lineal Decreciente		
Cobertura Vegetal	1	7	No Aplica	Lineal Decreciente		
MDE	0	3283	Metros	Lineal Creciente		
Pendientes	0	144.9	Grados	Lineal Creciente		

La Tabla 3 muestra la función utilizada. Una función lineal creciente implica que los valores más altos en la escala reflejan una mayor susceptibilidad a la aridez. En cambio, una función lineal decreciente indica que los valores más bajos señalan una mayor probabilidad de eventos extremos de aridez.

3.3.4. Estimación de los pesos con el método AHP

Para evaluar el proceso de toma de decisiones y determinar las prioridades de cada factor, se estableció el nivel de importancia para cada uno asignándoles un valor (Tabla 4), esto se llevó a cabo con base al estudio realizado en [22], una revisión de la literatura y consulta a expertos. Se tomaron en cuenta la opinión de 17 de expertos: 8 de la Facultad de Ciencias de la Tierra y del Espacio de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), 4 de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y 5 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Estos dictámenes se utilizaron para establecer la relevancia y los pesos asignados a los factores en la evaluación de la idoneidad para la aridez.

Tabla 4. Nivel de importancia de los indicadores que intervienen en el proceso de aridez.

Factor	Nivel de Importancia
Precipitación	9
Temperatura	7
NDVI	6
Evapotranspiración	5
Humedad	4
Cobertura Vegetal	3

MDE	2
Pendientes	1

A partir de lo anterior, se utilizó el método AHP [40] que organiza a los factores en una estructura jerárquica [41]. Los factores se clasificaron con base en la escala sugerida por [25] con valores del 1 al 9 y de este modo, determinar el peso su peso (Figura 6). El AHP aplica una combinación por pares en la que se consideran dos criterios a la vez y de este modo se determina un nivel de importancia entre cada factor [21], [42], [43].

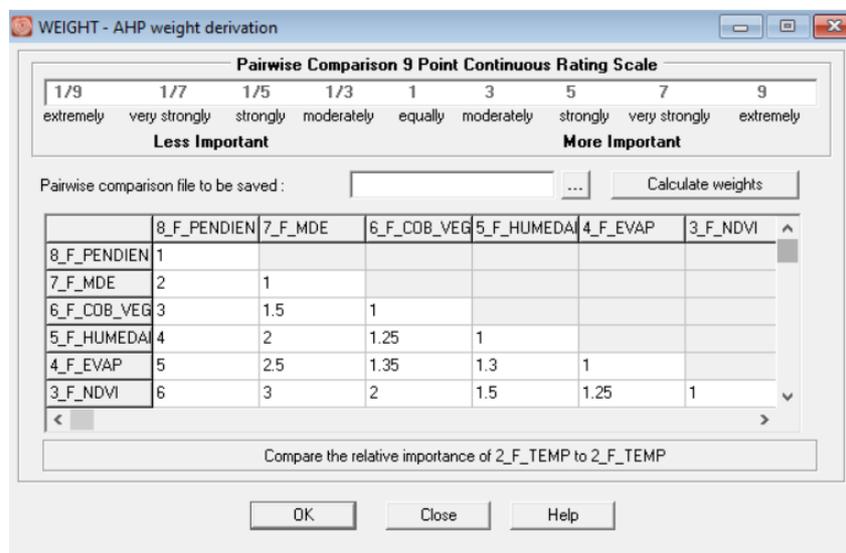


Figura 6. Escala de jerarquías de importancia que se utilizó para la construcción de la matriz de comparación entre pares de factores.

3.3.5. Combinación lineal ponderada WLC

Una vez definidos los niveles de importancia de los factores, se aplicó el método WLC para identificar regiones áridas (Figura 7). WLC calcula la idoneidad de una región potencial utilizando la Ecuación (1) [21], [44].

$$R = \sum_{j=1}^n y_j z_{ij} \tag{1}$$

Dónde: R es el factor ponderado, y_j es el peso del factor, z_{ij} es el valor ponderado de la alternativa i del factor j y n representa la cantidad de parámetros.

