

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**ZONAS POTENCIALES PARA LA RECARGA DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS MEDIANTE EVALUACIÓN MULTICRITERIO EN LA
REGIÓN HIDROLÓGICA 34**

POR:

ING. PATRICIA DANIELA AGUILAR URRUTIA

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

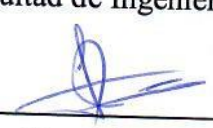
JUNIO 2024



ZONAS POTENCIALES PARA LA RECARGA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS MEDIANTE EVALUACIÓN MULTICRITERIO EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA 34. Tesis presentada por Patricia Daniela Aguilar Urrutia como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobado y aceptado por:



M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez
Director de la Facultad de Ingeniería



Dr. Fernando Martínez Reyes
Secretario de Investigación y Posgrado



M.I. Miguel Ángel González Núñez
Coordinador(a) Académico



Dr. Jesús Alejandro Prieto Amparán
Director(a) de Tesis

Junio 2024

Fecha

COMITÉ

Dr. Jesús Alejandro Prieto Amparán, Director de tesis
Dra. María Socorro Espino Valdes, revisor
M.I. Alejandra Velázquez Cázares, revisor
Dra. Xitlali Virginia Delgado Galván, revisor externo



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

28 de junio de 2024.

ING. PATRICIA DANIELA AGUILAR URRUTIA
Presente. -

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Jesús Alejandro Prieto Amparán** para que lo desarrolle como tesis, con el título **“Zonas potenciales para la recarga de aguas subterráneas mediante evaluación multicriterio en la región hidrológica 34”**.

Índice de Contenido

Resumen

Abstract

Índice de tablas

Índice de figuras

Capítulo 1. GENERALIDADES

- 1.1. Introducción
- 1.2. Antecedentes
- 1.3. Planteamiento del problema
- 1.4. Justificación
- 1.5. Objetivo General
 - 1.5.1. Objetivos Específicos

- 1.6. Hipótesis

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

Capítulo 3. MATERIALES Y MÉTODOS

- 3.1. Localización del área de estudio
- 3.2. Descripción del entorno físico
 - 3.2.1. Clima
 - 3.2.2. Edafología
 - 3.2.3. Uso de suelo y vegetación

**FACULTAD DE
INGENIERÍA**

Circuito No. 1, Campus Universitario II
Tel. (614) 442-9500
Chihuahua, Chih., México





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

- 3.2.4. Hidrología superficial
- 3.2.5. Hidrología subterránea
- 3.2.6. Geología
- 3.3. Factores para selección de las ZPRAS en la RH34
- 3.4. Recopilación de información de los factores
- 3.5. Conjunto de datos
- 3.6. Factores
- 3.7. Estandarización de factores
 - 3.7.1. Pendiente
 - 3.7.2. Litología / Geología
 - 3.7.3. Altitud / Elevación
 - 3.7.4. Índice de Humedad Topográfica (TWI)
 - 3.7.5. Índice de Posición Topográfica (TPI)
 - 3.7.6. Fallas y fracturas
 - 3.7.7. Geomorfología
 - 3.7.8. Curvatura
 - 3.7.9 Suelos
 - 3.7.10. Uso de suelo y vegetación
 - 3.7.11. Precipitación
 - 3.7.12. Densidad de drenaje
 - 3.7.13. Distancia a ríos
 - 3.7.14. Distancia a cuerpos de agua
 - 3.7.15. Distancia a carreteras
 - 3.7.16. Temperatura de la superficie terrestre
- 3.8. Aplicación del método
 - 3.8.1. Evaluación multicriterio
 - 3.8.2. Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)
 - 3.8.3. Superposición ponderada
- 3.9. Proceso de validación



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Distribución espacial de las ZPRAS

4.1.2. Importancia de los expertos mediante AHP

4.1.2.1. Factores topográficos

4.1.2.2. Factores biofísicos o ambientales

4.1.2.3. Factores de distancia o proximidad

4.1.2.4. Distribución espacial de las zonas potenciales para la recarga de aguas subterráneas en la RH34 Cuencas Cerradas del Norte

4.2. Interpretación de los resultados

4.3. Validación

4.4. Discusión

Capítulo 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

5.2. Recomendaciones

REFERENCIAS CONSULTADAS

ANEXOS

ATENTAMENTE

"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

**M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ
MARTÍNEZ**

**FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.**



DIRECCIÓN

**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

DR. FERNANDO MARTÍNEZ REYES

**FACULTAD DE
INGENIERÍA**

Circuito No. 1, Campus Universitario II
Tel. (614) 442-9500
Chihuahua, Chih., México





Dedicatoria

A mi hijo, quiero que veas en mi un ejemplo de que el esfuerzo rinde frutos.

A mi esposo por su apoyo y amor incondicional.



Agradecimientos

Le agradezco a Dios por todas las virtudes y bendiciones que me da día con día.

A mi familia por todo el amor que me dan, ustedes son mi zona segura siempre.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por el apoyo a la investigación que me permitió realizar la Maestría.

A la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), mi *alma mater*.

A la Facultad de Ingeniería.

A mi comité de tesis conformado por docentes investigadores a quienes admiro profundamente:

Mi director de tesis el Dr. Jesús Alejandro Prieto Amparán gracias por tanta paciencia, apoyo y todas sus enseñanzas.

La Dra. María Socorro Espino Valdes quien con tanta experiencia me ayudó en la formación de escritura y la comparación de variables.

La M.I. María Alejandra Velázquez Cázares a quien admiro por su amplio conocimiento en hidráulica de pozos y acuíferos

A la Dra. Xitlali Virginia Delgado Galván por su extensa experiencia con el uso del AHP.

A mis maestros y coordinador de la maestría por brindarme las herramientas necesarias para lograr esta meta.

A mis compañeros de maestría, Fernanda Ponce y Manuel García, que bueno fue coincidir con ustedes, gracias por hacer que los desvelos haciendo tarea sean divertidos.

A mis dos mejores amigas Ana y Cecy, agradezco tanto que estén en mi vida.



RESUMEN

ZONAS POTENCIALES PARA LA RECARGA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS MEDIANTE EVALUACIÓN MULTICRITERIO EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA 34

POR:

I.E. PATRICIA DANIELA AGUILAR URRUTIA

Maestría en Ingeniería en Hidrología

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma de Chihuahua

La Región Hidrológica No. 34 Cuencas Cerradas del Norte se encuentra ubicado en el estado de Chihuahua y una porción en el estado de Sonora.

En gran parte de la región, se requiere hacer uso de la extracción de aguas subterráneas para satisfacer la creciente demanda del recurso hídrico tanto para el uso doméstico como para el uso agrícola e industrial, por lo que es necesario la localización de suministros de agua subterránea, lo cual es posible con métodos tradicionales como sondeos y detección geoeléctrica. No obstante, estos métodos son costosos y tardados, por lo que es necesario contar con tecnologías como los sistemas de información geográfica (SIG) y modelos que permitan la identificación de zonas potenciales para la recarga de aguas subterránea (ZPRAS).

El presente estudio incorporar los SIG y la evaluación multicriterio (EMC) en conjunto con el proceso de jerarquía analítica (por sus siglas en ingles *AHP*) y la superposición ponderada.

El trabajo consistió en integrar 16 factores que intervienen en la recarga de aguas subterráneas, los cuales se dividieron en tres grupos: factores topográficos, factores biofísicos o ambientales y factores de distancia o proximidad. Se reclasificaron en la escala de Saaty (1980) y expertos en materia del agua compararon los factores asignando pesos a cada uno como lo indica el AHP.

Con la superposición ponderada se obtuvieron mapas de distribución espacial de las ZPRAS de cada uno de los factores. El primer mapa de factores topográficos mostró un alto potencial en las planicies y valles de la RH34 debido a que los



factores topográficos así lo determinaron. El segundo mapa resalta una muy alta idoneidad en los cuerpos de agua de las zonas con menor temperatura y mayor precipitación debido a que los factores biofísicos así lo establecieron. El tercer mapa de factores de distancia o proximidad indican una aptitud alta en aquellas zonas con alta densidad de drenaje y fracturas y una baja en regiones donde los cuerpos de agua son escasos.

Finalmente, con la superposición ponderada, los mapas de idoneidad de los tres grupos de factores proporcionaron un mapa con la distribución espacial de las zonas potenciales para la recarga de aguas subterráneas en el cual predomina una idoneidad moderada y alta distribuida por toda la RH34.

Se realizó el proceso de validación como lo indica la literatura obteniendo un mapa con un Índice de vegetación de diferencia normalizada (por sus siglas en inglés NDVI) el cual muestra zonas en donde se retiene la humedad o existen cuerpos de agua y por medio de la Curva ROC se obtuvo el área bajo la curva mostrando un valor de 0.79.



ABSTRACT

BY:

I.E. PATRICIA DANIELA AGUILAR URRUTIA

Hydrological Region No. 34 Northern Closed Basins is located in the state of Chihuahua and a portion in the state of Sonora.

In this region, groundwater extraction is required to satisfy the growing demand for water resources for domestic, agricultural and industrial use, so it is necessary to locate groundwater resources, which is possible with traditional methods such as drilling and geoelectric detection. However, these methods are costly and time-consuming, so technologies like geographic information systems (GIS) and models that allow the identification of potential groundwater recharge zones (ZPRAS) are needed.

The present study incorporates GIS and multi-criteria evaluation (EMC) in combination with the analytical hierarchy process (AHP) and weighted overlay.

The work consisted of integrating 16 criteria involved in groundwater recharge, which were divided into three groups, topographic factors, biophysical or environmental factors, and distance or proximity factors. They were reclassified on the Saaty (1980) scale and experts compared the criteria by assigning weights to each as indicated by the AHP.

With the weighted overlay, obtained spatial distribution maps of the ZPRAS for each of the factors.

The first map of topographic factors showed a high potential in the plains and valleys of RH34 as determined by the topographic criteria. The second map shows a very high suitability in the water bodies of the areas with lower temperature and higher precipitation as determined by the biophysical criteria. The third for distance or proximity factors indicate a high suitability in those areas with high drainage density and fractures and a low suitability in regions where water bodies are limited.

Finally, with the weighted overlay, the suitability maps of the three groups of factors provided a map with the spatial distribution of potential zones for groundwater recharge in which moderate and high suitability is predominantly distributed throughout the RH34.



The validation process was carried out as indicated in the literature, obtaining a map with a Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) which shows areas where moisture is retained after precipitation events and by means of a ROC Curve the area under the curve was obtained, which indicates the predictive capacity of the methodology used.



Índice de contenido

Resumen	8
Abstract.....	10
Índice de tablas.....	14
Índice de figuras	14
Capítulo 1. GENERALIDADES	15
1.1. Introducción.....	15
1.2. Antecedentes	18
1.3. Planteamiento del problema.....	19
1.4. Justificación.....	19
1.5. Objetivo General	20
1.5.1. Objetivos Específicos	20
1.6. Hipótesis	21
Capítulo 2. MARCO TEÓRICO	22
Capítulo 3. MATERIALES Y MÉTODOS	27
3.1. Localización del área de estudio	27
3.2. Descripción del entorno físico	28
3.2.1. Clima	28
3.2.2. Edafología.....	30
3.2.3. Uso de suelo y vegetación.....	32
3.2.4. Hidrología superficial	33
3.2.5. Hidrología subterránea	36
3.2.6. Geología	42
3.3. Factores para selección de las ZPRAS en la RH34	44
3.4. Recopilación de información de los factores	45
3.5. Conjunto de datos	45
3.6. Factores	46
3.7. Estandarización de factores	48
3.7.1. Pendiente.....	48
3.7.2. Litología / Geología.....	48
3.7.3. Altitud / Elevación	49
3.7.4. Índice de Humedad Topográfica (TWI)	49
3.7.5. Índice de Posición Topográfica (TPI)	49
3.7.6. Fallas y fracturas	50
3.7.7. Geomorfología	50
3.7.8. Curvatura.....	50
3.7.9 Suelos.....	51



3.7.10. Uso de suelo y vegetación.....	51
3.7.11. Precipitación	52
3.7.12. Densidad de drenaje.....	52
3.7.13. Distancia a ríos	52
3.7.14. Distancia a cuerpos de agua	52
3.7.15. Distancia a carreteras.....	53
3.7.16. Temperatura de la superficie terrestre	53
3.8. Aplicación del método	58
3.8.1. Evaluación multicriterio	58
3.8.2. Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)	58
3.8.3. Superposición ponderada.....	60
3.9. Proceso de validación	60
Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
4.1 Distribución espacial de las ZPRAS.....	67
4.1.2. Importancia de los expertos mediante AHP.....	68
4.1.2.1. Factores topográficos.....	68
4.1.2.2. Factores biofísicos o ambientales	69
4.1.2.3. Factores de distancia o proximidad.....	70
4.1.2.4. Distribución espacial de las zonas potenciales para la recarga de aguas subterráneas en la RH34 Cuencas Cerradas del Norte	71
4.2. Interpretación de los resultados	72
4.3. Validación.....	73
4.4. Discusión.....	74
Capítulo 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
5.1. Conclusiones.....	77
5.2. Recomendaciones.....	78
REFERENCIAS CONSULTADAS	79
ANEXOS.....	91



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores implementados en la delimitación de zonas potenciales de recarga de aguas.....	46
Tabla 2. Estandarización de los factores que influyen en la idoneidad para las ZPRAS.	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de área la Región Hidrológica No. 34 Cuencas Cerradas del Norte.	27
Figura 2. <i>Clima de la RH34 Cuencas Cerradas de Norte, según la clasificación de Köppen y modificada por García, 2004.</i>	29
Figura 3. Unidades Edafológicas presentes en la RH34 Cuencas Cerradas del Norte	31
Figura 4. Unidades vegetativas presentes en la RH34 Cuencas Cerradas del Norte	33
Figura 5. Hidrología superficial de la RH34 Cuencas Cerradas de Norte.	35
Figura 6. Hidrología subterránea de la RH34 Cuencas Cerradas del Norte.....	37
Figura 7. Disponibilidad media anual de agua de los 29 acuíferos que convergen dentro de la RH34.	42
Figura 8. Geología de la RH34 Cuencas Cerradas del Norte.....	43
Figura 9. Factores estandarizados en escala de aptitud. (a) Pendiente, (b) Litología/Geología, (c) Altitud/Elevación y (d) Índice de Humedad Topográfica....	54
Figura 10. <i>Pesos asignados por expertos con la comparación de factores topográficos.</i>	65
Figura 11. Pesos asignados por expertos con la comparación de factores biofísicos o ambientales.	66
Figura 12. Pesos asignados por expertos con la comparación de variables en factores de distancia o proximidad.	66
Figura 13. Distribución espacial de ZPRAS con los pesos iguales en cada criterio.	67
Figura 14. Distribución espacial de ZPRAS de los Factores Topográficos	68
Figura 15. Distribución espacial de ZPRAS de los Factores Biofísicos o Ambientales.	69
Figura 16. Distribución espacial de ZPRAS de los Factores de Distancia o Proximidad	70
Figura 17. Distribución espacial de las ZPRAS en la RH34 Cuencas Cerradas del Norte.	71
Figura 18. NDVI (Índice de Diferencia Normalizada).....	73
Figura 19. Validación mediante el modelo de la curva ROC	74



CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

Las aguas subterráneas son consideradas como la fuente más importante de agua, en especial para las regiones áridas y semiáridas del planeta. Su disponibilidad depende de distintos factores como geológicos, morfológicos, biológicos y atmosféricos. Su movimiento se ve afectado por la porosidad, permeabilidad, la capacidad de almacenamiento en rocas y la transmisibilidad (Ahmadi *et al.*, 2020).

A nivel mundial, el uso de aguas subterráneas se destina para el consumo humano (Cotterman *et al.*, 2018; Arunbose *et al.*, 2021) y forma parte del desarrollo tanto en zonas urbanas como rurales, además del sector agrícola e industrial (Ajay *et al.*, 2020). Sin embargo, en distintas regiones áridas caracterizadas por la escasez de precipitación (Abdekareem *et al.*, 2022) y de disponibilidad anual de agua superficial, las aguas subterráneas son la única fuente de este recurso (Alagha *et al.*, 2017; Moodley *et al.*, 2022). Por lo que la conservación y captación es fundamental para abastecer la demanda de agua (Carrard *et al.*, 2019). Entre las acciones que se deben llevar a cabo para la conservación del recurso hídrico, es el monitoreo ambiental, de manera que asegure su disponibilidad y una gestión sostenible con políticas que tengan por objetivo su protección (Cerón *et al.*, 2021).

México cuenta con una variabilidad climatológica muy heterogénea, en especial en el norte del país donde predominan los climas áridos y semiáridos con precipitaciones por debajo de los 500 mm anuales (Caravantes *et al.*, 2013). Por otro lado, la administración del agua se lleva a cabo mediante regiones hidrológicas, en México se delimitan 37 Regiones Hidrológicas, constituidas por cuencas con características morfológicas, hidrológicas y orográficas similares y delimitadas por grandes parteaguas (SEMARNAT, 2015).

El estado de Chihuahua se encuentra ubicado al norte de México, colinda al sur con los estados de Durango y Sinaloa, al este con Coahuila, al oeste con Sonora y al norte con E.U.A. El estado de Chihuahua abarca una superficie de 247,455 km² y se ubica en la franja de los desiertos del hemisferio norte, predominando los climas secos (Medrano, 2012). En el estado convergen cinco regiones hidrológicas (RH),



la RH9 Sinaloa, RH10 Sonora Sur, la RH24 Bravo-Conchos, la RH 35 Mapimí y la RH34 Cuencas Cerradas del Norte la cual abarca un 35.5% del estado (JCAS, 2019) y se divide en 22 cuencas según el Diario Oficial de la Federación (DOF). La última actualización del DOF (2023), indica que todas las cuencas cuentan con volúmenes de agua superficial disponibles, a diferencia de la actualización del año 2020 la cual muestra todas las cuencas con volúmenes de agua superficial disponible con excepción de Río Santa María 1 (DOF, 2020) ubicada al centro del estado, entre los municipios de Namiquipa, Bachíniva, Buenaventura, Ignacio Zaragoza, Guerrero y Temósachic, que en su gran mayoría se desempeñan actividades agrícolas como sustento del desarrollo.

Por otra parte, el panorama del agua subterránea es diferente, la disponibilidad por acuífero indica un déficit en el 62.2% de los acuíferos en el estado de Chihuahua, 38 de los 61 acuíferos presentan cifras negativas y en el caso de la RH34 solo cinco acuíferos cuentan con volúmenes de agua disponibles, (Alta Babícora, Las Palmas, Ignacio Zaragoza, Los Lamentos y Josefa Ortiz de Domínguez). El resto de los acuíferos se encuentran en déficit, siendo el acuífero de Laguna Santa María el más afectado, seguido de Laguna de Tarabillas y Laguna de Hormigas (CONAGUA, 2023).

Entre los principales problemas que enfrentan las aguas subterráneas, está sobreexplotación (Bourjila *et al.*, 2020), debido a la fuerte presión por satisfacer la demanda del crecimiento de la población, así como los efectos del cambio climático, la modificación del uso del suelo/cobertura del suelo y el desarrollo agrícola e industrial (Achu *et al.*, 2020), lo que afecta su disponibilidad (Ahmadi *et al.*, 2020). Por otro lado, la contaminación de aguas superficiales, la falta de tecnificación en los sistemas de riego que provoca desperdicio (Werner *et al.*, 2013) y la falta de actualización en avances tecnológicos de las infraestructuras de bombeo (Giordano, 2009), contribuyen a dicha sobreexplotación.

El aumento de la demanda del recurso hídrico implica la medición mediante sondeos o detección geoeléctrica para localizar suministros subterráneos (Yariyan *et al.*, 2022), ya que es importante asegurar la disponibilidad en relación con las condiciones hidrológicas, topográficas y climáticas (Abdekareem *et al.*, 2022). Sin



embargo, estos métodos no se encuentran al alcance de muchos usuarios ya que son costosos (Ahmadi *et al.*, 2020; Ajay *et al.*, 2020), por lo que el uso de tecnologías de gran alcance son necesarias, y permiten realizar análisis a gran escala, ahorrando recursos y tiempo, ya que conocer los sistemas de flujo de agua subterránea es crucial para una mejor gestión del recurso (Esquivel *et al.*, 2015; Aceves-De-Alba *et al.*, 2019) y la sostenibilidad de su uso. Para esto, una de las tecnologías confiables, rentables y de acceso universal en la evaluación e identificación de suministros de agua son las tecnologías como sensores remotos en conjunto de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Achu *et al.*, 2020). Estas herramientas tienen el potencial para estimar con altos niveles de confiabilidad el suministro de agua subterránea y a su vez visualizar grandes conjuntos de datos (Adhikary *et al.*, 2021) lo que hace posible, en una primera etapa identificar zonas o sitios que reúnan un potencial para la recarga de aguas subterráneas (Masoud *et al.*, 2022). Los SIG permiten organizar y analizar grandes cantidades de datos espaciales como geomorfología, geología, condiciones de recarga, patrones estructurales para el monitoreo ambiental, entre otros (Zende *et al.*, 2012; Ahmadi *et al.*, 2020), además de información hidrogeológica, datos pluviométricos, niveles de agua subterránea, uso de suelo/cobertura del suelo, imágenes satelitales (Aceves-De-Alba *et al.*, 2019).