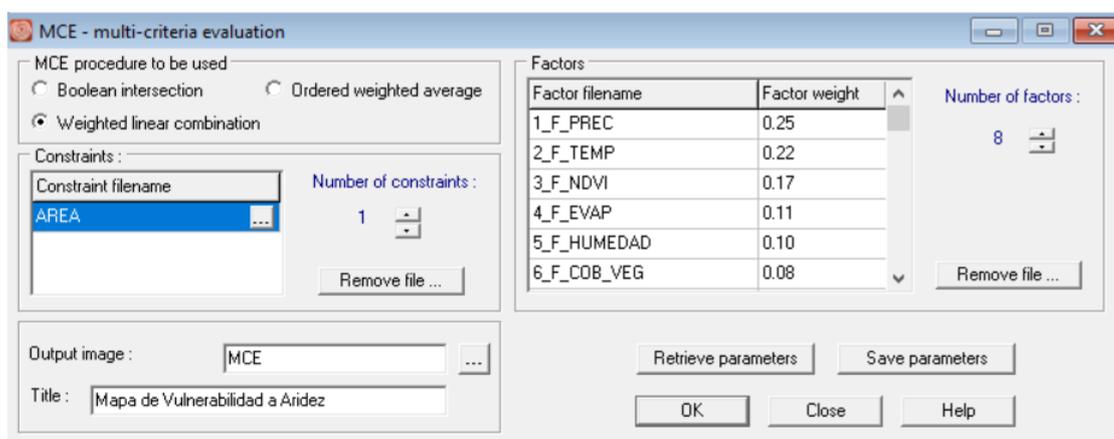


Figura 7. Aplicación de EMC para modelar variables climáticas y ambientales e identificar regiones áridas.

3.3.6. Clasificación de regiones áridas

Para obtener el mapa de zonas áridas, se utilizó la clasificación propuesta por la UNEP (*United Nations Environment Program*) mostrada en la Tabla 5, la cual determina el tipo de clima en 5 categorías [32], [45].

Tabla 5. Clasificación del índice de aridez de UNEP.

Índice	Clima
<0.05	Hiperárido
0.05 – 0.2	Árido
0.2 – 0.5	Semiárido
0.5- 0.65	Subhúmedo Seco
>0.65	Húmedo

3.3.7. Validación de resultados mediante el Índice Kappa

Para validar los resultados, se realizó un análisis comparativo entre el mapa obtenido y el mapa global del IA CSI del año 2019, esto debido a que no se cuenta con un mapa más reciente que represente a las regiones áridas. Dicho mapa se adaptó de acuerdo con las especificaciones técnicas del área de estudio, con el fin de que todos los píxeles coincidieran.

La comparación se realizó aplicando el Índice Kappa, el cual mide el grado de similitud entre los dos mapas [46], [47], [48], para ello se generó una matriz con los coeficientes de correlación entre los píxeles que representan los distintos grados de aridez. La matriz muestra cómo se relacionan entre sí todos los posibles pares de valores de la tabla y de esta manera se obtuvo los indicadores de concordancia de los dos mapas comparados. Esto se refleja mejor en la Ecuación 2.

$$IK = \frac{\Pr(a) - \Pr(e)}{1 - \Pr(e)} \quad (2)$$

Donde IK es el índice Kappa, $\Pr(a)$ es el acuerdo observado y $\Pr(e)$ es la probabilidad hipotética. Los posibles valores del IK se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación del índice Kappa.

Valor de Índice Kappa (IK)	Descripción
1	Existe concordancia perfecta
0	La concordancia se esperaría en virtud de las probabilidades.
< 0	La concordancia es más débil de lo esperado según las probabilidades (pero esto casi nunca ocurre).

4. Resultados

4.1. Pesos obtenidos por AHP

Como resultado de la ponderación de los factores mediante la aplicación de AHP y considerando el nivel de importancia de cada uno de ellos en relación con los demás, se generó una matriz de factores ponderados y pesos definitivas la cual se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Matriz de pesos generada para cada factor.

Factor	Pendientes	MDE	Cobertura Vegetal	Humedad	Evapotranspiración	NDVI	Temperatura	Precipitación	Pesos

Pendientes	1								0.02
MDE	2	1							0.05
Cobertura Vegetal	3	1.5	1						0.08
Humedad	4	2	1.25	1					0.10
Evapotranspiración	5	2.5	1.35	1.3	1				0.11
NDVI	6	3	2	1.5	1.25	1			0.17
Temperatura	7	3.5	2.33	1.75	1.17	1.15	1		0.22
Precipitación	9	4.5	3	2.25	1.5	1.33	1.2	1	0.25

4.2. Factores normalizados mediante Lógica Difusa

Después de aplicar la técnica de Lógica Difusa para todos los factores a una escala comparable estándar (0-1 byte), se obtuvieron los mapas normalizados representando cada una de las variables, y con estos valores ya es posible realizar la modelación con EMC (Figura 8).

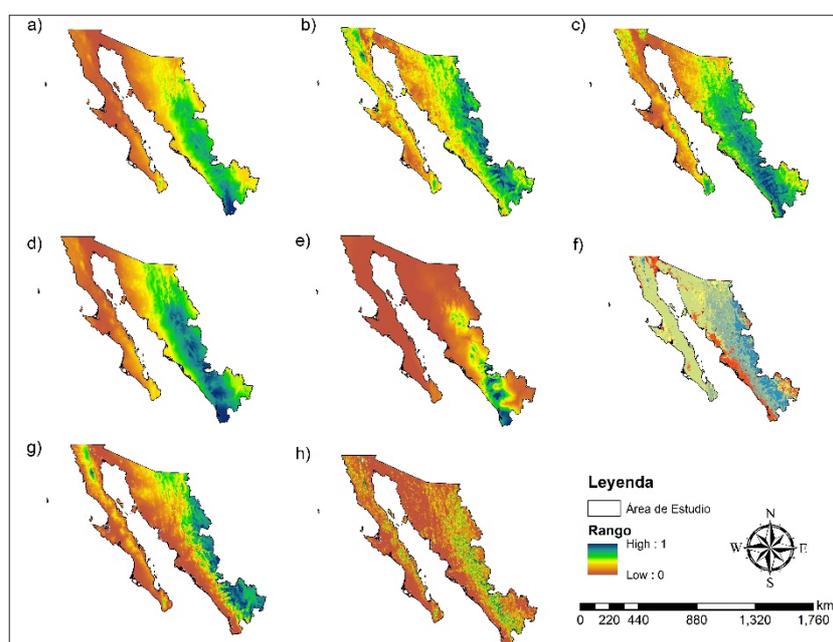


Figura 8. Factores Normalizados: a) Precipitación. b) Temperatura. c) NDVI. d) Evapotranspiración. e) Humedad. f) Cobertura Vegetal. g) MDE. h) Pendientes.

4.3. Mapa de vulnerabilidad a la aridez aplicando EMC

La técnica EMC evaluó a cada factor que intervienen en el aumento de aridez. El procesamiento utilizó como datos de entrada cada uno de los factores con sus respectivos pesos, además, de la variable de restricción en este caso la máscara, cual representa el área de estudio. En los resultados de EMC para regiones áridas, los valores más bajos (cercanos a 0) indican las áreas más susceptibles de experimentar condiciones de aridez (Figura 9).

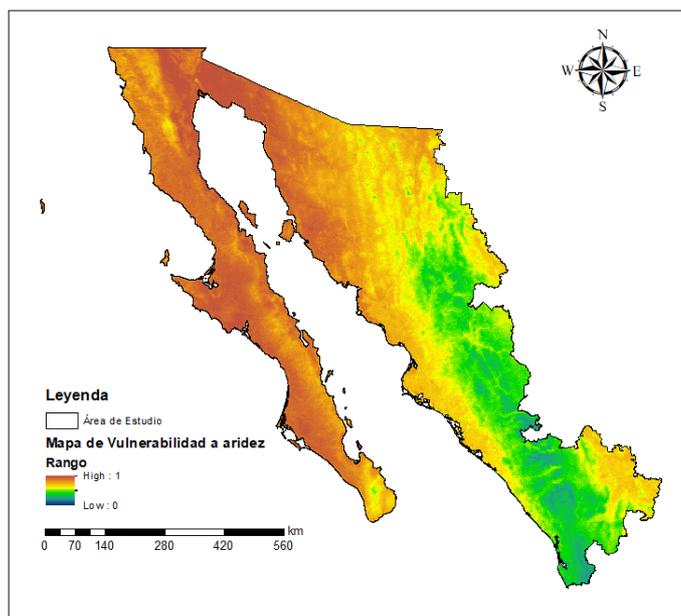


Figura 9. Mapa de áreas vulnerabilidad a aridez.