Aunado a los SIG, existen modelos que permiten integrar distintos factores que desempeñan un papel importante en la identificación de zonas potenciales para la recarga de agua subterránea (ZPRAS) (Ajay *et al.*, 2020). Estos modelos pertenecen al conjunto de técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), las cuales han sido implementadas en la gestión de aguas subterráneas por medio de algoritmos de toma de decisiones multicriterio (Ahmadi *et al.*, 2020; Walker *et al.*, 2021) utilizando el Proceso de Jerarquía Analítica (Saaty, 1980) y la Superposición Ponderada, las cuales se han utilizado en la delimitación de zonas potenciales para la conservación de agua subterránea (Singha *et al.*, 2021).

La EMC consiste en reducir las decisiones complejas para sintetizar los resultados tomando en cuenta la opinión de expertos con respecto a distintos factores como datos hidrológicos, climáticos, geológicos, entre otros, en donde se



le asigna pesos a cada factor con base en una escala de importancia de Saaty integrando los datos en una decisión final (Abdekareem *et al.*, 2022).

1.2. Antecedentes

Pocos documentos se han desarrollado en la Región Hidrológica No. 34 Cuencas Cerradas del Norte; la mayoría de estudios realizados en el estado de Chihuahua con respecto a los recursos hídricos se centran en la RH24 Bravo – Conchos, la cual colinda con la zona de interés, y algunos proyectos muy focalizados en la RH34. Sin embargo, la RH34 forma parte de dos Regiones Hidrológico-administrativas, la primera es la Región Río Bravo que abarca gran parte de la RH34 junto con la RH24 Bravo-Conchos y la RH35 Mapimí (SEMARNAT, 2015), en los municipios de Ahumada, Ascensión, Bachíniva, Buenaventura, Casas Grandes, Cuauhtémoc, Cusihuiriachi, Galeana, Gómez Farías, Ignacio Zaragoza, Janos, Namiquipa, Nuevo Casas Grandes y Riva Palacio (DOF, 1998). Por otro lado, una pequeña porción de la RH34 también forma parte de la Región Hidrológico-administrativa Noroeste, en los municipios de Madera, Temósachic, Matachí, Guerrero y Agua Prieta, Sonora. El concepto administrativo abarca el agua subterránea en un conjunto de acuíferos agrupados con el propósito de la administración del agua.

Entre los estudios que se han realizado en la región, se han determinado los efectos del ENOS (El Niño - Oscilación del Sur) y su impacto en la ecología y economía con el uso de índices hidrológicos de sequía. Así mismo, se ha elaborado un análisis de anomalías en las regiones hidrológicas del estado de Chihuahua, incluyendo la RH34 Cuencas Cerradas del Norte, donde se mostró la vulnerabilidad de los recursos hídricos derivados a este fenómeno, por lo que se concluyó que eran necesarios los sistemas de monitoreo permanente y el aprovechamiento sostenible (Reyes-Gómez *et al.*, 2013).

Así mismo se ha realizado investigación en cuanto a la desertificación en la Región Hidrológico Administrativa II Noroeste, que abarca una porción de la RH34 Cuencas Cerradas de Norte, en donde se indica que existen índices climatológicos de la desertificación que pueden ser estudiados a través del comportamiento de los niveles freáticos en los acuíferos (Noriega, 2017). En un trabajo desarrollado por



Dévora y Cervantes (2019), se identificó que la vulnerabilidad en Chihuahua se debe a las sequías y al grado de sobreexplotación de acuíferos, especialmente en la zona centro del estado. El trabajo realiza un análisis para conocer la situación hídrica del estado desde las perspectivas económicas, ambientales y sociales, así como los proyectos que se han desarrollado para el tratamiento de agua.

Por otro lado, Escalante y Rodríguez (2023) realizaron un inventario de los recursos hídricos de los acuíferos localizados en los municipios de Ascensión, Buenaventura, Casas Grandes, Galeana, Gómez Farías, Ignacio Zaragoza, Janos y Nuevo Casas Grandes con el objetivo de fomentar el desarrollo regional. Los autores mencionan que la crisis del agua es provocada debido a la deficiente gestión del recurso, por lo que se recomienda la detección y monitoreo de cuerpos de agua. El trabajo indica que existen 14 acuíferos dentro de los municipios del área de estudio, el de Ascensión, Buenaventura, Casas Grandes, El Sabinal, Flores Magón – Villa Ahumada, Ignacio Zaragoza, Janos, Josefa Ortiz de Domínguez, La Norteña, Laguna de Santa María, Laguna La Vieja, Las Palmas, Los Moscos y Palomas Guadalupe – Victoria, los cuales son utilizados para el uso doméstico, industrial, agricultura y ganadería con una disponibilidad media anual en déficit de 201.8 hm³, sin embargo, a pesar de que la región noroeste del estado es un área de veda, no se respeta ni vigila correctamente.

1.3. Planteamiento del problema

La mayoría de los acuíferos ubicados en la RH34 Cuencas Cerradas del Norte cuentan con disponibilidad de agua en estatus de déficit, es decir, presentan cifras negativas en cuanto a la disponibilidad de agua subterránea. Sin embargo, resulta complicado detener la sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo debido a la fuerte demanda que ejerce la población en esta zona para el uso agrícola, industrial y doméstico. En ese sentido, es necesario realizar acciones urgentes para conservar el recurso hídrico.

1.4. Justificación

Es necesario asegurar la disponibilidad del recurso hídrico para la demanda actual y futura, por lo que es de gran importancia identificar aquellos sitios o zonas potenciales para la recarga de agua subterránea (ZPRAS), y esto es posible



mediante la integración de técnicas como la EMC y el uso de los SIG en torno a la gestión y uso sostenible de las aguas subterráneas.

La delimitación de ZPRAS es un proceso clave en la protección de la calidad y cantidad de aguas superficiales y subterráneas. Este proceso implica identificar las áreas donde el agua de lluvia y otros recursos naturales permiten la recarga de los acuíferos. Al delimitar las ZPRAS, es posible establecer medidas de protección adecuadas para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas, como la regulación de actividades humanas que puedan afectar la recarga. También es posible establecer prácticas de gestión sostenible para reducir la extracción excesiva de agua subterránea en áreas vulnerables. Además, la delimitación de ZPRAS podría ayudar al desarrollo de planes de gestión de recursos hídricos, lo que podría abonar en la planificación de infraestructura y obras hidráulicas y conducir a la utilización eficiente y sostenible del recurso hídrico subterráneo.

1.5. Objetivo General

El objetivo del presente trabajo es determinar las zonas potenciales para la recarga de aguas subterráneas (ZPRAS) en la Región Hidrológica No. 34 Cuencas Cerradas del Norte, en el norte de México, mediante evaluación multicriterio (EMC) en conjunto con los sistemas de información geográfica (SIG), así como validar los resultados mediante observaciones de áreas con presencia de humedad o cuerpos de agua, obtenidas de imágenes de satélite.

1.5.1. Objetivos Específicos

- Establecer los factores para la selección de las zonas potenciales para la recarga de agua subterránea (ZPRAS).
- Integrar un sistema de información geográfico de los factores que determinen las ZPRAS.
- Obtener los pesos para cada factor mediante el Proceso de Jerarquía Analítica, integrando el conocimiento experto.
- Identificar las áreas de mayor potencial para las ZPRAS mediante la Superposición Ponderada.
- Validar la confiabilidad del modelo de ZPRAS por medio del indicador espectral NDVI y Curva ROC.



1.6. Hipótesis

Las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) en conjunto de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten la integración de información ambiental, social y económica en la toma de decisiones para la gestión del agua subterránea, de manera que es posible delimitar las zonas con potencial para la recarga de aguas subterráneas, las cuales se puedan validar comparando con un mapa Índice de vegetación de diferencia normalizada que muestre las firmas de agua de aquellas zonas con aptitudes para la retención de humedad y por medio de la Curva ROC poder determinar la capacidad predictiva de las metodologías implementadas.



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

El agua subterránea representa el 96% del agua dulce no congelada en el planeta de este recurso. A nivel mundial se utiliza el 42% para el uso agrícola, el 24% para el uso industrial y el 36% se suministra como agua potable (Hosseini *et al.*, 2019). El almacenamiento de aguas subterráneas depende en gran medida de la extracción por actividades humanas y de la recarga natural, la cual se ve afectada por la geología local (Jakeman *et al.*, 2016), por lo que el aumento de estas actividades y de la población continúa desencadenando un aumento considerable en la sobreexplotación de los acuíferos y una disminución en la recarga y almacenamiento (Hosseini *et al.*, 2019; Duran-Llacer *et al.*, 2020). Además, el cambio del uso de suelo/cobertura del suelo por la expansión agrícola y urbana (Moiwo y Tao, 2014) y el cambio climático que modifica patrones hidrológicos y el régimen de precipitación (Feng *et al.*, 2018) también afectan la disponibilidad del recurso hídrico.

A nivel global, la demanda de recursos naturales se ha triplicado en las últimas décadas, lo cual ha aumentado el déficit en la seguridad energética, hídrica y alimentaria (Rodríguez-Urrego *et al.*, 2022). El primer informe de la ONU de 2003 el cual se titula “Desarrollo de los Recursos Hídricos en el mundo: Agua para todos, agua para la vida”, indica que actualmente se enfrenta una crisis mundial del agua, debido a una mala gestión (Madrigal-Solís *et al.*, 2020). El estrés hídrico puede presentarse a corto plazo por la falta de precipitación, lo cual aumenta el volumen de extracción de aguas subterráneas (Gong *et al.*, 2012). Entre los impactos más importantes por este fenómeno está la alteración de los ciclos naturales que causan conflicto por la escasez del agua (Villa, 2020). Según un informe del World Resources Institute, en el 2019 se determinó que existen 17 países con altos niveles de estrés hídrico, y el número de países va en aumento.

El sexto informe del IPCC (2022) evalúa los impactos del cambio climático e indica que las aguas subterráneas son una fuente que garantiza la seguridad alimentaria, sin embargo, la sobreexplotación disminuye la capacidad de adaptación de aquellas regiones que dependen en su gran mayoría de este recurso, además existe desinformación sobre los volúmenes de extracción por la falta de datos a



largo plazo; sin embargo, se afirma que el uso de prácticas para conservar la humedad y mejorar las técnicas de riego pueden aumentar la capacidad de adaptación, además de integrar los datos derivados del satélite GRACE que proporciona estimaciones de almacenamiento en aguas subterráneas a escala regional para acotar la brecha de desinformación (Rodell *et al.*, 2018).

Entre los esfuerzos que se llevan a cabo en torno al recurso hídrico a nivel mundial se encuentra el sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) de Agua limpia y saneamiento, el cual menciona estrategias para eficientar el uso de recursos hídricos como promover la innovación y coordinación intersectorial entorno a la gestión del agua (ONU, 2023).

A pesar de la amplia investigación que se lleva a cabo entorno a las aguas subterráneas, algunos países realizan esfuerzos para conocer distintos aspectos importantes de este recurso como las afectaciones por el cambio climático y los riesgos por la contaminación, ya que, debido a las características hidrogeológicas, las aguas subterráneas son más vulnerables a las actividades humanas y las variaciones ambientales (Cerón *et al.*, 2021). En ese sentido, se indica que para mejorar la calidad del agua tanto superficial como subterránea, es necesario el monitoreo constante, además de supervisar verdaderamente la extracción de aguas subterráneas y el tratamiento de aguas residuales.

Por su parte, México cuenta con 653 acuíferos y según la CONAGUA aproximadamente el 39% de agua para distintos usos, proviene de las aguas subterráneas de los acuíferos (IMTA, 2019). En 1970 se declararon 32 acuíferos sobreexplotados y en el 2016 alcanzó la cifra de 105 (CONAGUA, 2006). En ese mismo año, se determinó que el 35.9% del agua concesionada para el uso agrícola es de origen subterráneo, la cual abastece una tercera parte de la superficie total de riego (CONAGUA, 2016), sin embargo, estos datos se refieren únicamente a los volúmenes concesionados, por lo que existe una ausencia de datos sobre el volumen real extraído y el número de pozos que existen (Hernández-Juárez *et al.*, 2020).

Así mismo, en el Plan Nacional de Desarrollo 2019 - 2024, el gobierno federal propone diversas acciones que incluyen la conservación del recurso hídrico, tal es



el caso del Programa para el desarrollo del Istmo de Tehuantepec, el cual busca impulsar la economía regional a través de la infraestructura que garantiza el abasto de energía, agua e insumos básicos para cubrir necesidades la población. También se menciona el Plan Zona Libre de la Frontera Norte, donde se indica que para lograr la autosuficiencia alimentaria es necesario desarrollar prácticas agroecológicas y sustentables encaminadas a la conservación del suelo, el agua y la agrobiodiversidad (Gobierno de México, 2019), sobre todo en zonas áridas.

Por otro lado, en México existen 10 Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) los cuales responden a la necesidad de problemas nacionales que requieren atención. Uno de los 10 PRONACES se dedica exclusivamente al tema del Agua, el cual busca soluciones a escala nacional de problemas del ciclo socionatural del agua. Se toma en cuenta que la mejor estrategia es una alianza multidisciplinaria con el objetivo de identificar dichos problemas y desarrollar modelos que incidan en todos los niveles de gobierno. Entre los resultados del PRONACE Agua se destaca la colaboración de investigadores, profesionistas, organizaciones, universidades y dependencias que buscan generar soluciones por medio de la coordinación e investigación (CONAHCyT, 2022).

En ese sentido, el Plan Estatal Hídrico 2040 del Estado de Chihuahua (PEH 2040), divide el estado en siete regiones que facilitan el diagnóstico y la realización de foros de propuestas ciudadanas y tiene por objetivo garantizar la seguridad hídrica, incentivar el uso racional del agua en la agricultura, así como la gobernanza, fortalecer los organismos operadores, reducir el riesgo ante fenómenos meteorológicos y promover la educación, investigación e innovación en temas hídricos por medio de la recopilación y análisis de información, foros de consulta, diagnósticos de la administración del agua, análisis de la problemática hídrica, elaboración de proyectos y la determinación de inversión requerida (JCAS, 2019).

En el 2022 la Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS) integró un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) para el uso eficiente de las aguas subterráneas de Chihuahua con el objetivo de favorecer las condiciones de recarga y eficientar su uso y manejo por medio de la evaluación de las condiciones de extracción en los acuíferos que alimentan el municipio de Chihuahua, como es el



caso de Chihuahua – Sacramento, El Sauz – Encinillas y Tabalaopa – Aldama, los cuales se encuentran sobreexplotados (Gobierno del Estado de Chihuahua, 2022).

Mediante la gestión sostenible de las aguas subterráneas es posible mitigar el agotamiento y la sobreexplotación de los acuíferos, ya que de esta forma se puede buscar lograr un equilibrio entre la disponibilidad y la extracción de agua, lo cual asegura su protección y uso para la población (Alley y Leake, 2004; Duran-Llacer *et al.*, 2020), para ello se debe tomar en cuenta que la recarga de los acuíferos depende en su mayoría de la cantidad de lluvia que se infiltra en el subsuelo cuando el suelo supera su capacidad de campo (Gong *et al.*, 2012) y de las condiciones físicas del terreno que favorecen la recarga de aguas subterráneas (Barrera-de-Calderón *et al.*, 2022). Con el uso de sistemas de información geográfica (SIG) es posible realizar el monitoreo espacio-temporal de la lluvia, las condiciones físicas y de los recursos hídricos, para una mejor gestión (Mukate *et al.*, 2019) ya que pueden capturar, analizar, administrar y mostrar información que se encuentra referenciada geográficamente, con la cual se puede tomar decisiones.

La Estrategia Nacional de Seguridad Hídrica para el Manejo de aguas Transfronterizas México-EUA incluye el manejo de información a través de los sistemas de información geográfica de manera que permitan determinar parámetros y variables para evaluar escenarios sobre el manejo de recurso ya que los SIG administran datos para en análisis hidrológico en la toma de decisiones (Martínez, 2017).

Una de las técnicas para la toma de decisiones en cuanto a la conservación del recurso hídrico, en conjunto de los SIG es la Evaluación Multicriterio (EMC), mediante la cual se seleccionan variables o factores que se consideran relevantes para la toma de decisiones. A dichas variables se les asignan distintos pesos, dependiendo de su importancia, para poder obtener puntuaciones de idoneidad o prioridad (Walker *et al.*, 2021). Así mismo, la EMC ha implementado métodos para la obtención de pesos, los principales son: el método de clasificación, el método de valoración, el proceso de jerarquía analítica y el método de análisis de compensación (Prieto-Amparán *et al.*, 2021). Según diversos autores el Proceso de Jerarquía Analítica (por sus siglas en inglés AHP) es uno de los métodos más



utilizado para estudios de gestión de recursos naturales en donde se comparan múltiples factores en una matriz por pares a los cuales se les asigna un peso específico dependiendo de su importancia relativa, por lo que es un método que integra los diferentes puntos de vista de expertos para alcanzar objetivos deseados (Ghosh *et al.*, 2020; Priya *et al.*, 2022).

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del área de estudio

El área de estudio corresponde a la Región Hidrológica No. 34 Cuencas Cerradas del Norte ubicada en la frontera norte de México (Figura 1). Converge al sur y este con la RH 24 Bravo – Conchos y al oeste con la RH 10 Sonora Sur. La Rh 34 cuenta con una superficie de aproximadamente 89,213.29 km² y ocupa el 35.6% del Estado de Chihuahua y un 0.13% del Estado de Sonora en los municipios de Agua Prieta, Bacerac y Bavispe.

Entre los principales municipios que abarca la Región Hidrológica No. 34 se encuentran Ahumada, Aldama, Bachíniva, Buenaventura, Casas Grandes, Cuauhtémoc, Chihuahua, Juárez, Madera, Namiquipa, Nuevo Casas Grandes, Riva Palacio y Temósachic. Así mismo, entre los principales cauces más importantes para el Estado de Chihuahua ubicados en la RH34 están el Río Casas Grandes, Santa María, Santa Clara y El Carmen.

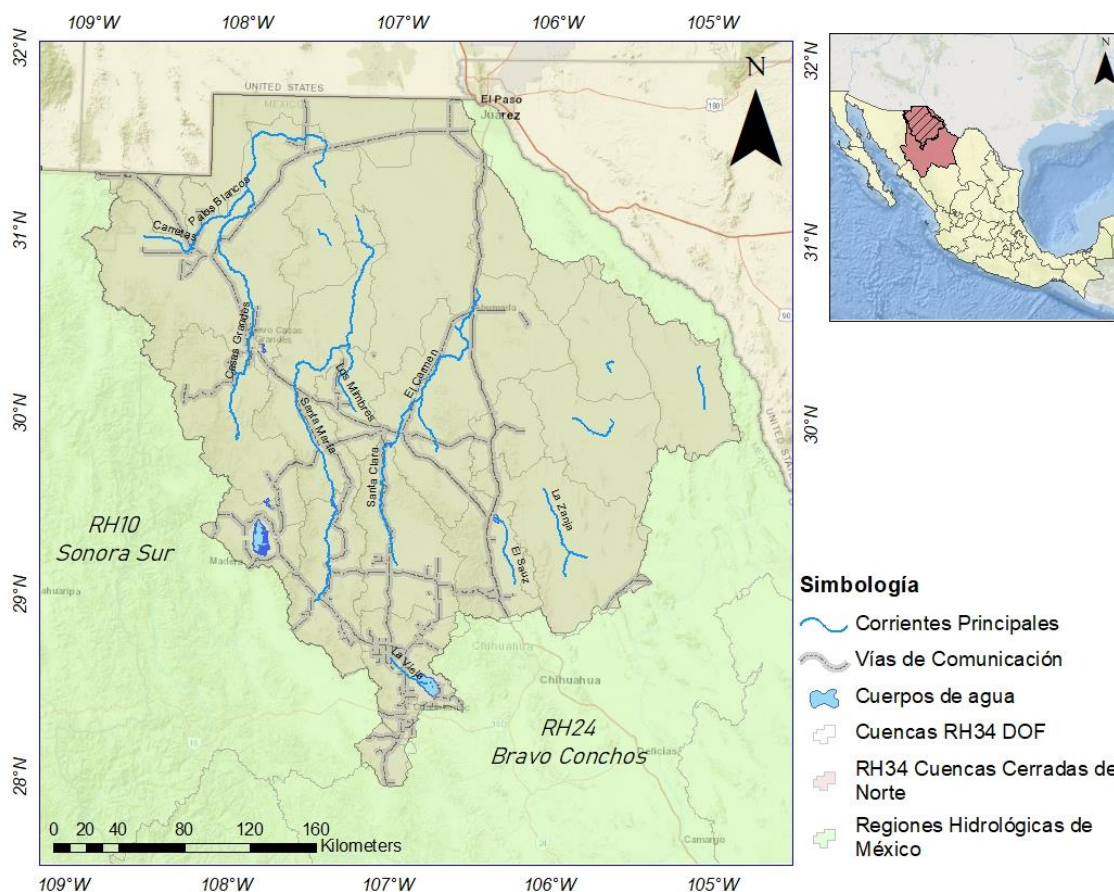


Figura 1. Localización de área la Región Hidrológica No. 34 Cuencas Cerradas del Norte.