4.4. Distribución espacial de la aridez

El mapa de áreas vulnerables a aridez fue categorizado usando el IA definido por la UNEP (Figura 10), en el cual, los resultados indicaron que las áreas con mayor grado de aridez se localizan en la parte norte y noroeste del área de estudio y las regiones menos áridas se presentan al suroeste. Además, el análisis espacial y temporal de los datos mostraron que el 41.7% del área está cubierta por regiones áridas, abarcando la mayor parte de los Estado de Baja California, Baja California Sur y la parte oeste de Sonora, mismos que se caracterizan por su clima seco y cálido.

Mientras que el 30.48% representan zonas semiáridas, ya que estas se ubican mayormente en la región de Sonora y al oeste de Sinaloa en las cuales predominan los climas de tipo seco y semiseco. Por su parte, las regiones subhúmedas abarcan el 27.67%, localizadas en su mayoría en la Cuenca Pacifico Norte, debido a que en esta zona se encuentra la Sierra Madre Occidental la cual es considerada como una región altamente diversa tanto en vegetación, temperatura y precipitación. Finalmente, las regiones húmedas fueron representadas en menor con menos del 1% del área de estudio localizadas en la parte este, donde se ubica la Sierra Madre Occidental.

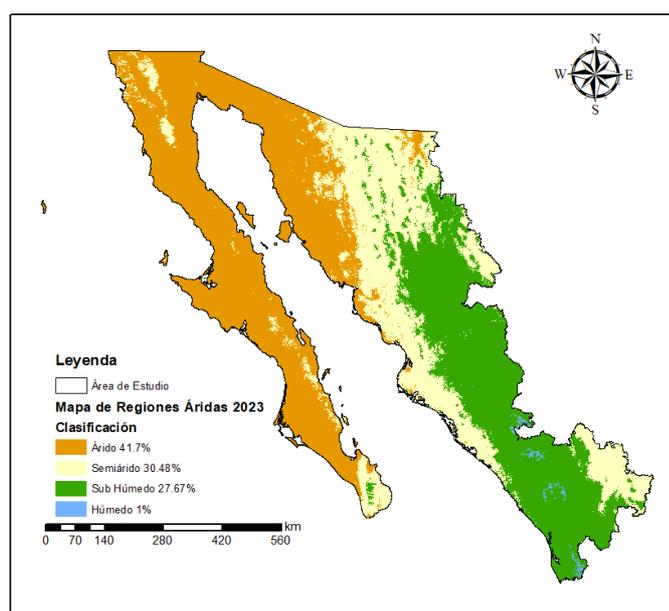


Figura 10. Mapa de áreas zonas áridas. Región noroeste de México.

A nivel de regiones Hidrológico Administrativas, los indicadores geoespaciales de superficies de aridez reflejan que en la RHA I PBC predominan las zonas áridas afectando principalmente los estados de Baja California y Baja California Sur, mientras que las semiáridas se encuentran mayormente en la RHA II Noroeste predominando en el estado de Sonora, por su parte, las regiones más húmedas se encuentran en RHA III PN sobre todo en los estados de Sinaloa, Chihuahua y Durango (Figura 11 y Tabla 8 marcados en negrita).