3.2. Descripción del entorno físico

3.2.1. Clima

La RH34 se encuentra en una zona climática bastante heterogénea (Figura 2), donde predomina el clima muy seco templado que abarca el 57.4% del área de estudio. Sin embargo, podemos encontrar al este y sureste zonas con clima muy seco semicálido en donde se registran temperaturas promedio anuales de 19.2 °C y precipitaciones promedio anuales de 256.8 mm, en contraste con las regiones al suroeste con clima semifrío subhúmedo con temperaturas promedio anuales de 13.5 °C y precipitaciones promedio anuales de 503.6 mm (IMTA, 2013; CONAGUA 2022).

Se empleó la clasificación de Köppen para describir los climas de la RH34, con las modificaciones correspondientes a la República Mexicana (García, 2004). Los climas *B* que predominan la región se clasifican como “Climas secos” con vegetación xerófita. Sin embargo, esta zona se divide en los climas *BW*, los cuales se denominan “Climas del desierto” o bien, “Climas muy áridos o muy secos” con temperaturas promedio anual que superan los 18 °C, mientras que los *BS* que abarcan una gran porción de la zona, son clasificados como “Climas de estepa” o “Climas secos o áridos”. También podemos encontrar en menor medida al suroeste, los climas *C* que se clasifican como “Climas templados lluviosos” o bien, “Climas templados subhúmedos con lluvias en verano” y con vegetación en su gran mayoría mesoterma. Los tipos de clima más predominantes de la RH34 se describen brevemente a continuación (García, 2004):

BWkw: Clima muy árido y muy seco templado ubicado en las planicies de la región con altitudes menores a 1500 msnm, con temperatura media anual entre los 12 °C y 18 °C, en los meses fríos desciende a -3 °C y en el mes más caliente alcanza temperaturas mayores a los 18 °C. La temporada de lluvias ocurre en verano con un porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2%

BWkw(x'): Clima muy seco o muy árido y a diferencia del clima *BWkw* el régimen de lluvias es intermedio entre verano e invierno con un porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2%.

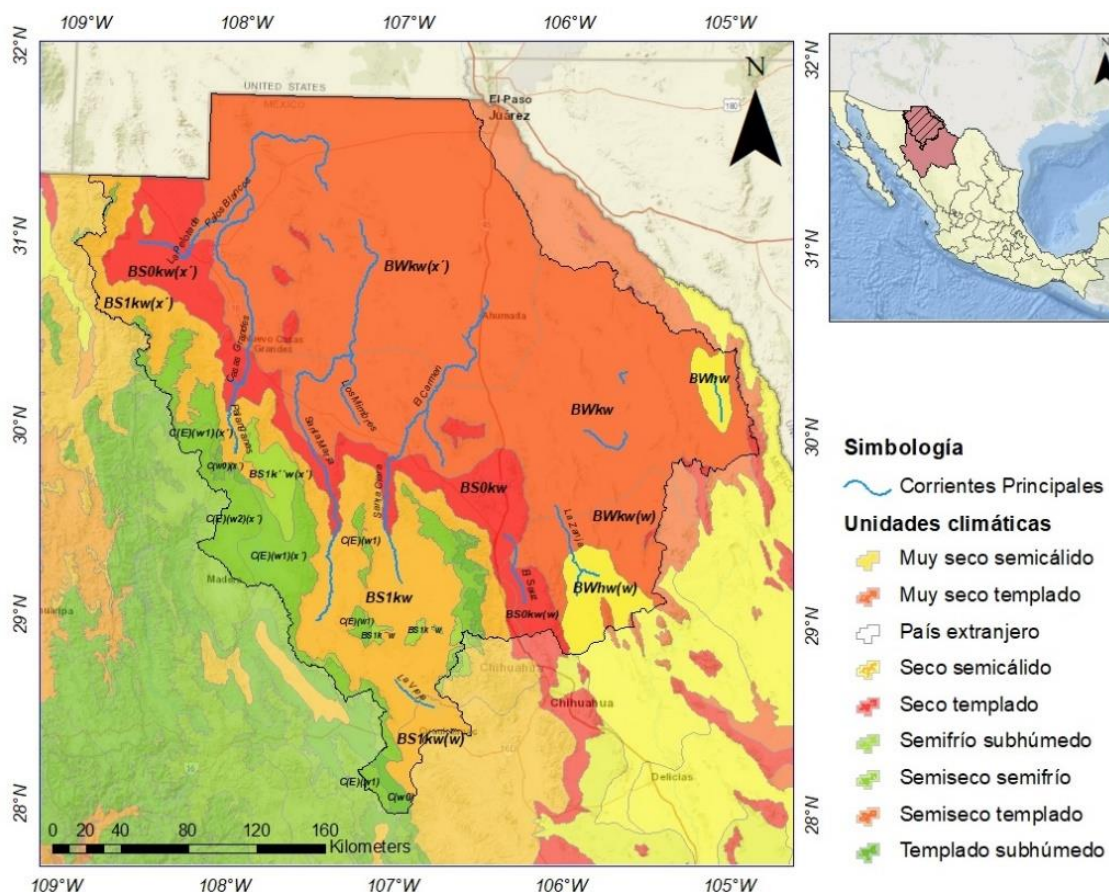


Figura 2. Clima de la RH34 Cuencas Cerradas de Norte, según la clasificación de Köppen y modificada por García, 2004.

BS0kw: Clima árido y seco templado con veranos cálidos, la temperatura media anual oscila entre los 12 °C y 18 °C, en el mes más frío puede descender a los -3 °C y el mes más caliente estar por encima de los 18 °C. Por su distribución en los declives de la Sierra Madre Occidental, es un clima intermedio entre los climas muy áridos BW y los húmedos A o C, sin embargo, este clima es el más seco de los BS debido a que se encuentra en los límites de los BW. Se presenta en la franja de pastizales naturales ubicada al centro de la RH34.

BS1kw: Clima árido y seco templado que, a diferencia del clima BS0kw, este se distribuye en el límite de los climas A o C por lo que es el menos seco que los BS. Existe un régimen de lluvias en verano con un porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2% del total anual.

C(E)(w1)(x'): Clima semifrío o clima templado subhúmedo, con temperatura media anual que van desde los 5 °C hasta los 12 °C, con precipitaciones abundantes en verano y escasas en invierno con un porcentaje menor al 5%. Este tipo de clima



abarca grandes áreas de las zonas montañosas o mesetas, además de encontrarse en los límites de los climas *BS*.

3.2.2. Edafología

La Región Hidrológica cuenta con una variedad de tipos de suelo (Figura 3), en donde predominan los de tipo *Calcisol* (CL) ocupando un 24.2% del total del área, seguido de los suelos de tipo *Leptosol* (LP) que ocupan un 23.6% los cuales tienen mayor distribución en la región. Al norte, donde se encuentran las grandes planicies podemos encontrar suelos de tipo *Arenosol* (AR) caracterizados por tener elevada permeabilidad y escaso potencial para retener el agua y en menor medida también se encuentran los *Regosoles* con alta permeabilidad, pero susceptibles a la compactación y al suroeste donde se ubica una porción de la Sierra Madre Occidental, se observan suelos de tipo *Phaeozem* (PH) que se caracterizan por ser suelos porosos y bien aireados (FAO, 2001).

Las propiedades físicas de los tipos de suelo presentes en la RH34 se describen con base en el Diccionario de Datos Edafológicos esc. 1:250,000 (INEGI, 2017).

Calcisol (CL): suelos calcáreos (ricos en cal). En algunas zonas se presenta una capa cementada con Carbonato de calcio (CaCO_3). Se encuentran extendidos en ambientes áridos y semiáridos.

Leptosol (LP): suelos someros sobre roca continua que limita las actividades agrícolas.

Regosol (RG): este tipo de suelo es parecido al material de origen por lo que está muy poco desarrollado.

Phaeozem (PH): suelo rico en materia orgánica, de ahí deriva su color oscuro, además es poroso y fértil lo cual lo hace óptimo para actividades agrícolas.

Cambisol (CM): suelos con espesor mínimo de 15 cm y notable diferenciación de horizontes debido a los cambios de contenido de arcilla de carbonato, estructura y color.

Luvisol (LV): suelos con acumulación de arcillas.

Vertisol (VR): suelos arcillosos de color oscuro que al contraerse y expandirse se forman grietas.

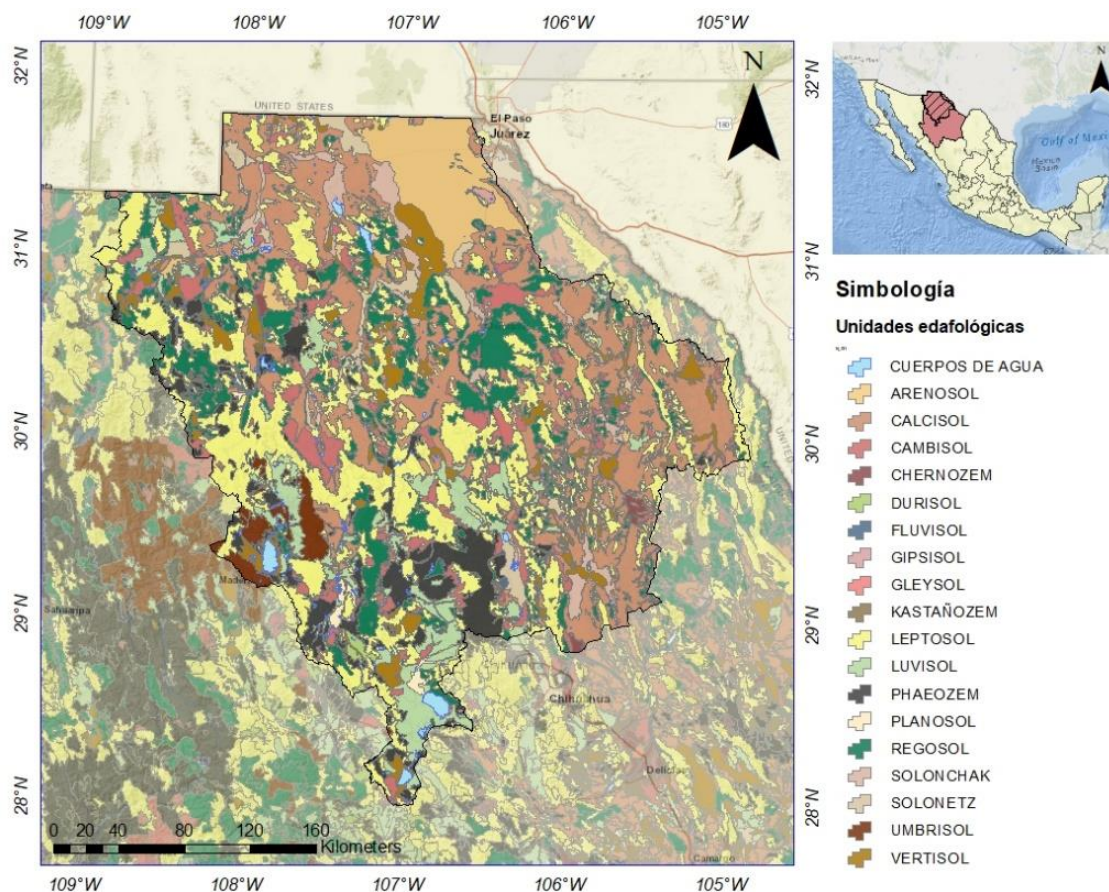


Figura 3. Unidades Edafológicas presentes en la RH34 Cuencas Cerradas del Norte

Arenosol (AR): suelos que se ubican en dunas en desiertos y playas que se derivan de la meteorización *in situ* de sedimentos o rocas ricas en cuarzo.

Solonchak (SC): suelos con alta concentración de sales solubles.

Solonetz (SN): suelos arcillosos, con contenido elevado de sodio y magnesio, además de ser densos y fuertemente estructurados.

Umbrisol (UM): suelos de color oscuro debido a su alto contenido en materia orgánica.

Fluvisol (FL): suelo joven en depósitos lacustres, aluviales y marinos.

Planosol (PL): suelo de textura gruesa que se caracteriza por encontrarse en planicies estacionalmente inundadas.

Chernozem (CH): suelos ricos en materia orgánica y carbonatos, la capa superficial es gruesa y de color oscuro.



Durisol (DU): suelo con sílice endurecida ubicada en los primeros 100 cm de la superficie.

Gypsisol (GY): suelos con acumulación de yeso, en ocasiones se presenta una capa cementada de sulfatos de calcio (CaSO_4).

Kastañozem (KS): suelos pardo oscuro con alto contenido de materia orgánica y acumulación de carbonatos (CaCO_3) ubicado en los primeros 100 cm de profundidad.

Gleysol (GL): suelos de un característico color gléyico, ubicado en humedales y saturados de agua freática

3.2.3. *Uso de suelo y vegetación*

En la zona de estudio predominan las unidades vegetativas propias de climas secos (Figura 4), como la vegetación xerófila que puede desarrollarse en zonas hostiles con precipitaciones de 200 mm anuales y temperaturas altas.

En su gran mayoría, la región se compone de matorral desértico micrófilo y rosetófilo que abarca aproximadamente un 28% de la superficie total, seguido de pastizal natural, halófito e inducido que ocupa un 25%. Existe una gran extensión al noreste de la región donde predomina vegetación de desiertos arenosos y en menor medida también están presente unidades vegetativas de bosques de pino, encino y galería al suroeste del área de estudio. Los usos de suelo destinados a la agricultura de riego ya sea anual o permanente y agricultura de temporal son áreas de aprovechamiento para las actividades agrícolas, caracterizadas por tener condiciones relativamente óptimas y con un alto impacto en los procesos hidrológicos (Voisin y Orona, 1993).

Las unidades vegetativas que predominan en la región se describen de acuerdo al libro de Vegetación de México (Rzedowski, 2006):

Matorral xerófilo: se pueden encontrar en todo tipo de condiciones topográficas y sustratos geológicos, especialmente en suelos con drenaje deficiente. Son las comunidades menos afectadas por las actividades humanas ya que no favorecen la ganadería ni el aprovechamiento maderable. Las especies más abundantes son la *Larrea*, la *Ambrosia*, *Artemisia*, *Encelia*, *Eupatorium*, *Flourensia*, *Zinnia*, entre otras.

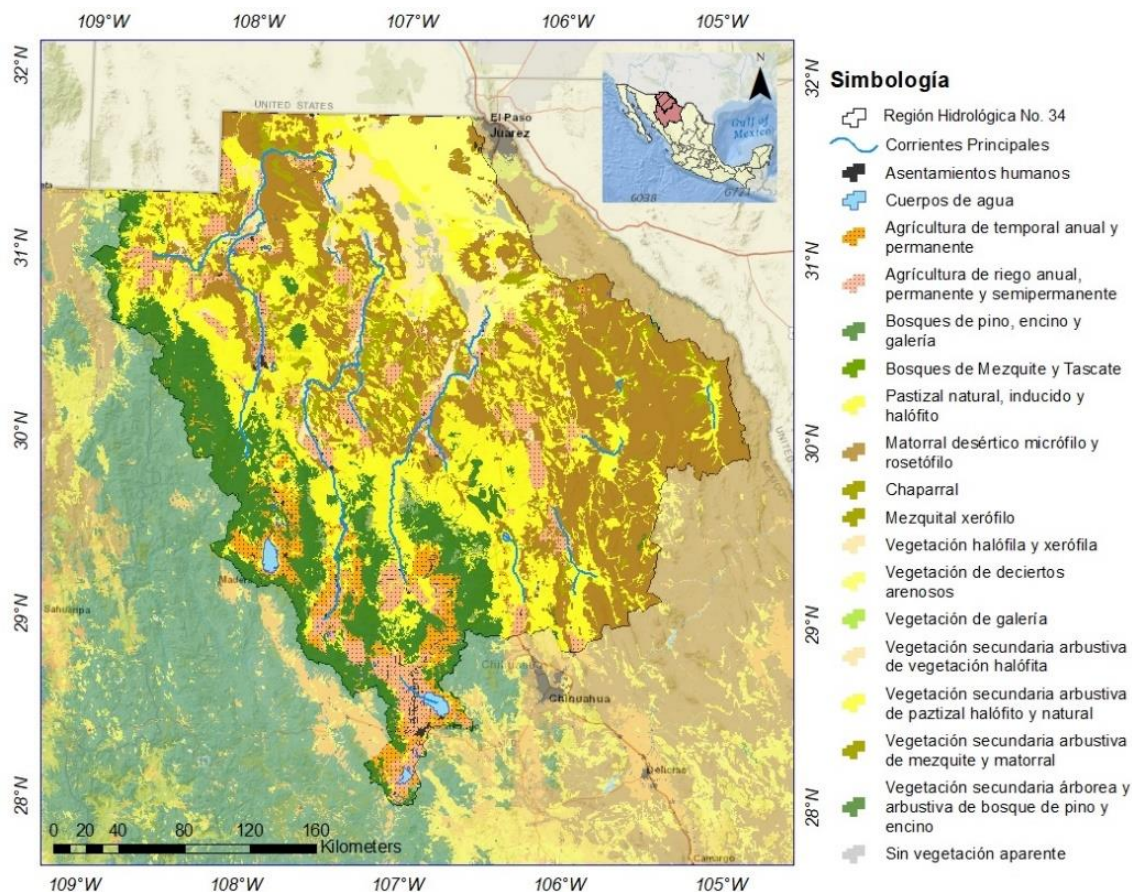


Figura 4. Unidades vegetativas presentes en la RH34 Cuencas Cerradas del Norte

Pastizales: comunidades vegetales donde predominan las gramíneas como la *Bouteloua*, la *Aristida*, *Eragrostis*, *Enneapogon*, *Hilaria*, *Leptochloa*, *Lycurus*, *Muhlenbergia*, *Sporobolus*, entre otros. Su aprovechamiento se destina principalmente a la alimentación de ganado, por lo que se vuelve vulnerable al sobrepastoreo propiciando la erosión.

Bosque de coníferas: se encuentran presentes en climas templados y fríos donde podemos encontrar bosques de pinos y encinos con una distribución geográfica restringida. Se destaca la presencia de especies como el *Pinus chihuahuana*, *durangensis*, *engelmanni*, *arizonica*, *ponderosa*, *pseudotsuga*, entre otros, así como también familias de *Quercus* como *crassifolia* y *microphylla*.

3.2.4. Hidrología superficial

La Región Hidrológica No. 34 se integra por 5 cuencas (INEGI, 2003), la cuenca del Arroyo El Carrizo (RH34 A), la del Río del Carmen (RH34 B), Río Santa María (RH34 C), Río Casas Grandes (RH34 D) y la cuenca de la Laguna de Bustillos



y Laguna de los Mexicanos (RH34 E). Así mismo, cuenta con 22 subcuencas según el Diario Oficial de la Federación en el acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de aguas nacionales superficiales. Las subcuencas comparten características similares, lo más peculiar de ellas es que son cuencas endorreicas, es decir, desembocan en lagunas interiores, de ahí deriva su nombre de Cuencas Cerradas del Norte (Figura 5).

Las subcuencas de la RH34 se describen con base en el Diario Oficial de la Federación (2020):

Río Casas Grandes 1 (3401): Nace en el río San Miguel y desemboca en el Río Casas Grandes.

Río Casas Grandes 2 (3402): Continúa el recorrido del río Casas Grandes desde su estación hidrométrica hasta desembocar en la laguna de Guzmán.

Hacienda San Francisco – Juguete – Madero – Palomas (3403): Conjunto de varias corrientes que desembocan en la laguna de Palomas.

Laguna de Babícora (3404): Nace del arroyo Las Varas y corrientes afluentes hasta desembocar en la laguna de Babícora.

Río Santa María (3405): Comienza en el río Santa María hasta la presa El Tintero.

Río Santa María 2 (3406): Continúa la trayectoria del río Santa María desde la presa El Tintero hasta desembocar en la laguna Santa María.

Laguna El Sabinal (3407): Conjunto de pequeñas corrientes que desembocan en la laguna El Sabinal.

Desierto de Samalayuca (3408): Inicia en el arroyo El Queso y afluentes que se van infiltrando dentro de la misma cuenca.

Laguna La Vieja (3409): Conjunto de pequeñas corrientes que desembocan en la laguna La Vieja.

Río del Carmen 1 (3410): Nace en el río Santa Clara hasta la presa Las Lajas.

Río del Carmen 2 (3411): Comienza en la presa Las Lajas hasta desembocar la laguna de Patos.

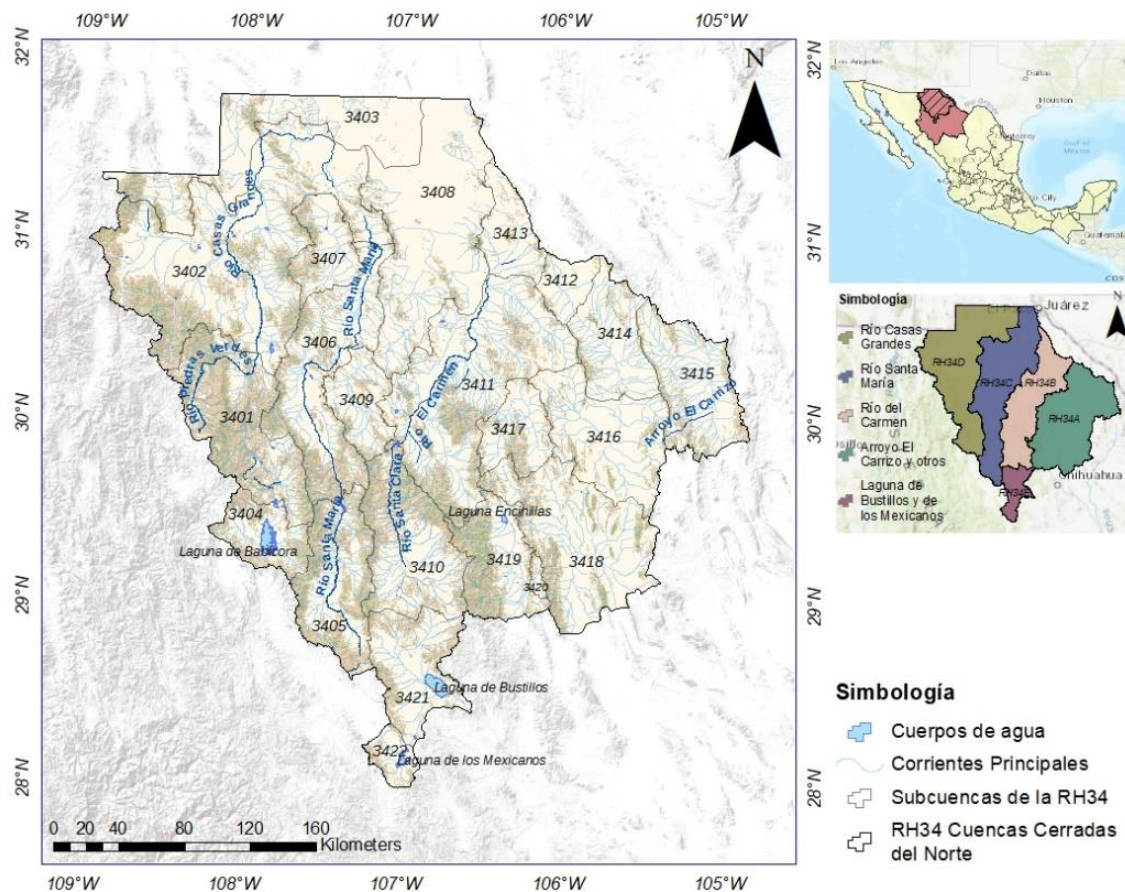


Figura 5. Hidrología superficial de la RH34 Cuencas Cerradas de Norte.

Rancho El Cuarenta (3412): Pequeñas corrientes que se infiltran en su trayectoria dentro de la misma cuenca.

Arroyo Roma (3413): Corrientes que desembocan en la laguna de Patos.

Félix U. Gómez (3414): Conjunto de pequeñas corrientes que se infiltran en su trayectoria dentro de la misma cuenca.

Arroyo El Carrizo (3415): Nace del arroyo El Carrizo y afluentes que se infiltran dentro de la misma cuenca.

Arroyo El Burro (3416): Inicia en el arroyo El Burro y afluentes que se infiltran dentro de la misma cuenca.

Laguna de Tarabillas (3417): Corrientes que desembocan en la laguna de Tarabillas.

Laguna El Cuervo (3418): Conjunto de varias corrientes que se infiltran dentro de la misma cuenca.



Laguna de Encinillas (3419): Nace del arroyo El Álamo y Santa Clara hasta desembocar en la laguna de Encinillas.

Rancho Hormigas – El Diablo (3420): Conjunto de pequeñas corrientes que desembocan en la laguna del Diablo.

Laguna de Bustillos (3421): Comienza desde los arroyos Santa Elena, Ojo Caliente y afluentes hasta desembocar en la laguna de Bustillos.

Laguna Los Mexicanos (3422): Inicia en el arroyo Los Álamos y afluentes hasta desembocar en la laguna Los Mexicanos.

3.2.5. Hidrología subterránea

Dentro de la zona de interés convergen 44 acuíferos, algunos comparten una porción de su delimitación con la RH24 Bravo-Conchos y con la RH9 Sonora Sur pero solo 29 se encuentran en su totalidad dentro de la RH34 (Figura 6).

La descripción de los acuíferos se realiza con base en los documentos de disponibilidad por acuífero de la CONAGUA (2023):

Ascensión (0801): Acuífero de tipo libre, localizado en el municipio de Ascensión y otros poblados dedicados en su mayoría a la agricultura sostenida por la extracción de agua subterránea. Se encuentra delimitado por las sierras Boca Grande, Alta, El Fresnal y El Capulín. Forma parte del Distrito de Riego No. 62.

Alta Babícora (0802): Acuífero de tipo libre en su gran mayoría, con excepción de la parte central que se muestra confinado. Limita su área por las sierras Chalchihuites, La Cebolla y sierra Grande, entre las poblaciones de San José Babícora, Gómez Farías y Nicolás Bravo.

Baja Babícora (0803): Acuífero de tipo semiconfinado, ubicado en el municipio de Namiquipa, Bachíniva y otras poblaciones donde la actividad económica más importante es la agricultura para producir manzana, maíz y frijol.

Buenaventura (0804): Acuífero libre asentado entre los municipios de Galeana, Buenaventura y parte de Ignacio Zaragoza y Nuevo Casas Grandes en donde la actividad económica más relevante es la agricultura para producir algodón, avena, chile, sorgo, maíz y frijol.

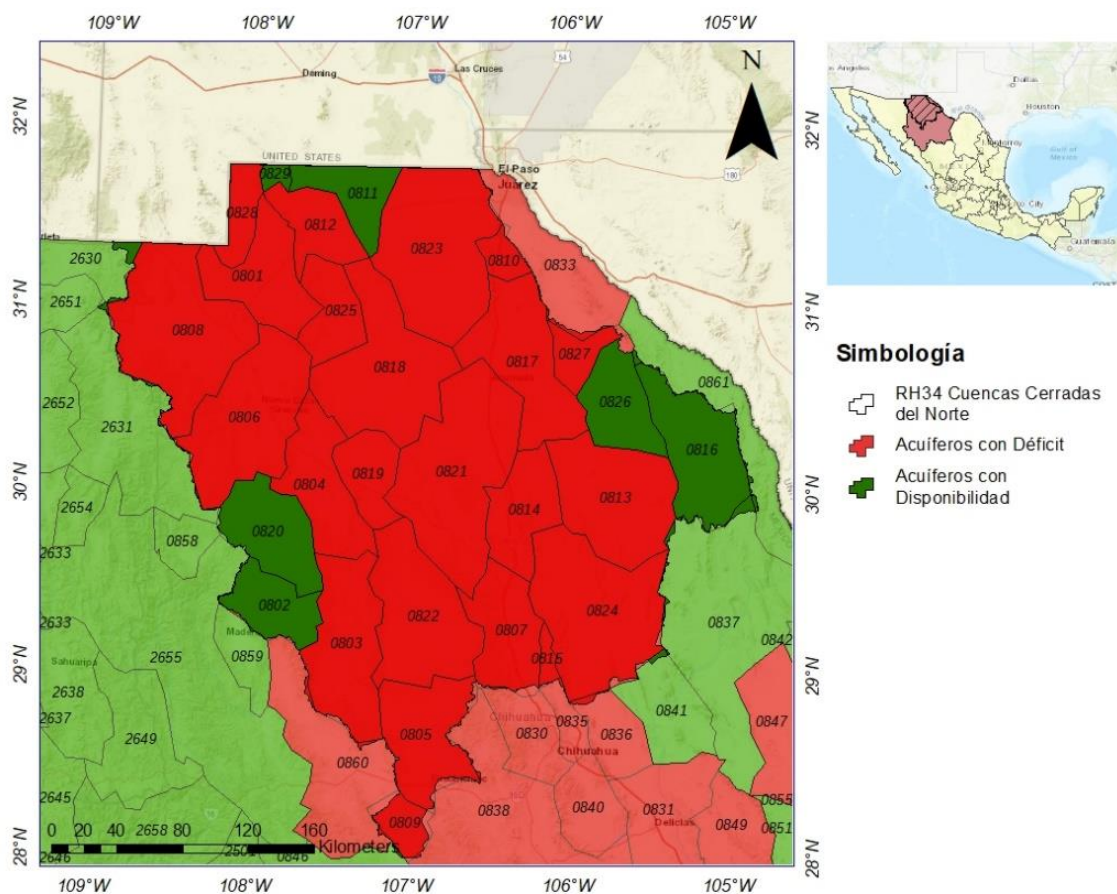


Figura 6. Hidrología subterránea de la RH34 Cuencas Cerradas del Norte

Cuauhtémoc (0805): Acuífero de tipo libre, que comprende la mayor parte del municipio de Cuauhtémoc, los flujos subterráneos van en dirección a la Laguna de Bustillos. Se encuentra sujeto a las disposiciones del decreto que establece veda por tiempo indefinido y el acuerdo que establece el Distrito de Riego de El Carmen, los cuales permiten extracciones limitadas.

Casas Grandes (0806): Acuífero libre, limitado por la sierra del Capulín, La Escondida, La Breña y Carcay. Comprende los municipios de Casas Grandes, Nuevo casas Grandes y Galeana.

El Sauz – Encinillas (0807): Acuífero de tipo libre con porciones semiconfinadas, ubicado entre los municipios de Chihuahua, Namiquipa, Aldama y Buenaventura. Se encuentra sujeto a las disposiciones del decreto que declara de interés público para la conservación en la que solo permite extracciones para uso doméstico.



Janos (0808): Acuífero de tipo libre, ubicado en la frontera norte con Estados Unidos de Norteamérica, en el municipio de Janos y Casas Grandes. La zona pertenece al Distrito de Riego No. 62.

Laguna de Mexicanos (0809): La mayor parte de su delimitación es un acuífero confinado. Ocupa el municipio de Cusihuiriachi, Cuauhtémoc, Guerrero, Carichi y San Francisco de Borja. El mayor aprovechamiento de aguas subterráneas se destina a la agricultura.

Samalayuca (0810): Acuífero de tipo libre perteneciente al municipio de Juárez. Una porción norte ubicada en el valle de Juárez se encuentra ubicada en una zona de veda y la porción sur en zona libre.

Las Palmas (0811): Acuífero de tipo libre que colinda al norte con Estados Unidos de Norteamérica. Se encuentra sujeto a las disposiciones del decreto por el cual se declara de interés público para la conservación que establece veda por tiempo indefinido el cual solo permite extracciones para uso doméstico.

Palomas – Guadalupe Victoria (0812): Acuífero de tipo libre sujeto a sujeto a las disposiciones del decreto en el que se declara de interés público la conservación de los acuíferos de los municipios de Ascensión y Janos, Chih. el cual establece que está en veda por tiempo indefinido para la extracción.

Laguna Tres Castillos (0813): Acuífero de tipo libre semiconfinado que cubre parcialmente los municipios de Ahumada, Coyame del Sotol y Aldama. Se encuentra sujeto a las disposiciones del acuerdo por el que se suspende el libre alumbramiento por lo que no se permite la perforación de pozos ni la extracción de agua no concesionada.

Laguna de Tarabillas (0814): Acuífero de tipo libre ubicado en los municipios de Chihuahua y Ahumada. Una porción de la superficie se encuentra en veda establecida por el Distrito de Riego El Carmen.

Laguna El Diablo (0815): Acuífero de tipo libre ubicado en los municipios de Chihuahua y Aldama, se encuentra sujeto al decreto por el que se declara de interés público para la conservación en la zona de la Cuenca del Sauz y Encinillas en donde únicamente se permiten extracciones para uso doméstico.



Aldama – El Cuervo (0816): Acuífero de tipo libre que comprende los municipios de Guadalupe y Ojinaga, está sujeto al acuerdo por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en porciones no vedadas por lo que no se permite la perforación de pozos ni la extracción de agua no concesionada.

Laguna de Patos (0817): Acuífero de tipo libre ubicado en el municipio de Ahumada, se encuentra parcialmente vedado por lo que se permite extracciones limitadas.

Laguna de Santa María (0818): Acuífero de tipo libre ubicado en los municipios de Nuevo Casas Grandes, Ahumada, Ascensión y Buenaventura. La actividad más importante de la zona es la ganadería. Mas de la mitad de su superficie se encuentra a disposición de decretos de veda y la otra porción es una zona de libre alumbramiento

Laguna La Vieja (0819): Acuífero de tipo libre ubicado en los municipios de Buenaventura y Galeana. Está sujeto al decreto por el que se declara de interés público para la conservación de zonas no vedadas de manera que se controlen las extracciones y el alumbramiento.

Ignacio Zaragoza (0820): Acuífero de tipo libre ubicado en los municipios de Ignacio Zaragoza, Casas Grandes, Madera, Galeana, Namiquipa y Gómez Farías donde la principal actividad a la que se destinan las aguas subterráneas es la agrícola y se encuentra sujeto a disposición del decreto que lo declara de interés público para la conservación del municipio de Galeana y zonas no vedadas.

Flores Magón – Villa Ahumada (0821): Acuífero de tipo libre que abarca parcialmente los municipios de Buenaventura, Villa Ahumada Namiquipa y Chihuahua. Se encuentra sujeto a las disposiciones del acuerdo que establece el Distrito de Riego El Carmen en donde se permite extracciones limitadas.

Santa Clara (0822): Acuífero de tipo libre que ocupa parcialmente los municipios de Namiquipa, Riva Palacio, Cuauhtémoc, Buenaventura y Chihuahua. Las actividades económicas más importantes son la agricultura y la ganadería.

Conejos – Médanos (0823): Acuífero de tipo libre ubicado en la frontera norte donde colinda con Estados Unidos de América y comprende parcialmente los municipios de Ascensión, Juárez y Ahumada. Se encuentra sujeto a las



disposiciones del decreto por el cual se declara de interés público para la conservación que establece veda por tiempo indefinido y solo permite extracciones para uso doméstico.

Laguna de Hormigas (0824): Acuífero de tipo libre con zonas semiconfinadas, ubicado entre los municipios de Chihuahua, Aldama, Ahumada y Coyame del Sotol. Se encuentra parcialmente vedado y permite extracciones limitadas. La actividad principal de esta zona es la agricultura.

El Sabinal (0825): Acuífero de tipo libre que comprende los municipios de Ascensión, Nuevo Casas Grandes y Buenaventura. Se encuentra sujeto al decreto por el que se declara de interés público para su conservación que establece veda indefinida en donde se permite extracciones únicamente para uso doméstico.

Los Lamentos (0826): Acuífero libre semiconfinado que comprende parcialmente los municipios de Ahumada, Guadalupe y Coyame del Sotol, se encuentra sujeto a las disposiciones del acuerdo por el cual se suspende el libre alumbramiento, por lo que no se permite extracciones sin concesión.

El Cuarenta (0827): Acuífero libre semiconfinado ubicado en los municipios de Ahumada y Guadalupe. Se encuentra sujeto a disposición del acuerdo que suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, de manera que no se permite extracciones sin concesión.

Los Moscos (0829): Acuífero de tipo libre con porciones semiconfinadas. Colinda al norte y gran parte del oeste con Estados Unidos de América y se encuentra en el municipio de Ascensión. Se encuentra sujeto a disposiciones del decreto por el cual se declara de interés público para la conservación que establece veda por tiempo indefinido en donde solo se permite extracciones para usos domésticos. La actividad principal es la agricultura.

En las últimas actualizaciones del Diario Oficial de la Federación, en donde se publica la disponibilidad media anual de agua subterránea de los acuíferos en México, se indica que en el 2018 el 72% de los acuíferos dentro de la RH34 se encontraban en situación de déficit, es decir, únicamente 8 de los 29 acuíferos, contaban con volúmenes disponibles, siendo el acuífero de Laguna Santa María el



más afectado con un déficit de $-266.08 \text{ hm}^3/\text{año}$, por el contrario el acuífero de Ignacio Zaragoza contaba con una disponibilidad de $71.48 \text{ hm}^3/\text{año}$ (DOF, 2018).

El porcentaje de acuíferos con cifras negativas aumentó a 89% en el 2020, lo que quiere decir que en ese año, únicamente 3 acuíferos contaban con volúmenes disponibles, el acuífero de Aldama – El Cuervo con solo $0.74 \text{ hm}^3/\text{año}$, el acuífero de Josefa Ortiz de Domínguez con $0.2 \text{ hm}^3/\text{año}$ y el de Ignacio Zaragoza con $67.2 \text{ hm}^3/\text{año}$, el resto se encontraban en déficit en donde el acuífero de Laguna Santa María encabeza la lista de acuíferos más afectados disminuyendo su disponibilidad a $-419.83 \text{ hm}^3/\text{año}$, es decir, casi el doble al disponibilidad que tenía en el 2018 (CONAGUA, 2020; DOF, 2020).

La última actualización realizada en el 2023 se reporta que hubo una disminución del porcentaje de acuíferos en déficit a un 82% aumentando sus volúmenes de agua subterránea disponible, como es el caso del acuífero Alta Babícora que aumentó su disponibilidad de $-0.46 \text{ hm}^3/\text{año}$ a $8.88 \text{ hm}^3/\text{año}$ así como el acuífero de Los Lamentos que ahora cuenta con una disponibilidad de $11.57 \text{ hm}^3/\text{año}$. Los acuíferos de Las Palmas y Josefa Ortiz de Domínguez aumentaron su disponibilidad de manera muy poco significativa (DOF, 2023).

Con base en la información obtenida de los documentos de la Actualización de disponibilidad media anual de agua por acuífero (Anexo 1), se realizó un gráfico para observar el comportamiento de los balances hídricos realizados en los 29 acuíferos ubicados en la RH34 durante el periodo comprendido del 2018 al 2023 (Figura 7).

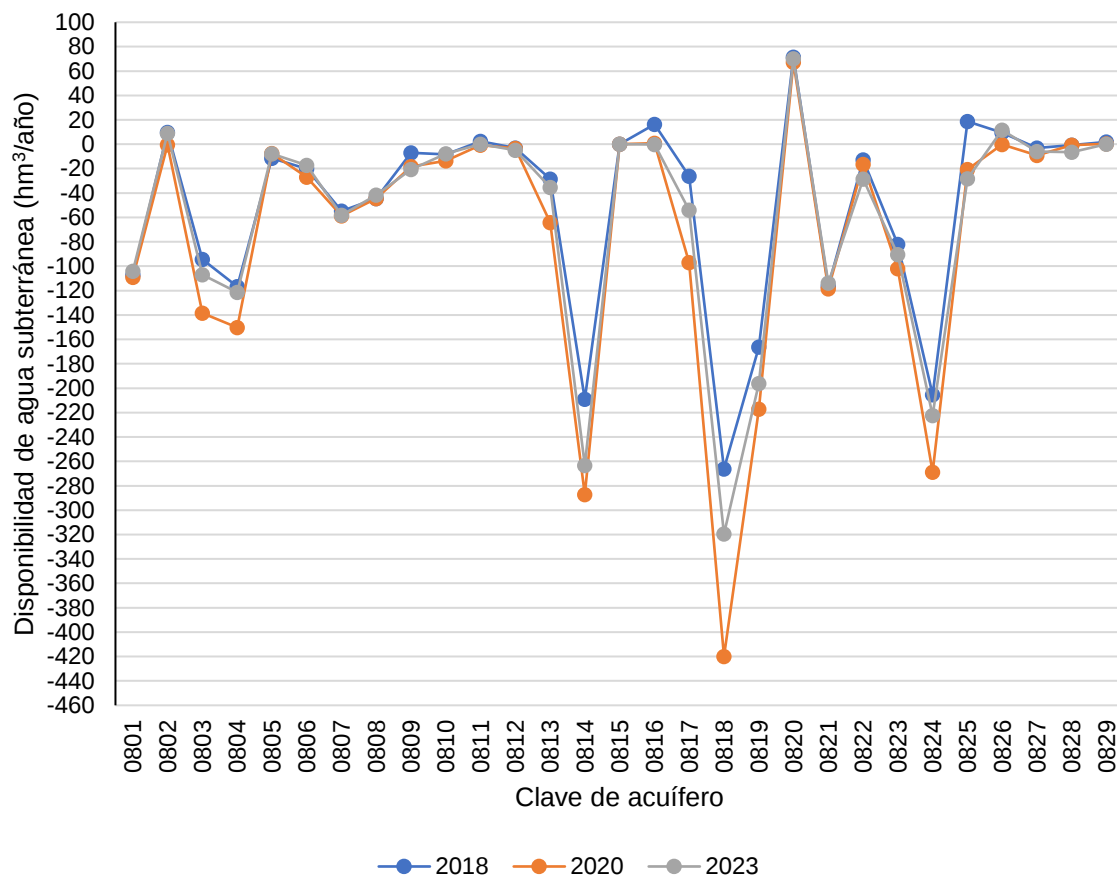


Figura 7. Disponibilidad media anual de agua de los 29 acuíferos que convergen dentro de la RH34.