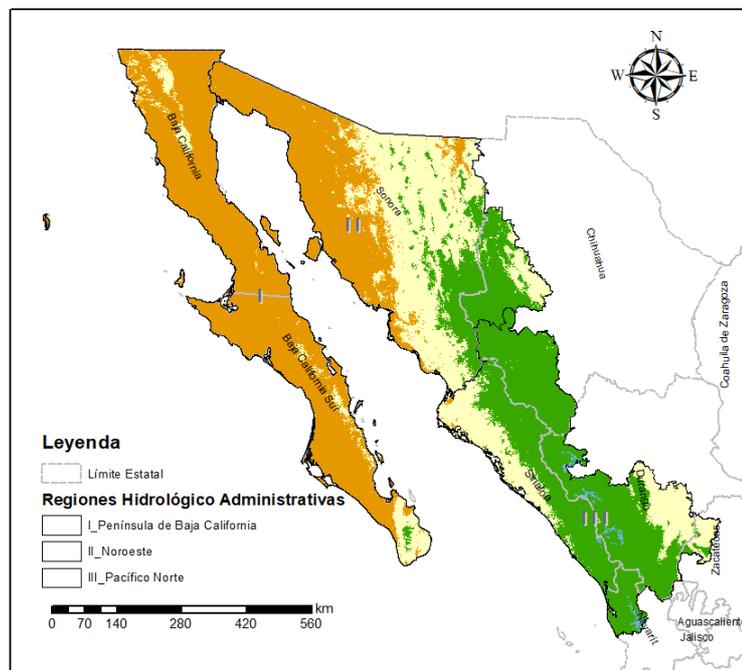


Figura 11. Mapa de áreas zonas áridas. Región noroeste de México.

Tabla 8. Superficies y porcentajes de aridez por regiones Hidrológico Administrativas.

Región	Árido		Semiárido		Subhúmedo		Húmedo	
	km2	%	km2	%	km2	%	km2	%
Península de Baja California	129,821	26.02	13,830.90	2.77	644.01	0.13	0	0
Noroeste	76,578.90	15.35	87,935.80	17.63	41,568.20	8.33	0	0
Pacífico Norte	471.07	0.09	36,295.50	7.28	109,894.00	22.03	1841.45	1.02

4.5. Validación de resultados mediante el Índice Kappa

Los mapas comparados mediante el índice Kappa se muestran en la Figura 12, que dio como resultado un indicador de 0.8871 (Figura 13), de acuerdo con este índice, valores cercanos a 1 representa buena concordancia entre los datos comparados. Si bien, no se esperaba que el valor fuera 1, esto debido a que los años comparados no son iguales, y analizando el mapa del IA CSI, se pueden observar regiones más húmedas, esto puede reflejar que las regiones áridas están en aumento y a su vez, una disminución de las regiones húmedas.