3.2.6. Geología

La RH34 corresponde a las cartas geológicas de Agua Prieta (H12-3), Nacozari (H12-6), Madera (H12-9), Juárez (H13-1), El Porvenir (H12-2), Nuevo Casas Grandes (H13-4), San Antonio El Bravo (H13-5), Buenaventura (H13-7), Ojinaga (H13-8), Chihuahua (H13-10) y Delicias (H13-11) obtenidas del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2000).

La zona cuenta con una gran variedad de rocas, en su mayoría sedimentarias como los conglomerados poligénicos, los depósitos aluviales y eólicos, entre otros. Aunque también podemos encontrar rocas ígneas extrusivas como las tobas y basaltos (Figura 8).

Las rocas que predominan la RH34 se describen con base a las características que indica el Servicio Geológico Mexicano.

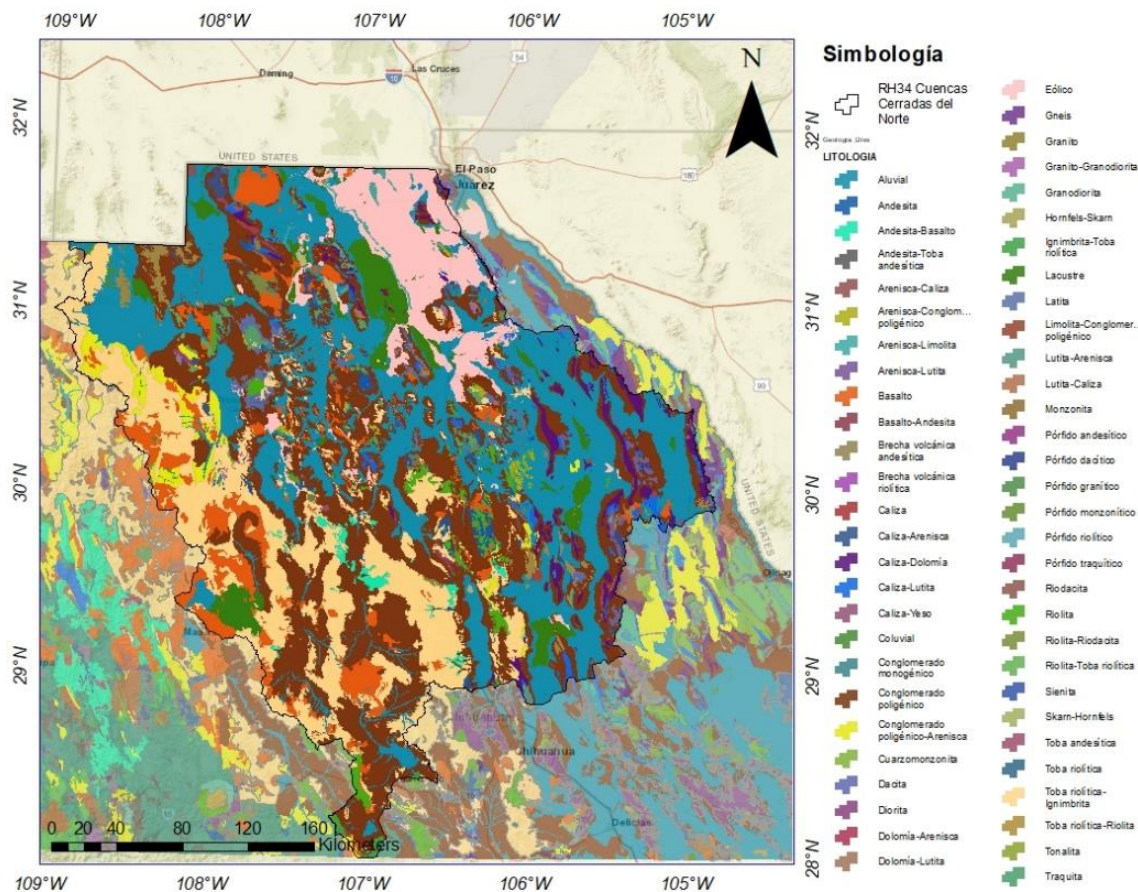


Figura 8. Geología de la RH34 Cuencas Cerradas del Norte.

Conglomerado poligénico clave *Qho(cgp)*: es una roca sedimentaria perteneciente al periodo Cuaternario de la era Cenozoica en el Holoceno. Se distribuye en la mayor parte de la región, ocupando el 28.6% de la RH34. Su composición es variada ya que proviene de distintas rocas.

Aluvial clave *Qho(al)*: es una roca sedimentaria de depósito reciente, se describe como depósitos aluviales pertenecientes al periodo Cuaternario en el Holoceno. Se distribuye por la mayor parte de la RH34 ocupando un 26.7% con excepción de la zona de desierto de Samalayuca y las sierras ubicadas al oeste.

Toba riolítica clave *Te(TR-Ig)*: roca extrusiva perteneciente a la era del Cenozoico en el periodo Terciario del Oligoceno, se distribuye desde toda la porción oeste de la RH34 hacia el centro. Ocupa el 14.2% de la región, principalmente en la parte de la Sierra Madre Occidental.



Eólico clave *Qho(eo)*: es una roca sedimentaria de depósitos recientes perteneciente al Holoceno de la era Cenozoica y el periodo Cuaternario, ocupa el 6.8% de la RH34 en la zona del desierto de Samalayuca.

Basalto clave *To(B)*: es una roca ígnea extrusiva que se distribuye en la porción central y oeste de la región ocupando el 6.4% de la zona, perteneciente al periodo Terciario del Oligoceno de la era Cenozoica.

El resto del porcentaje de la región se divide entre más de 50 tipos de rocas, entre ellas Riolitas, Calizas y Areniscas.

3.3. Factores para la selección de las ZPRAS en la RH34

El presente estudio integra los factores más significativos y utilizados a nivel global para determinar las zonas potenciales para la recarga de aguas subterráneas (ZPRAS) mediante el uso de sistemas de información geográfica y el uso de evaluación multicriterio.

Se consultó literatura internacional y local de documentos técnicos, artículos de alto impacto, entre otros, con el propósito de conocer los factores más utilizados en los estudios para la conservación en cuanto a la recarga de aguas subterráneas. Diversos documentos coinciden en que la geología es una de las variables más importantes para el monitoreo de agua subterránea debido a que el flujo vertical depende de la permeabilidad de las unidades litológicas (Ajay *et al.*, 2020; Ahmadi *et al.*, 2020; Abdekareem *et al.*, 2022). En ese sentido, la pendiente es otra de las variables que más coincide en los estudios ya que se concuerda que el proceso de recarga se verá afectado por la tasa de infiltración que la pendiente pueda permitir (Ajay *et al.*, 2020; Bourjila *et al.*, 2020; Uc Castillo *et al.*, 2022). Sin embargo, la precipitación es un factor que se destaca en aquellos estudios que tienen por objetivo la recarga natural (Bera *et al.*, 2020; Bourjila *et al.*, 2020; Verma *et al.*, 2020).

La mayoría de los factores se eligieron debido a que diversos autores concuerdan en que se consideran factores importantes para el monitoreo de las aguas subterráneas, como es el caso de la temperatura de la superficie terrestre (Arunbose *et al.*, 2021) o la distancia a ríos (El Jazouli *et al.*, 2019; Doke *et al.*, 2021). En el caso de los factores como la distancia a carreteras fueron integrados



en el estudio ya que se consideran una fuente de perturbación, ocasionada por la actividad antrópica. Una mayor distancia de las ZPRAS a las carreteras reduce el riesgo de contaminación. Las construcciones viales pueden alterar la estructura y composición del suelo, afectando su capacidad de infiltración. Áreas lejanas a carreteras pueden tener mejor integridad del suelo. Por otra parte, se integró la distancia a cuerpos de agua ya que pueden ser fuentes directas de recarga para las aguas subterráneas, especialmente si están conectados hidráulicamente con el acuífero, por lo tanto, la proximidad a estos puede indicar potencial de recarga.

3.4. Recopilación de información de los factores

Entre la literatura relevante que abarca la mayoría de factores que se contemplan en el presente estudio, se destaca lo trabajado por Abdekareem *et al.* (2022), en donde se utilizan 12 factores para establecer técnicas para asegurar la sostenibilidad en cuanto a las aguas subterráneas, donde utilizan SIG, EMC y el Proceso de Jerarquía Analítica. Así como también el estudio de Bourjila *et al.* (2020) en donde se analizan 11 factores donde determinar las zonas potenciales donde ocurre la recarga de aguas subterráneas. También se consultó lo desarrollado por Doke *et al.* (2021) en el cual se establecieron 9 factores para determinar un mapa de aguas subterráneas con el uso de la evaluación multicriterio y, adicionalmente se consultó el caso de estudio de Arulbalaji *et al.* (2019) en donde se integraron 12 factores en el Proceso de Jerarquía Analítica para identificar las zonas potenciales de aguas subterráneas.

3.5. Conjunto de datos

En el presente estudio se integraron 16 factores para determinar las zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas (ZPRAS) en la RH34, los cuales son: pendiente, litología/geología, altitud/elevación, índice de humedad topográfica (*TWI* por sus siglas en inglés *Topographic Wetness Index*), índice de posición topográfica (*TPI* por sus siglas en inglés *Topographic Position Index*), fallas y fracturas, geomorfología, curvatura, suelos, uso de suelo y vegetación, precipitación, densidad de drenaje, distancia a ríos, distancia a cuerpos de agua, distancia a carreteras y temperatura de la superficie terrestre.



3.6. Factores

La Tabla 1 muestra los factores utilizados en la delimitación de las ZPRAS.

Tabla 1. Factores implementados en la delimitación de zonas potenciales de recarga de aguas.

No.	Factores	Descripción	Unidades
1	Pendiente	Se relaciona directamente con la tasa de infiltración, ya que las pendientes altas generan escorrentía y las pendientes bajas retienen el agua superficial.	Grados
2	Litología / Geología	La porosidad y permeabilidad de las rocas se relaciona con la captación del flujo de agua superficial, lo que implica el proceso de recarga.	Adimensional
3	Altitud / Elevación	El agua fluye por la gravedad desde una altitud mayor a una menor. Las zonas de menor elevación retienen el agua por más tiempo e inducen la infiltración.	msnm
4	TWI	Es la relación entre la superficie de captación de agua y la pendiente, además determina la distribución de la humedad en una topografía regional y refleja la infiltración potencial en el subsuelo por las condiciones topográficas.	Adimensional
5	TPI	Se aplica en la medición de la posición de las pendientes topográficas para clasificar el relieve o accidentes geográficos, lo que determina valles, colinas, llanuras, laderas, etc.	Adimensional
6	Fallas y Fracturas	Determinan la permeabilidad y el movimiento y aparición de aguas subterráneas ya que facilitan la infiltración del agua. A mayor densidad de fallas, mayor recarga de agua subterránea.	km/km ²
7	Geomorfología	Es la caracterización física de la superficie terrestre que condiciona la prospección y movimiento de los recursos hídricos subterráneos.	Adimensional
8	Curvatura	Se relaciona con la capacidad de infiltración, las pendientes convexas producen rápida escorrentía y las zonas con	Radianes/100 m



		pendientes cóncavas, facilitan la acumulación de agua y su infiltración.	
9	Suelos	Controlan factores como la velocidad de infiltración, el contenido de humedad y la capacidad de retener el agua. Además de que la permeabilidad depende de la porosidad efectiva del suelo.	Adimensional
10	Uso de suelo y vegetación	Determinan los procesos hidrogeológicos como la escorrentía, permeabilidad, infiltración y evapotranspiración que afectan la recarga de agua subterránea. Mayor cobertura vegetal resulta más favorable que las zonas áridas, rocosas o edificadas.	Adimensional
11	Precipitación (2000-2020)	Es la fuente primaria para la recarga de aguas subterráneas, es necesario comprender los fenómenos espaciotemporales de las lluvias. En regiones áridas, la recarga es irregular y solo se produce durante periodos de lluvias intensas.	mm/d
12	Densidad de drenaje	Es la relación entre la longitud total de los cauces y la superficie de la cuenca drenada, las zonas con alta densidad de drenaje suelen tener bajo potencial de recarga de aguas subterráneas por su alta tasa de escorrentía y zonas de menor densidad drenaje tienen mayor potencial de recarga por la alta tasa de infiltración.	km/km ²
13	Distancia a ríos	Los niveles de aguas subterráneas son más altos cerca de ríos y más bajas en zonas alejadas de los cauces.	km
14	Distancia a cuerpos de agua	Intervienen en los procesos de infiltración debido a que retienen grandes cantidades de agua.	km
15	Distancia a Carreteras	La impermeabilización o compactación del suelo reduce la capacidad para absorber y almacenar el agua, es decir, disminuye la infiltración, lo cual impide la recarga de aguas subterráneas.	km
16	Temperatura de la superficie terrestre	Indica las condiciones climáticas y la interacción entre la tierra y el agua en la superficie de la zona, además de intervenir en la evaporación.	°C



3.7. Estandarización de factores

La EMC requiere de la estandarización de factores, el cual es un proceso crucial para asegurar que los diferentes factores sean comparables entre sí. Los factores se estandarizaron en una escala del 1 al 5 según la idoneidad de cada factor para la delimitación de las ZPRAS, donde se asignaron valores de 1 a aquellas condiciones menos adecuadas, mientras que un valor de 5 indica condiciones más adecuadas (Tabla 2). Los niveles de idoneidad para este estudio son: 1 (Muy bajo), 2 (Bajo), 3 (Moderado), 4 (Alto) y 5 (Muy alto) (FAO, 1976). Cada factor se estandarizó con la herramienta de *Recclasify* en el módulo de *Spacial Analyst Tools* del software *ArcMap 10.5*®.

3.7.1. Pendiente

La pendiente influye directamente en la tasa de infiltración, percolación y la escorrentía superficial (Das, 2021) por lo que aquellas zonas con pendientes pronunciadas aumentarán el flujo superficial (Tehrany *et al.*, 2015; Abdekareem *et al.*, 2022) y no permiten la percolación e infiltración, sin embargo, pendientes más planas retienen el agua durante un periodo de tiempo y dan lugar a la percolación y la recarga de aguas subterráneas. La RH34 cuenta con valores de pendientes que van desde los 0° en las planicies del noroeste de la región, hasta los 53.7° en las zonas de la Sierra Madre Occidental al sureste. El mapa de pendiente fue generado con base al Continuo de Elevaciones Mexicano (INEGI, 2023) con la herramienta *Slope* en el módulo de *Spacial Analyst Tools – Surface* del software *ArcMap*®. Las clases de ángulo de pendiente se clasificaron del 1 al 5 en donde las pendientes bajas obtuvieron un valor de 5 y las pendientes altas un valor de 1.

3.7.2. Litología / Geología

La litología determina la porosidad y permeabilidad de las rocas. La RH34 cuenta con 58 tipos de roca (SGM, 2000), las cuales se clasificaron individualmente del 1 al 5 dependiendo de sus características (Anexo 2), es decir, las rocas sedimentarias se les asignaron valores altos (4 y 5) debido a su alta porosidad, en cambio a las rocas ígneas o intrusivas primero se evaluó la zona en la que se encontraban, en caso de estar cerca de fracturas o de las sierras, se les dieron



valores altos (3, 4 y 5), de lo contrario se les proporcionó valores bajos (1 y 2), a las rocas metamórficas se les proporcionaron valores de 1.

3.7.3. Altitud / Elevación

La elevación es un factor importante para la recarga de aguas subterráneas, ya que el agua fluye por gravedad desde zonas con mayor altitud a zonas con menor altitud (Bourjila *et al.*, 2020). La RH34 cuenta con altitudes que van desde los 1114 msnm al noreste y centro de la región, hasta los 3039 msnm en la zona de la Sierra Madre Occidental (INEGI, 2023), por lo que se les asignó una clasificación de 5 a aquellas zonas con altitudes bajas y valores de 1 a terrenos de elevación alta.

3.7.4. Índice de Humedad Topográfica (TWI)

El índice de humedad topográfica (TWI por sus siglas en inglés *Topographic Wetness Index*) refleja la posible infiltración de las aguas subterráneas causada por los efectos de la topografía (Arulbalaji *et al.*, 2019) y se calcula con la siguiente ecuación:

$$TWI = \ln \frac{\alpha}{\tan \beta} \quad \text{ecuación (1)}$$

donde α es el área de contribución en m^2 y β es la pendiente del terreno expresada en radianes (Guasselli *et al.*, 2020). En la RH34 se obtuvieron valores desde 4.5 hasta 26.9, en donde los valores bajos se clasificaron con el número 1 (Muy bajo) ya que presentan aptitudes bajas de idoneidad para la recarga de aguas subterráneas y valores altos se clasificaron con el número 5 (muy alto).

3.7.5. Índice de Posición Topográfica (TPI)

El Índice de Posición Topográfica (TPI por sus siglas en inglés *Topographic Position Index*) mide la posición de las pendientes topográficas para clasificar los accidentes geográficos (De Reu *et al.*, 2013; Arulbalaji *et al.*, 2019). El TPI se determina con la siguiente ecuación:

$$TPI = \frac{M_0 - \sum_{n=1}^n M_n}{n} \quad \text{ecuación (2)}$$

donde M_0 es la altitud del punto modelo evaluado, M_n es la altitud de la cuadrícula y n es el número total de puntos circundantes empleados en la evaluación (Arulbalaji *et al.*, 2019; Bourjila *et al.*, 2020).



El mapa de TPI de la RH34 se generó con la herramienta *Topographic Position Index (Jenness)* por medio de software *ArcMap 10.5®*. En la zona de estudio se obtuvieron valores desde -319.35 hasta 546.23 en donde los valores cercanos a cero indican que la superficie del terreno es plana, por lo que valores negativos se les clasifican con el número 5 (Muy alto) debido a que indican la presencia de valles y valores positivos altos se clasifican con el número 1 (Muy bajo) ya que son propios de crestas.

3.7.6. Fallas y fracturas

Las fallas y fracturas potencian la permeabilidad y porosidad del terreno ya que facilitan la infiltración del agua superficial e influyen en el movimiento y almacenamiento de aguas subterráneas (Uc Castillo *et al.*, 2022). El mapa de fallas y fracturas (INEGI, 2023) de la RH34 se obtuvo con la distancia euclidiana por medio de la herramienta *Euclidean Distance* en el módulo de *Spacial Analyst Tools – Distance* con el software *ArcMap 10.5®* y se clasificó del 1 al 5 en donde se les proporcionó un valor de 1 (Muy bajo) a las zonas alejadas a las fallas y fracturas y un valor de 5 (Muy alto) a las zonas cercanas a estas.

3.7.7. Geomorfología

Las unidades geomorfológicas describen las características físicas de la superficie terrestre en donde se evalúa la topografía y la hidrogeología del terreno. Se divide en diferentes geoformas como (1) cañones y arroyos profundos, (2) drenajes de media ladera y valles poco profundos, (3) drenajes de tierras altas y cabeceras de cuenca, (4) valles en forma de “U”, (5) llanuras pequeñas, (6) pendientes abiertas, (7) laderas altas y mesetas, (8) crestas y colinas locales en valles, (9) crestas de media ladera y pequeñas colinas en llanuras y (10) cimas de montañas y crestas altas (Mokarram *et al.*, 2015). La geomorfología de la RH34 es compleja y se clasificó cada unidad geomorfológica en donde se le proporcionaron valores de 5 (Muy alto) a aquellas geoformas con alta aptitud para retener el agua superficial y valores de 1 (Muy bajo) a las unidades con baja aptitud de retención.

3.7.8. Curvatura

La curvatura que define el perfil de la superficie, ya sea convexa o cóncava (Nair *et al.*, 2017; Arulbalaji *et al.*, 2019), es decir, aquellas zonas con curvatura



cóncava acumulan el agua y producen la infiltración, en cambio las zonas con curvatura convexa generan escorrentías. El mapa de curvatura de la RH34 se obtiene con el continuo de elevaciones mexicano (INEGI, 2023) y la herramienta *Curvature* en el módulo de *Spacial Analyst Tools – Surface*. El presente estudio clasificó con el valor de 1 (Muy bajo) las zonas con curvatura convexa que corresponden a los valores positivos, con un valor de 3 (Moderado) a valores cercanos al cero que indican superficies planas y un valor de 5 (Muy alto) los valores positivos que representan curvaturas cóncavas.

3.7.9 Suelos

Los tipos de suelo influyen en los índices de escorrentía y de infiltración ya que la permeabilidad del suelo depende de su porosidad, textura y estructura (Bera *et al.*, 2020). La edafología de la RH34 es compleja y comprende 18 tipos de suelos (INEGI, 2013), los cuales fueron clasificados individualmente por sus características (Anexo 2), dándoles un valor de 1 (Muy bajo) a aquellos suelos que obstruyen el movimiento vertical de agua, un valor de 2 (Bajo) a los suelos con drenaje deficiente, 3 (Moderado) a los suelos con baja capacidad de retención pero alta permeabilidad, 4 (Alto) a suelos con buen drenaje y un valor de 5 (Muy alto) a suelos con elevada permeabilidad y buena capacidad de retención de humedad.

3.7.10. Uso de suelo y vegetación

El uso de suelo y vegetación define aquellas zonas con aptitud para la recarga por infiltración, es decir, aquellas zonas con mayor cobertura natural tendrán un mayor coeficiente de infiltración y aquellas zonas urbanas o sin vegetación tendrán un menor índice de infiltración debido a la compactación del suelo o la evapotranspiración inmediata. El presente estudio clasificó cada uso de suelo y vegetación (INEGI, 2023) de manera individual en donde se les proporcionó valor de 1 (Muy bajo) a las zonas con menor aptitud para la recarga como los asentamientos humanos y las zonas sin vegetación, un valor de 2 (Bajo) donde la recarga no es significativa, 3 (Moderado) a las zonas donde ocurre una recarga moderada como la vegetación halófila xerófila y chaparral, 4 (Alto) a los usos de suelo y vegetación que favorecen infiltración como los bosques de mezquite, táscate



y los pastizales y un valor de 5 (Muy alto) a las unidades vegetativas con alto índice de infiltración como los bosques de pino-encino y vegetación tular.

3.7.11. Precipitación

La precipitación es la principal fuente del recurso hídrico para el proceso de recarga de aguas subterráneas (Uc Castillo *et al.*, 2022). Las zonas con precipitaciones abundantes dan lugar a una recarga elevada y, por lo contrario, las zonas con escasa precipitación, la recarga es baja. Los datos de precipitación de la RH34 se obtuvieron por medio de la base de datos de *Data POWER Acces* (NASA, 2024) y oscilan entre los 205.7 mm/anuales hasta los 565.17 mm/anuales, por lo que aquellas regiones con precipitación abundante se clasificaron con un valor de 5 (Muy alto) y las zonas con precipitaciones escasas se les proporcionó un valor de 1 (Muy bajo).

3.7.12. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje es la relación entre la longitud total de cauces y el área total de la cuenca (Horton, 1932; Harini *et al.*, 2018; Ajay *et al.*, 2020), influye en la escorrentía e infiltración. El mapa de densidad de drenaje de la RH34 (INEGI, 2023) se obtuvo con la herramienta de *Line Density* en el módulo de *Spacial Analyst Tools – Density* con el software *ArcMap 10.5*© y se le dieron valores de 1 (Muy bajo) a las zonas con alta densidad de drenaje, ya que indican una alta escorrentía y por lo tanto una menor recarga de aguas subterráneas y un valor de 5 (Muy alto) a las zonas con menor densidad de drenaje debido a que existe menor escorrentía y una alta tasa de infiltración.

3.7.13. Distancia a ríos

La distancia a ríos afecta en los niveles de agua subterránea, es decir las zonas cercanas a los cauces tienen niveles someros de agua subterránea (Doke *et al.*, 2021). El presente estudio obtuvo el mapa de distancia a ríos (INEGI, 2023) por medio de la distancia euclidiana con la herramienta *Euclidean Distance* en el módulo de *Spacial Analyst Tools – Distance* con el software *ArcMap 10.5*© y se le proporcionó valores de 5 (Muy alto) a las zonas cercanas a las corrientes y valores de 1 (Muy bajo) a las zonas alejadas a los cauces.

3.7.14. Distancia a cuerpos de agua



Los cuerpos de agua afectan la recarga de aguas subterráneas ya que retienen grandes cantidades de agua lo cual contribuye al proceso de infiltración (Das y Pal, 2019), es por ello que se obtuvo el mapa de distancia a cuerpos de agua (INEGI, 2023) por medio de la distancia euclidiana con la herramienta *Euclidean Distance* en el módulo de *Spacial Analyst Tools – Distance* con el software *ArcMap 10.5*© y se clasificaron con un valor de 1 (Muy bajo) a las zonas alejadas de los cuerpos de agua y un valor de 5 (Muy alto) a las zonas cercanas a los cuerpos de agua.

3.7.15. Distancia a carreteras

Las carreteras afectan distintos factores como el deslave de sedimentos (El Jazouli *et al.*, 2019) y la compactación del suelo. El mapa de la distancia a carreteras en la RH34 se obtuvo por medio de la distancia euclidiana con la herramienta *Euclidean Distance* en el módulo de *Spacial Analyst Tools – Distance* con el software *ArcMap 10.5*© y se clasificó con un valor de 1 (Muy bajo) a las zonas cercanas a carreteras y con un valor de 5 (Muy alto) a las zonas lejanas a las carreteras.

3.7.16. Temperatura de la superficie terrestre

La temperatura de la superficie terrestre es un factor importante en la recarga de aguas subterráneas ya que es un indicador de las condiciones climáticas y como se relaciona el agua superficial y la tierra (Arunbose *et al.*, 2021) ya que aquellas zonas con temperaturas altas afectan la evapotranspiración inmediata y las zonas con temperaturas bajas pueden retener mayor humedad hasta llegar a la saturación del suelo el cual es el primer paso para la infiltración. Los datos de la temperatura de la superficie terrestre se obtuvieron de la base de datos de *Data POWER Acces* (NASA, 2024) y oscilan entre los 12.7 °C y los 19.08 °C.

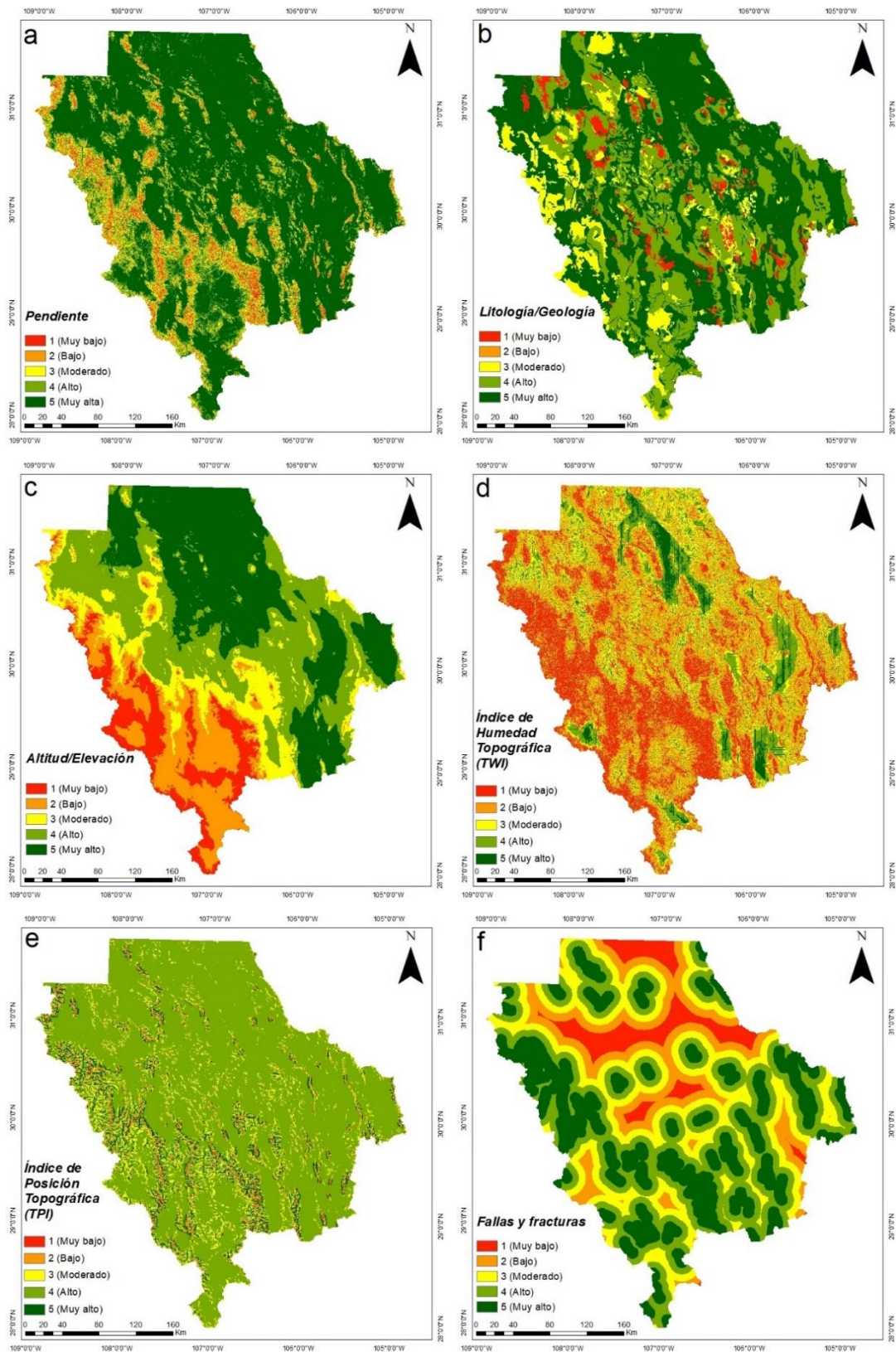
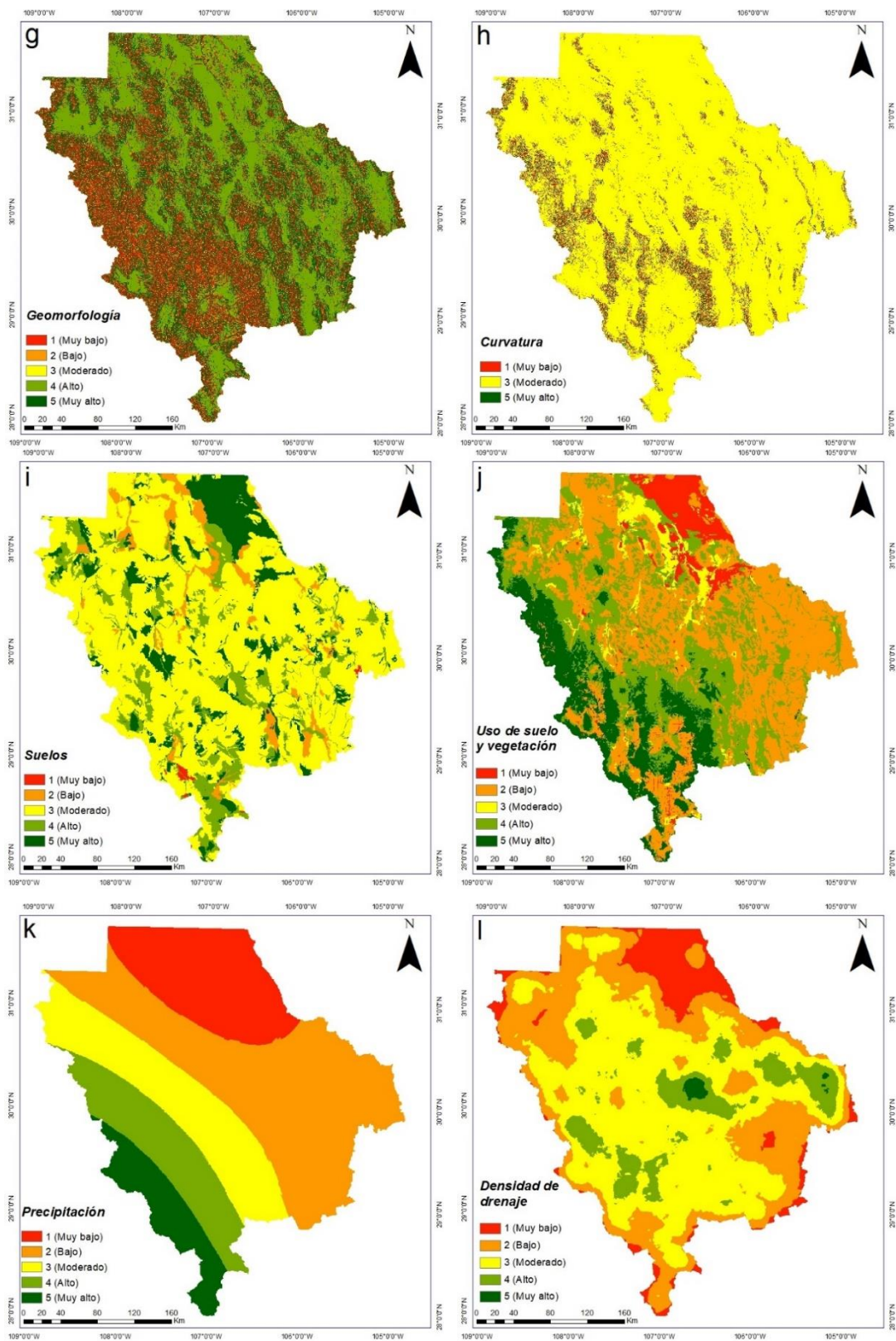
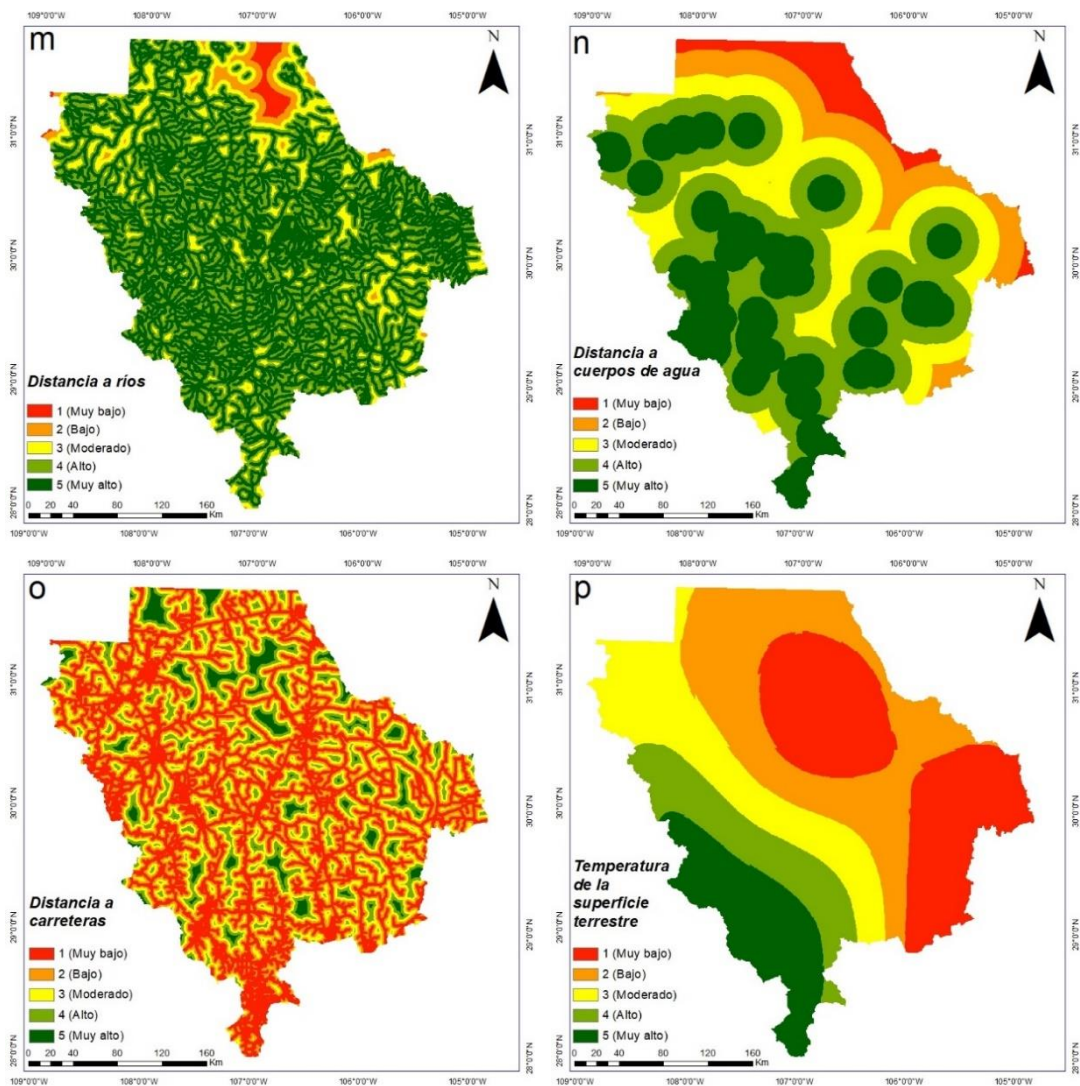


Figura 9. Factores estandarizados en escala de aptitud. (a) Pendiente, (b) Litología/Geología, (c) Altitud/Elevación y (d) Índice de Humedad Topográfica.



Continuación de la Figura 9. (g) Geomorfología, (h) Curvatura, (i) Suelos, (j) Uso de suelo y vegetación, (k) Precipitación y (l) Densidad de drenaje.



Continuación de la Figura 9. (m) Distancia a ríos, (n) Distancia a cuerpos de agua, (o) Distancia a carreteras y (p) Temperatura de la superficie terrestre.

La Tabla 2 muestra la estandarización de cada uno de los factores que influyen en la idoneidad de las ZPRAS. En el caso de los factores como litología / geología, suelos y uso de suelo y vegetación, la estandarización se realizó con base en la literatura y expertos geólogos quienes proporcionaron información para reclasificar los tipos de roca y suelos con base en sus características que propician la recarga (Anexo 2).

3.8. Aplicación del método

3.8.1. Evaluación multicriterio

La evaluación multicriterio (EMC) es una metodología para la resolución de problemas en la toma de decisión multicriterio, de manera que se simplifique o represente el sistema real a una condición de fácil comprensión o aplicación (Sánchez-Lozano *et al.*, 2013). En el proceso de la toma de decisiones con el uso de la EMC, se asignan pesos aritméticos a las variables según la importancia percibida por los responsables, para luego obtener puntuaciones de idoneidad y generar escenarios alternativos (Walker *et al.*, 2021).

De los métodos más utilizados para la solución de problemas complejos en la EMC, el método de clasificación evalúa la importancia de cada criterio mediante la ponderación, para luego clasificarlos en orden de preferencias de los responsables de la toma de decisiones. El método de valoración requiere la estimación de ponderaciones de una escala predeterminada. El proceso de jerarquía analítica (por sus siglas en inglés AHP) consiste en la comparación por pares en una matriz de relaciones. El método de análisis de compensación utiliza evaluaciones directas por pares de alternativas (Prieto-Amparán *et al.*, 2021).

3.8.2. Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)

El proceso de jerarquía analítica (por sus siglas en inglés AHP) fue desarrollado por Saaty (1980) con el propósito de tratar problemas complejos y sintetizar los elementos más importantes en un estudio que implica múltiples factores y un juicio personal de los responsables de la toma de decisiones. Utiliza datos cualitativos y cuantitativos y desarrolla indicadores de coherencia.

En la actualidad es un método ampliamente utilizado en conjunto con los SIG para evaluar la idoneidad de factores en diversos estudios medioambientales (Kulandaisamy *et al.*, 2020). Consiste en identificar los objetivos, establecer la secuencia de la toma de decisiones colocando el objetivo principal en la parte superior de la jerarquía para luego identificar los factores para alcanzar el objetivo en los niveles intermedios, el número máximo de factores permitidos es 7 ± 2 . Se determinan las ponderaciones de los factores por medio de un conjunto de matrices de comparación en donde los responsables expresan su opinión sobre la



importancia relativa de cada criterio utilizando una escala del 1 al 9 en donde el 1 indica que un criterio es igual de favorable que otro, 3 es moderadamente más favorable, 5 es fuertemente más favorable, 7 es muy fuertemente más favorable y 9 indica que un criterio es extremadamente más favorable que otro, los valores de 2, 4, 6 y 8 son valores intermedios.

Una vez completada la matriz se calcula el valor de priorización de cada criterio sumando todos los números de cada columna de la matriz y dividiendo cada número entre la suma de la columna correspondiente. Por lógica el factor más importante es aquel con mayor peso, por lo que deberá recibir mayor atención en el proceso de la toma de decisiones (Saaty, 1980).

Finalmente, para determinar si la matriz de comparación tiene coherencia se calcula el coeficiente de coherencia (CR por sus siglas en inglés Consistency Ratio) con la siguiente ecuación (3):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{ecuación (3)}$$

donde CI es la Índice de Consistencia (por sus siglas en inglés consistency index) calculado con la ecuación (4) y RI es el Índice de Consistencia Aleatoria (por sus siglas en inglés Random Index).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{ecuación (4)}$$

donde λ_{max} es el valor máximo de la matriz de comparación y n es el número de factores (Achu *et al.*, 2020).