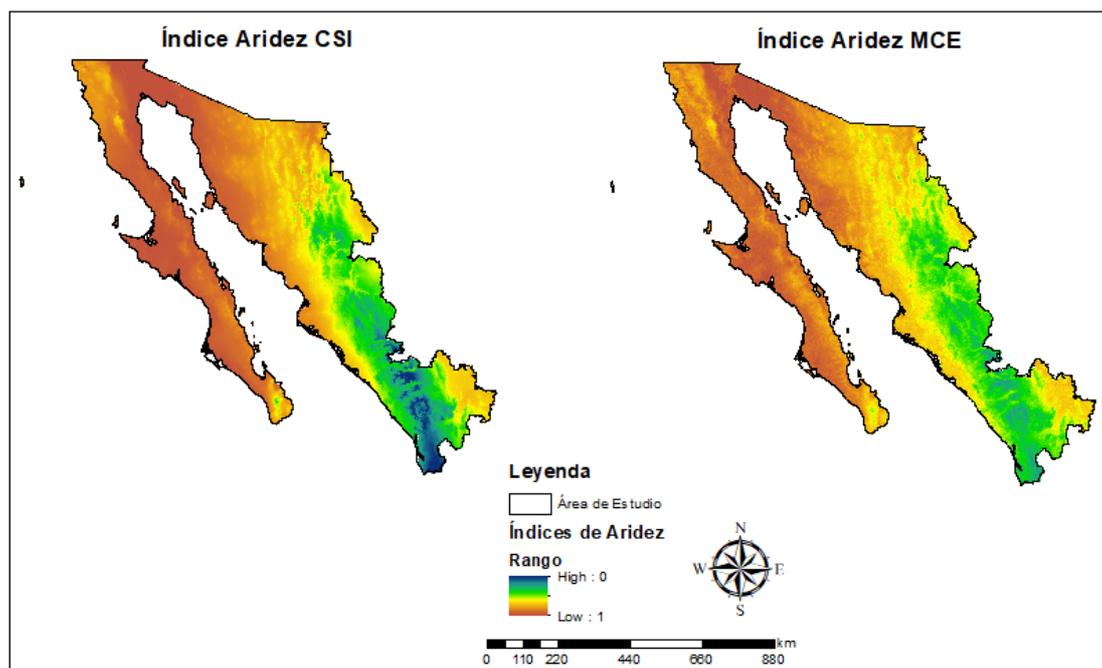


Figura 12. Comparación de Índices de Aridez. Izquierda: Índice de Aridez del CSI (2019). Derecha: Índice de Aridez mediante EMC (2023).

Kappa Index of Agreement (KIA)

1) Using *Índice Aridez MCE* as the reference image

Category	KIA
0	0.7974
1	0.9997

2) Using *Índice Aridez CSI* as the reference image

Category	KIA
0	0.9997
1	0.7974

Overall Kappa: 0.8871

Figura 13. Resultado de Índice Kappa comparando los dos índices de aridez.

5. Conclusiones

Existen diversas formas de modelar y analizar la severidad de la aridez, muchos estudios utilizan IA y clasificación climática por su facilidad y simplicidad como los IA de Martonne [7], [8] y Köppen [9], donde sus factores principales son precipitación y temperatura. Otro IA muy utilizado es el propuesto por la FAO [11], [12] y el PNUMA [10], [13] esos índices requieren precipitación y evapotranspiración para ser generados.

Esta investigación se centró en el método de EMC basado en la metodología descrita en [22], que se centra en la utilización de las técnicas AHP y en WLC para identificar la importancia de los factores causantes de la aridez, combinar un conjunto de mapas, estandarizar la idoneidad de los criterios, asignarles pesos de importancia relativa y modelar con precisión la relevancia de los indicadores en función de sus efectos sobre las amenazas de esta condición [24], [49], [50], [51].

Se puede afirmar que los factores utilizados se integraron adecuadamente en el modelo de aridez a nivel regional. Además, se pudo realizar una comparación mediante el Índice Kappa con el IA global del CSI, que dio

resultados arriba de 0.8, pudiendo argumentar que los años comparados no son los mismos y además el IA CSI fue generado con menos factores. Aun así, el mapa de aridez generado en esta investigación representa los resultados esperados lo que permitió un análisis más detallado del problema en estos ecosistemas.

Este estudio también brindó una importante oportunidad para avanzar en la aplicación de toma de decisiones mediante el desarrollo de un método de EMC basado en AHP y WLC para determinar la idoneidad de la aridez y clasificar las regiones áridas.

En trabajos futuros, esta metodología se puede mejorar incorporando otros datos ambientales, climático y territoriales y con una mejor resolución espacial. Por consiguiente, investigaciones futuras deben enfocarse en una evaluación más exhaustiva que incluya datos como la cobertura vegetal, recursos hídricos, clima local, tipos de suelos y otros indicadores socioeconómicos para evaluar los riesgos de esta condición.