Para disminuir la complejidad de la comparación de las variables y evitar matrices con más de 7 factores, se decidió dividir por grupos los 16 factores, de manera que el primer grupo de factores topográficos integra la pendiente, la altitud/elevación, el TPI, la geomorfología y la curvatura. El segundo grupo de factores biofísicos incluye la litología/geología, el TWI, suelos, uso de suelo y vegetación, la precipitación y la temperatura de la superficie terrestre. El tercer y último grupo de factores de distancia o proximidad se compone por las fallas y fracturas, densidad de drenaje, distancia a ríos, distancia a carreteras y distancia a cuerpos de agua.



El cálculo de las matrices de comparación y del *CR* se realizó mediante la calculadora *AHP Online System - AHP-OS* (Goepel, 2018), por medio de una encuesta, la cual fue enviada de noviembre de 2023 a abril 2024, a 200 personas expertos en materia del agua, de las cuales 28 contestaron. La encuesta consiste en comparar las variables de cada uno de los tres grupos de factores en una escala del 1 al 9, en donde cada uno de los expertos determinó a criterio propio los pesos de los factores con base en sus conocimientos (*expert knowledge*) de las variables que influyen en la recarga de aguas subterráneas.

3.8.3. Superposición ponderada

Una vez que los factores se encuentran estandarizados y contamos con los pesos de cada factor, se procedió a realizar una superposición espacial ponderada o combinación lineal ponderada, la cual consiste en realizar una suma aritmética de cada factor, multiplicado por su peso (Ajayi *et al.*, 2022) con respecto a la potencialidad para que ocurra la recarga y de esta manera poder obtener un índice de decisión final de las zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas. Este procedimiento se realizó con la herramienta *Weighted Overlay* ubicada en el módulo de *Spacial Analyst Tools* del software *ArcMap*®. El uso de esta herramienta desempeña un papel importante para representar los resultados del AHP con el uso de SIG (Moodley *et al.*, 2022).

El modelo de combinación lineal ponderada se basa en la siguiente ecuación (5):

$$iZPRAS = \sum_{i=1}^n w_i * x_i \quad \text{ecuación (5)}$$

donde *iZPRAS* es el índice de las zonas potenciales para la recarga de agua subterránea, w_i representa el peso del factor calculado mediante AHP, y x_i representa el factor.

3.9. Proceso de validación

La validación es un proceso necesario en el uso de modelos predictivos (Chung y Fabbri, 2003; Trabelsi *et al.*, 2022). Existen distintos métodos recomendados para evaluar la precisión de modelos entorno al potencial de las zonas donde ocurre la recarga de aguas subterráneas (Maity *et al.*, 2022), con el uso de SIG (Uc Castillo *et al.*, 2022). El presente estudio realizó la validación con



base en lo propuesto por Abdekareem *et al.* (2022) el cual compara las zonas con un muy alto y alto potencial con los datos ópticos obtenidos de imágenes de satélite Landsat-8 de las bandas 3, 5 y 7.

Las imágenes de satélite se componen de bandas, que son porciones de la energía del espectro electromagnético, capturado por un sensor y se almacenan en bandas. La banda 3 corresponde a la porción del espectro rojo que se encuentra entre las 0.63 a 0.69 micras y proporciona información sobre la vegetación, ya que percibe la absorción de la clorofila y logra diferenciar especies vegetales y los diferentes usos de suelo. La banda 5 corresponde a la porción del espectro infrarrojo cercano 2 (infrarrojo termal) en los valores de 1.55 a 1.75 micras y percibe los usos de suelo, mide la humedad en la vegetación y puede diferenciar entre nubes y nieve. La banda 7 corresponde a la porción del espectro infrarrojo medio en los valores de 2.08 a 2.35 micras, identifica minerales y se utiliza en el mapeo hidrotermal (INEGI, 1993).

En ese sentido, los cuerpos de agua absorben la luz, por lo que aparecen en tonalidades oscuras. Con la información de los satélites, es posible generar o derivar nueva información, entre ella índices de vegetación. Uno de los índices de vegetación más utilizados a nivel mundial es el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés *Normalized Difference Vegetation Index*). Para este estudio se utilizó la plataforma *Google Earth Engine* (Gorelick *et al.*, 2017) para extraer información del NDVI promedio de 2000 a 2020, con el uso de las bandas espectrales, el cual permite realzar la información y determinar aquellas zonas con contenido de humedad/agua o incluso cuerpos de agua. El NDVI se ha utilizado en la percepción remota de observación de la tierra, de la vegetación y puede mostrar variaciones de sensibilidad por cambios climáticos a nivel global, particularmente se utiliza en zonas áridas y semiáridas para evaluar los cambios de precipitación (Zheng *et al.*, 2019). El NDVI se trata de un índice adimensional que evalúa la reflectancia de las bandas infrarrojo cercano y rojo. La ecuación 6 para obtener el NDVI es la siguiente:

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad \text{ecuación (6)}$$



donde *NIR* es la banda Infrarrojo Cercano (por sus siglas en inglés Near Infrared) y *RED* es la banda roja.

Como resultado se obtiene un intervalo de valores que van de -1 a 1 en donde los valores negativos cercanos al -1 (tonos oscuros) indican cuerpos o firmas de agua y los valores positivos reflejan vegetación, los valores cercanos al cero corresponden a zonas áridas, rocas, arena o nieve, los valores positivos (0.2 a 0.4) muestran pastizales y matorrales y los valores cercanos al 1 son bosques húmedos templados y tropicales (Sha *et al.*, 2020).

Tras la elaboración del mapa de ZPRAS, utilizando el método de EMC-AHP en combinación con técnicas de superposición ponderada, se realizó una comparativa detallada. Esta comparación se enfocó en las áreas clasificadas con niveles de muy alta y alta aptitud para la recarga de aguas subterráneas. Para ello, se empleó la Curva de Operación del Receptor (ROC por sus siglas en inglés *Receiver Operating Characteristic*) como herramienta analítica. Se contrastaron estas áreas con los sitios identificados mediante el índice espectral del NDVI que presentan valores negativos que indican presencia de agua.

La Curva ROC es uno de los métodos más confiables en el proceso de validación, el cual es una representación gráfica que puede mostrar la precisión de modelos de predicción o clasificación (Echogdali *et al.*, 2022). La construcción de la curva ROC consiste en comparar las predicciones del modelo de EMC con los datos observacionales del NDVI, de manera que se verifique si las áreas clasificadas con potencial alto (4) y muy alto (5) coinciden con las áreas identificadas como zonas con presencia del agua por el NDVI. Se traza la tasa de valores de falsos positivos en el eje x contra la tasa de valores de verdaderos positivos en el eje y, previamente calculados a partir de una matriz de comparación (Yariyan *et al.*, 2022) a diferentes umbrales de clasificación, lo cual implica el cálculo de estos valores para distintos puntos de corte en las predicciones del modelo.

Una vez trazada la curva, se obtiene el área bajo la curva (por sus siglas en inglés AUC) que oscila entre 0 y 1. El AUC que proporciona como resultado un valor menor a 0.5 nos indica que el método no tiene capacidad predictiva, o bien, un rendimiento no mejor que el azar, mientras que un valor de 1 indica que el método



tiene una capacidad máxima predictiva (Mier Jiménez y Taimal Chárez, 2022) y según diversos autores se puede clasificar de la siguiente manera en: deficiente (0.5 - 0.6), media (0.6 - 0.7), buena (0.7 – 0.8), muy buena (0.8 – 0.9) y excelente (0.9 – 1) (Tahmassebipoor *et al.*, 2015; Razandi *et al.*, 2015; Echogdali *et al.*, 2022).



CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Región Hidrológica No. 34 Cuencas Cerradas del Norte es una zona de gran interés, ocupa gran parte del estado de Chihuahua en donde se desarrollan distintas actividades económicas de suma importancia a nivel nacional que dependen del recurso hídrico subterráneo.

El presente estudio integra los sistemas de información geográfica (SIG) en conjunto con la evaluación multicriterio (EMC) y el proceso de jerarquía analítica (AHP) para evaluar los niveles de idoneidad que comprende la RH34 con respecto a las zonas potenciales para la recarga de aguas subterráneas (ZPRAS).

Se seleccionaron 16 factores para la evaluación de las ZPRAS, los cuales fueron cartografiados y estandarizados en una escala del 1 (Muy bajo) al 5 (Muy alto) dependiendo sus aptitudes para que ocurra la recarga. Con el AHP que integra la opinión de 28 expertos en materia del agua, se le asignaron pesos a cada criterio y con el proceso de Superposición Ponderada se obtuvo un mapa de idoneidad, el cual fue comparado con mapa NDVI, como indica la metodología de Abdekareem (2022) y por medio de la Curva ROC se validaron los resultados.

Los 16 factores se dividieron en tres grupos: factores topográficos, factores biofísicos o ambientales y factores de distancia o proximidad. Cada experto tuvo la oportunidad de elegir el grupo de variables a comparar dependiendo su experiencia, sin embargo, la mayoría respondió los tres grupos de factores, no obstante, para respetar la metodología de Saaty (1980) que indica que el CR debe ser $<10\%$ para no generar inconsistencias en el proceso, se eliminaron aquellas opiniones con valores altos de inconsistencia, obteniendo un CR de 9.02% con la opinión de 21 expertos.

En ese sentido, se obtuvieron los pesos de cada criterio por grupo y con respecto a los factores topográficos (Figura 10) la pendiente se destaca como criterio con mayor aptitud para que ocurra la recarga de aguas subterráneas con un 30.6% , la curvatura obtuvo un 20.7% y la altitud / elevación un 19.5% . En el caso de la geomorfología y el índice de posición topográfico (TPI) son factores con menor aptitud según los expertos, ambos con un peso menor al 16% .

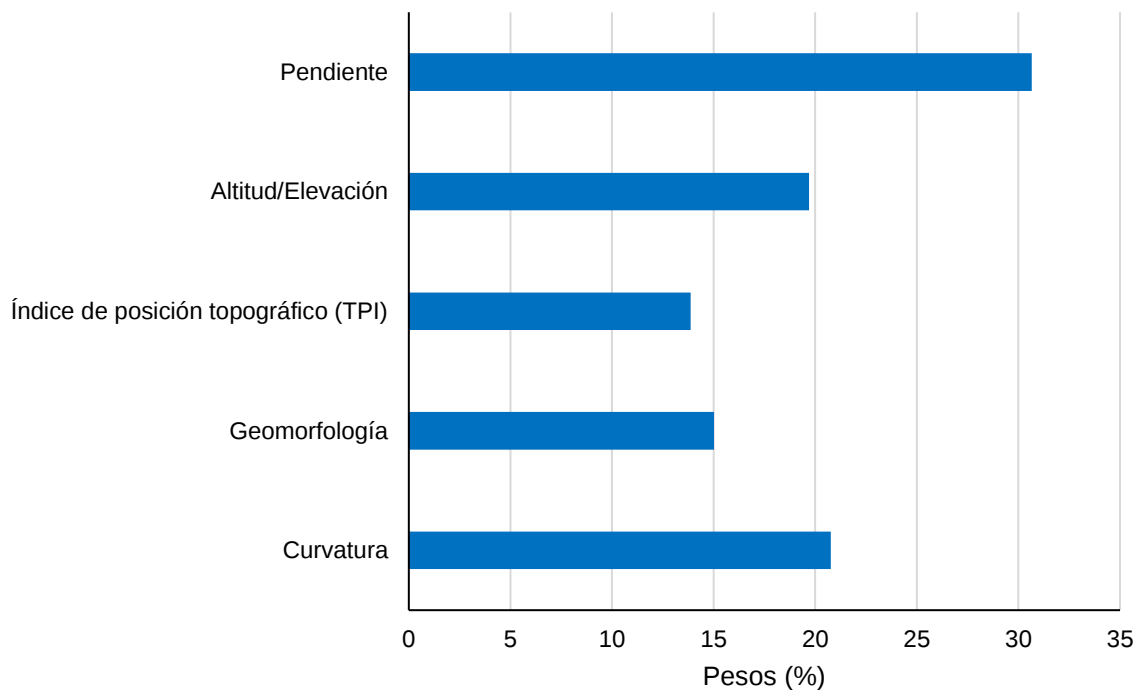


Figura 10. Pesos asignados por expertos con la comparación de factores topográficos.

En los factores biofísicos o ambientales (Figura 11) el uso de suelo y vegetación fue el criterio con mayor peso alcanzando un 32.7% seguido del índice de humedad topográfica (TWI) con un 19.5%. Los factores de litología / geología, suelos y precipitación oscilan entre 11 y 17% y según los expertos, la temperatura de la superficie terrestre es el criterio con menor aptitud para la recarga de aguas subterráneas con apenas un peso de 3.6%.

En el caso de los factores de distancia o proximidad (Figura 12) resalta el criterio de la distancia a fallas y fracturas con un peso de 35.5%, en segundo lugar, se encuentra la densidad de drenaje y con menor peso está la distancia a carreteras con un 13.2%.

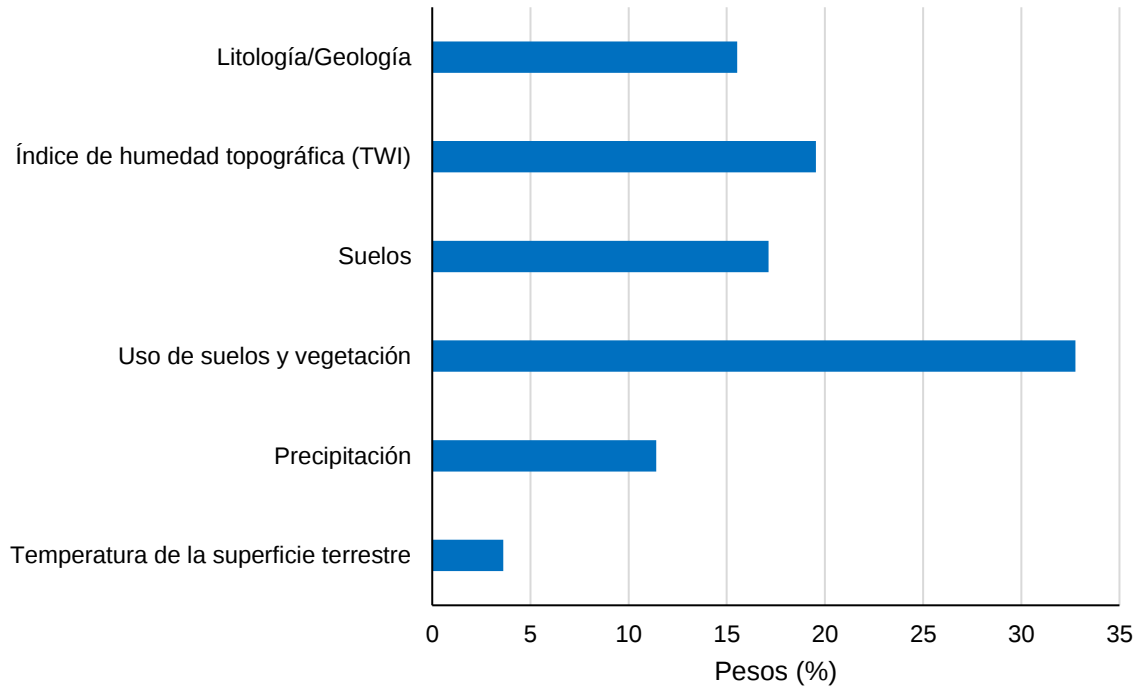


Figura 11. Pesos asignados por expertos con la comparación de factores biofísicos o ambientales.

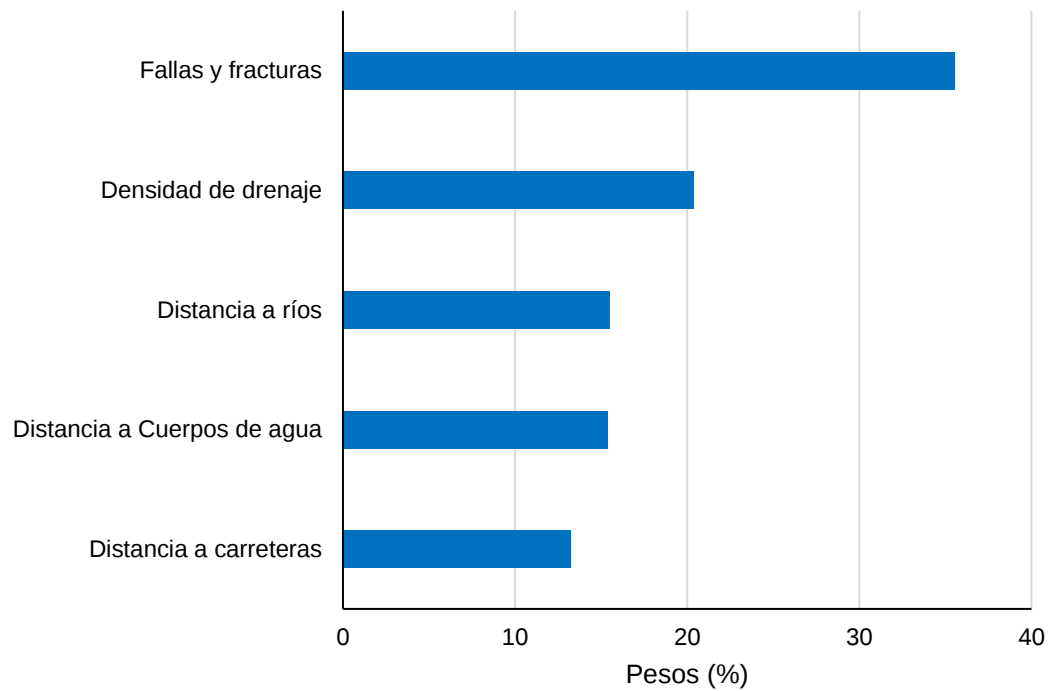


Figura 12. Pesos asignados por expertos con la comparación de variables en factores de distancia o proximidad.

4.1 Distribución espacial de las ZPRAS

4.1.1. Misma importancia

Para evaluar la importancia de la toma de decisiones multicriterio, se decidió generar un mapa de ZPRAS donde todos los factores tienen el mismo peso, importancia o aptitud para que ocurra la recarga (Figura 13).

Se obtuvo un mapa de tres clases, en donde se destaca en mayor distribución una aptitud moderada (3) para la recarga de aguas subterráneas con aproximadamente un 69% del total del área, seguido de la aptitud alta (4) con un 30.3% y en última instancia la aptitud baja (2) con apenas un 0.4% del total de la región. No hay presencia de aptitud muy baja (1) ni muy alta (5). Las interacciones entre varios factores pueden neutralizar los efectos entre factores, de otra manera podrían llevar a anular valores extremos.

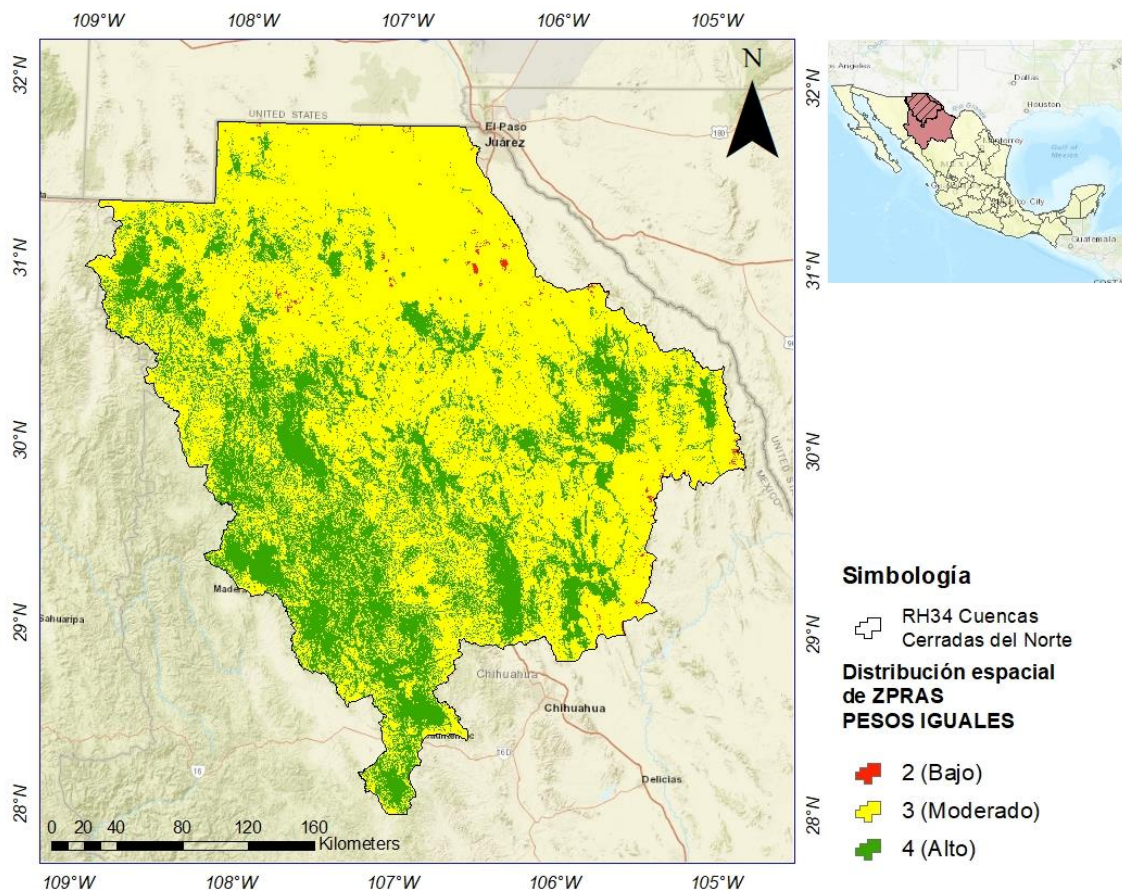


Figura 13. Distribución espacial de ZPRAS con los pesos iguales en cada criterio.