6. Referencias

- [1] Dunkerley, D. (2020). The Ecohydrology of Desert Environments: What Makes it Distinctive? En M. I. Goldstein, D. A. DellaSala (Eds.), *Encyclopedia of the World's Biomes* (pp. 23–35). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11803-2>
- [2] ONU. (2010). *¿Qué son las zonas secas?* <http://www.fao.org/dryland-forestry/background/what-are-drylands/es/>
- [3] 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>
- [4] Sánchez-Cano, J. E. (2019). *Desarrollo sostenible de zonas áridas y semiáridas frente al cambio climático* (1era Ed.). Universidad Juárez del Estado de Durango. <https://play.google.com/books/reader?id=m36kDwAAQBAJ&pg=GBS.PP1&hl=es>
- [5] FAO. (2007). *Secuestro de carbono en tierras áridas*. <http://www.fao.org/3/Y5738s/Y5738s.pdf>
- [6] 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*, 19 (1), 45–66. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.10.077>
- [7] 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. *Universidad y Ciencia*, 26 (1), 51–64. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15416251004>
- [8] 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>
- [9] Spinoni, J., Vogt, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P. (2015). Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen–Geiger classification and FAO aridity index. *International Journal of Climatology*, 35 (9), 2210–2222. <https://doi.org/10.1002/joc.4124>
- [10] 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.
- [11] Li, Y., Feng, A., Liu, W., Ma, X., Dong, G. (2017). Variation of Aridity Index and the Role of Climate Variables in the Southwest China. *Water*, 9 (10), 1–14. <https://doi.org/10.3390/w9100743>
- [12] Zomer, R. J., Xu, J., Trabucco, A. (2022). Version 3 of the Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database. *Scientific Data*, 9 (1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01493-1>
- [13] 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*, 17 (Especial), 267–275. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v17nspe/v17nspea24.pdf>
- [14] Romero Dávila, J. T., Romero Dávila, Y. G., Cartuche Paqui, D. V. (2018). Evaluación multicriterio de los recursos turísticos en la Parroquia Uzhcurrumi, Canton Pasaje, Provincia de El Oro. *Revista interamericana de ambiente y turismo (RIAT)*, 14 (2), 102–113. <https://riat.atalca.cl/index.php/test/article/view/463>
- [15] Holguín Castaño, V., Ortiz Grisalez, S., Velasco Navia, A., Mora Delgado, J. R. (2015). Evaluación multicriterio de 44 introducciones de *Tithonia diversifolia* (hemsl.) Gray en Candelaria, Valle del Cauca.

- Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 62 (2), 57–72.
<https://doi.org/10.15446/rfmvz.v62n2.51995>
- [16]Palacios Orejuela, G. B. (2018). Evaluación Multicriterio para la ubicación de un relleno sanitario en la Ciudad de Macas, a través de la ponderación de sus variables con el Proceso Analítico Jerárquico, AHP. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, 3 (3), 60-71. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-seguridad-defensa/article/view/RCSVDV3N2ART04>
- [17]Vanegas, J. G., Restrepo, J. A., Arango, A. I., Henao, A. C., Ortiz Mazo, E. (2017). Evaluación multicriterio e inventario de atractivos turísticos: Estudio de caso. *Revista Espacios*, 38 (23), 1-6.
<https://www.revistaespacios.com/a17v38n23/a17v38n23p25.pdf>
- [18]Ahmed, A., Ranasinghe-Arachchilage, C., Alrajhi, A., Hewa, G. (2021). Comparison of Multicriteria Decision-Making Techniques for Groundwater Recharge Potential Zonation: Case Study of the Willochra Basin, South Australia. *Water*, 13 (4), 1-26. <https://doi.org/10.3390/w13040525>
- [19]Gómez Delgado, M., Barredo Cano, J. I. (2005). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio* (2da. Ed.). Ra-ma.
- [20]Hernández-Zaragoza, P., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete, A., Martínez-Trinidad, T. (2019). Evaluación multicriterio y multiobjetivo para optimizar la selección de áreas para establecer plantaciones forestales. *Madera y bosques*, 25 (2), 1-17. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521819>
- [21]Monjardin-Armenta, S. A., Plata-Rocha, W., Pacheco-Angulo, C. E., Franco-Ochoa, C., Rangel-Peraza, J. G. (2020). Geospatial Simulation Model of Deforestation and Reforestation Using Multicriteria Evaluation. *Sustainability*, 12 (24), 1-20. <https://doi.org/10.3390/su122410387>
- [22]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*, 10 (11), 1-17. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110720>
- [23]Perez-Aguilar, L. Y., Plata-Rocha, W., Monjardin-Armenta, S. A., Franco-Ochoa, C. (2022). Aridity Analysis Using a Prospective Geospatial Simulation Model in This Mid-Century for the Northwest Region of Mexico. *Sustainability*, 14 (22), 1-22. <https://doi.org/10.3390/su142215223>
- [24]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>
- [25]Saaty, T. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1 (1), 83-98. <https://doi.org/10.1504/IJSSci.2008.01759>
- [26]García Soldado, M. J., Chica Olmo, M. (2012). *Comparación de los métodos de evaluación multicriterio AHP y OWA para el análisis de la vulnerabilidad de un acuífero detrítico*. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Madrid, España.
- [27]Kurttila, M., Pesonen, M., Kangas, J., Kajanus, M. (2000). Utilizing the analytic hierarchy process (AHP) in SWOT analysis - A hybrid method and its application to a forest-certification case. *Forest Policy and Economics*, 1 (1), 41-52. [https://doi.org/10.1016/S1389-9341\(99\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(99)00004-0)
- [28]Mallick, J., Singh, R. K., M., AlAwadh, M. A., Islam, S., Khan, R. A., Qureshi, M. N. (2018). GIS-based landslide susceptibility evaluation using fuzzy-AHP multi-criteria decision-making techniques in the Abha Watershed, Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences*, 77 (7), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7451-1>
- [29]Gutiérrez-Ruacho, O. G., Brito-Castillo, L., Villarruel Sahagún, L., Troyo-Diéguez, E. (2012). Distribución espacial de la temperatura y precipitación y su relación con la vegetación del estado de Sonora. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 11 (2), 106–111.
https://www.redalyc.org/pdf/4555/Resumenes/Abstract_455545059007_2.pdf
- [30]UNEP. (1997). *World Atlas of Desertification* (2da Ed.). Oxford University Press.
- [31]CONAGUA. (2019). *Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)*.
<https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/spi>
- [32]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://dx.doi.org/10.2760/06292>
- [33]INEGI. (2021). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. <https://www.inegi.org.mx/>

- [34] CONAGUA. (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa I Península de Baja California*. <https://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/1-sgp-17-12pbc.pdf>
- [35] CONAGUA. (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa II Noroeste*. <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/2-sgp-17-12n.pdf>
- [36] CONAGUA. (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa III Pacífico Norte*. <https://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/3-sgp-17-12pn.pdf>
- [37] CGIAR-CSI. (2021). *Global Aridity and PET Database*. <https://cgiarcsi.community/data/global-aridity-and-pet-database/>
- [38] CONABIO. (2020). *Portal de Información Geográfica*. <https://www.gob.mx/conabio>
- [39] 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. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106646>
- [40] Ishizaka, A., Labib, A. (2011). Review of the main developments in the Analytic Hierarchy Process. *Expert Systems with Applications*, 38 (11), 14336-14345. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>
- [41] Saaty, T. L. (1997). 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)
- [42] Criado, M., Martínez-Graña, A., Santos-Francés, F., Veleza, S., Zazo, C. (2017). Multi-criteria analyses of urban planning for city expansion: A case study of Zamora, Spain. *Sustainability*, 9 (10), 1-18. <https://doi.org/10.3390/su9101850>
- [43] Diaz Salgado, J., López Blanco, J. (2000). Evaluación del potencial para acuicultura costera de camarón en el entorno de la laguna de Mar Muerto, mediante la aplicación de técnicas de análisis multicriterio con un SIG. *Investigaciones geográficas*, (41), 62-80. <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n41/n41a5.pdf>
- [44] 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>
- [45] Barrow, C. J. (1992). World atlas of desertification (United nations environment programme). *Land Degradation & Development*, 3 (4), 249–249. <https://doi.org/10.1002/ldr.3400030407>
- [46] Bonhomme, V., Castets, M., Morel, J., Gaucherel, C. (2015). Introducing the vectorial Kappa: An index to quantify congruence between vectorial mosaics. *Ecological Indicators*, 57, 96–99, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.007>
- [47] Feizizadeh, B., Darabi, S., Blaschke, T., Lakes, T. (2022). QADI as a New Method and Alternative to Kappa for Accuracy Assessment of Remote Sensing-Based Image Classification. *Sensors*, 22 (12), 1-21. <https://doi.org/10.3390/s22124506>
- [48] Livadiotis, G., McComas, D. J. (2013). Understanding Kappa Distributions: A Toolbox for Space Science and Astrophysics. *Space Science Reviews*, 175 (1), 183–214. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9982-9>
- [49] 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*, 10 (3), 1-33. <https://doi.org/10.3390/su10030803>
- [50] 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>
- [51] Ullah, K. M., Mansourian, A. (2016). Evaluation of Land Suitability for Urban Land-Use Planning: Case Study Dhaka City. *Transactions in GIS*, 20 (1), 20–37. <https://doi.org/10.1111/tgis.12137>