4.1.2. Importancia de los expertos mediante AHP

4.1.2.1. Factores topográficos

Con base en los pesos asignados por los expertos en materia del agua a los factores topográficos se obtuvo un mapa de la distribución espacial de las ZPRAS de los factores que conforman dicho grupo.

Se obtuvieron 5 clases de aptitud en donde predomina la idoneidad alta (4) con un 72.3% del total de la región, resaltando las zonas norte, noreste y centro, lo cual indica que las características topográficas presentes en estas zonas presentan potencialidad alta para que ocurra la recarga. La aptitud moderada (3) se presenta en un 21.7% en las zonas sur y oeste. Las zonas con aptitud baja (2) se distribuyen en un 5.6% y en última instancia la aptitud muy baja (1) ubicada en las crestas de las sierras con elevaciones altas y la aptitud muy alta (5) presente en las faldas de las sierras comprenden un 0.8% en conjunto.

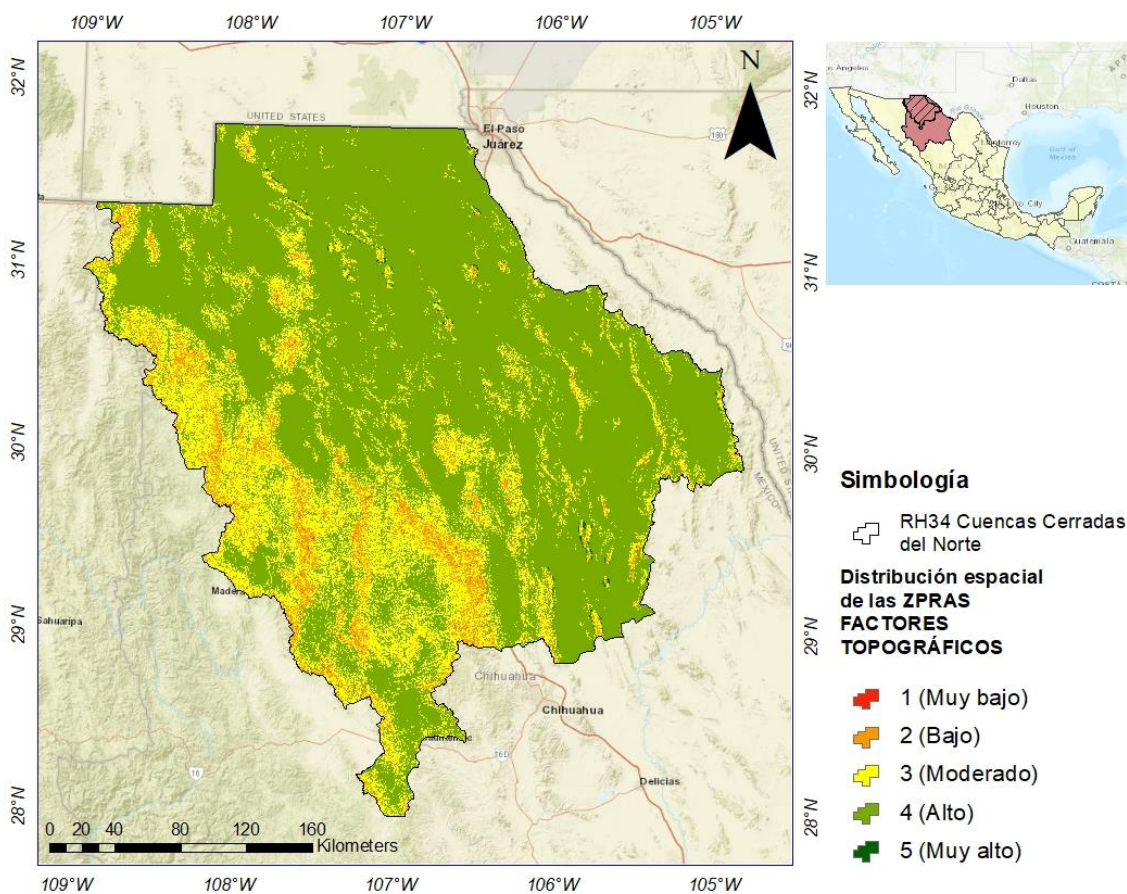


Figura 14. Distribución espacial de ZPRAS de los Factores Topográficos

4.1.2.2. Factores biofísicos o ambientales

La comparación de factores realizada por expertos dio como resultado la asignación de pesos a los factores biofísicos o ambientales y con la superposición ponderada se obtuvo un mapa de distribución de ZPRAS en donde predominan las zonas con aptitud moderada (3) en un 61% de la RH34 distribuida por toda la región. Así mismo, se muestra una idoneidad alta (4) en un 25%, resaltando la Sierra Madre Occidental al oeste de la región. También se observa la presencia de una aptitud baja (2) al norte, centro y este y un potencial muy alto (5) para la recarga de aguas subterráneas con apenas un 0.4% en cuerpos de agua como la Laguna de Babícora, la Laguna de Bustillos y la Laguna de los Mexicanos. La presencia de una aptitud muy baja (1) con un 0.008%, los pesos indican que según los factores que forman parte de los factores biofísicos muestran gran inclinación hacia las zonas con características que propician la retención de humedad con respecto al potencial para que ocurra la recarga de aguas subterráneas.

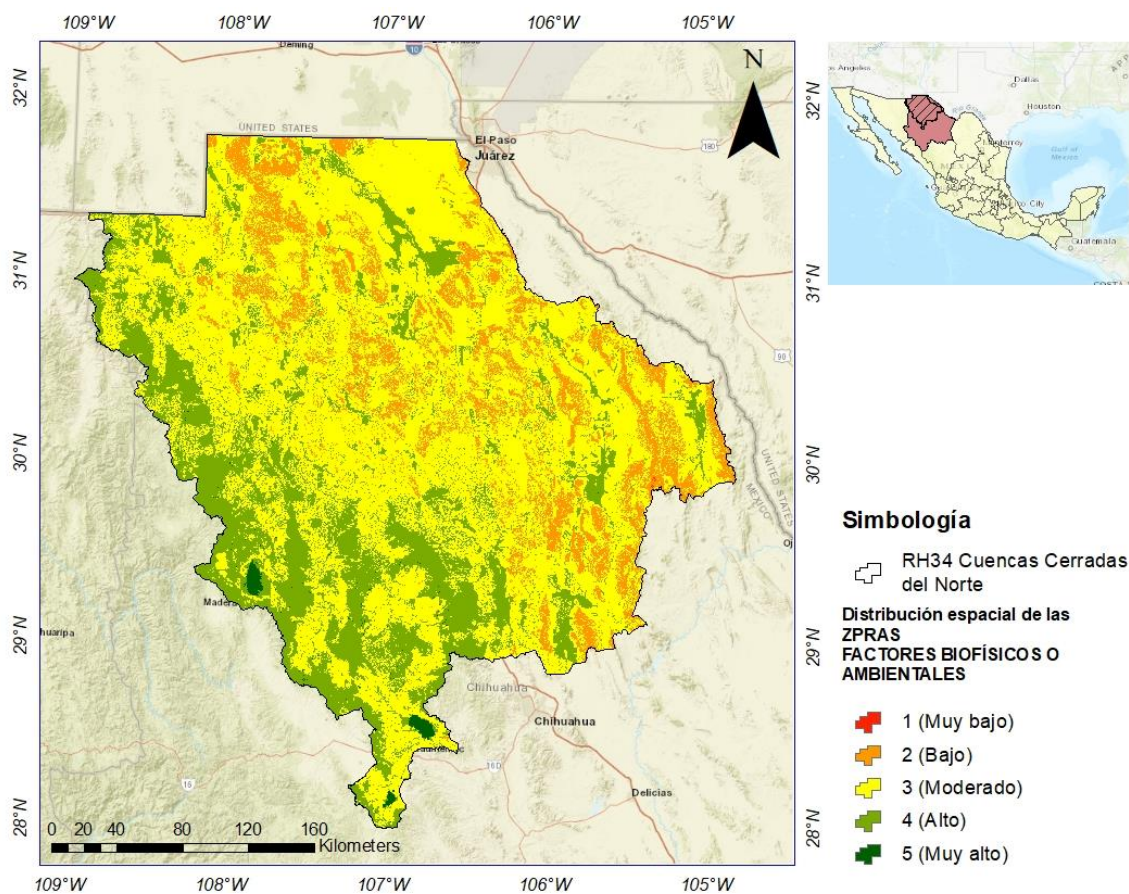


Figura 15. Distribución espacial de ZPRAS de los Factores Biofísicos o Ambientales.

4.1.2.3. Factores de distancia o proximidad

Los pesos asignados a los factores que forman parte del grupo de factores de distancia o proximidad dieron como resultado un mapa de distribución espacial de las ZPRAS en donde predomina un potencial alto (4) con un 45.5% distribuido en toda la región, con excepción de la zona norte y noreste en donde se resaltan los potenciales bajo (2) y muy bajo (1) con un 9.8% y 1% respectivamente. La aptitud moderada (3) abarca un 42.8% y las zonas con muy alta (5) idoneidad para la recarga alcanzan apenas un 0.6%.

Los pesos obtenidos muestran potenciales altos a las zonas con mayor densidad de fallas, fracturas y cuerpos de agua debido a que dichos factores propician el movimiento vertical de las aguas superficiales y la recarga permanente de aguas subterráneas.

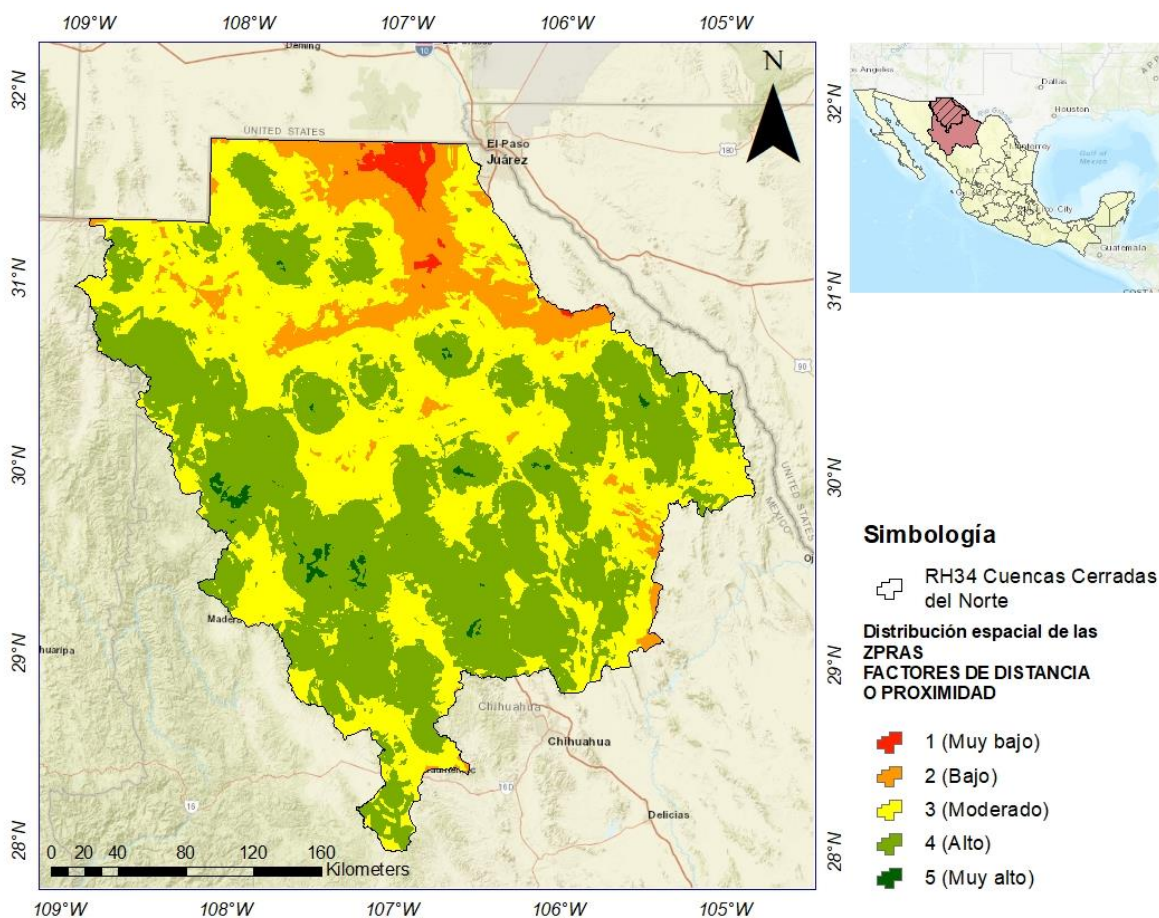


Figura 16. Distribución espacial de ZPRAS de los Factores de Distancia o Proximidad

4.1.2.4. Distribución espacial de las zonas potenciales para la recarga de aguas subterráneas en la RH34 Cuencas Cerradas del Norte

Una vez que los expertos en materia de agua compararon los tres grupos de factores, también realizaron una última comparación en donde asignaron pesos de importancia a los mismos grupos de factores, en donde se obtuvo como resultado que los factores ambientales o biofísicos resaltan en jerarquía de importancia con un peso de 53.4%, seguido de los factores topográficos con un 34.9% y en última instancia los factores de distancia o proximidad obtuvieron un peso del 11.7%.

Finalmente, con la superposición ponderada se obtuvo la distribución espacial del *izPRAS* en la RH34 Cuencas Cerradas del Norte, el cual proporcionó 4 clases donde predomina un potencial para la recarga moderado (3) con un 75.7% del total de la región, seguido de una idoneidad alta (4) abarcando un 21.8%. Las aptitudes bajas (2) y muy alta (5) se distribuyen en un 2.1% y 0.1% respectivamente. (Figura 17).

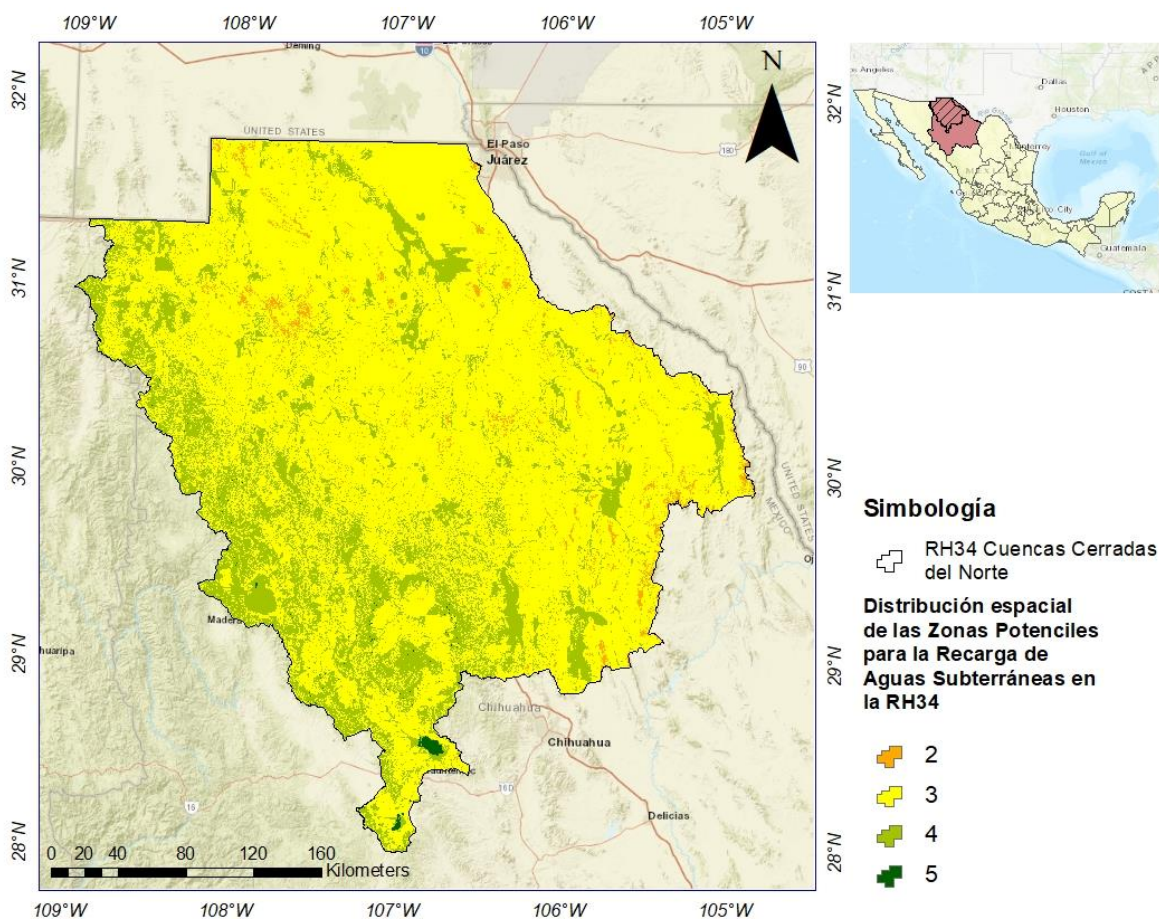


Figura 17. Distribución espacial de las ZPRAS en la RH34 Cuencas Cerradas del Norte.



4.2. Interpretación de los resultados

La distribución espacial de las ZPRAS en la RH34 muestra una idoneidad muy alta (5) especialmente en los cuerpos de agua al sur y sureste de la región, de los cuales se destaca la laguna de Bustillos y la laguna de los Mexicanos como principales zonas con potencial debido a la recarga permanente por el flujo descendente del agua hacia los acuíferos.

Se puede observar una aptitud alta (4) al oeste de la RH34 en la porción de la Sierra Madre Occidental, donde el conjunto de los 16 factores indican que las características en esta zona son óptimas para propiciar la recarga de aguas subterráneas, especialmente la alta densidad de fallas y fracturas, las precipitaciones altas y temperaturas bajas, sin embargo, también se puede observar esta aptitud al norte, en el municipio de Ahumada en donde, a pesar de la escasez de caudales, cuerpos de agua y fallas y fracturas, las planicies y los tipos de suelo en esta zona favorecen la retención de humedad.

En la RH34 predomina la aptitud moderada (3) lo cual nos da un claro ejemplo del porque no podemos evaluar los factores que intervienen en la recarga de aguas subterráneas por separado, es decir, aquellas zonas con características topográficas idóneas, requieren de factores biofísicos como los tipos de suelo, roca o usos de suelo y vegetación para que ocurra la recarga, o bien, las regiones con características ambientales óptimas, necesitan el análisis de factores de proximidad a las fallas, ríos, cuerpos de agua o carreteras para evaluar la ocurrencia de la recarga.

No hay presencia de zonas con aptitudes muy bajas (1) y las regiones donde se observan aptitudes bajas (2) son escasas y desconcentradas, no obstante, al norte y este se localizan dos de los cuatro acuíferos con disponibilidad media anual de aguas subterráneas dentro de la RH34, Josefa Ortiz de Domínguez y Aldama – El Cuervo donde se observa la presencia de dicho potencial, por lo que se resalta la importancia de realizar este tipo de estudios que determinen aquellas zonas con potencial para la recarga que son vulnerables debido a la falta de condiciones óptimas.

4.3. Validación

La evaluación multicriterio es una técnica que integra múltiples factores para la toma de decisiones en situaciones complejas. En el contexto de la zonificación para conservar áreas para la recarga de agua subterránea, su objetivo es identificar y mapear las áreas con mayor potencial para la infiltración y almacenamiento. La evaluación multicriterio y la validación mediante la curva ROC son técnicas comunes en estudios de geociencias y recursos hídricos. La curva ROC se utilizó para evaluar la precisión del modelo multicriterio de *IZPRAS*. Esta curva es una herramienta gráfica que muestra la capacidad del modelo para distinguir entre las zonas con muy alto potencial y alto potencial y las zonas de aptitud moderada y baja en comparación con las áreas de cuerpos de agua o presencia de humedad derivadas del NDVI (Figura 18).

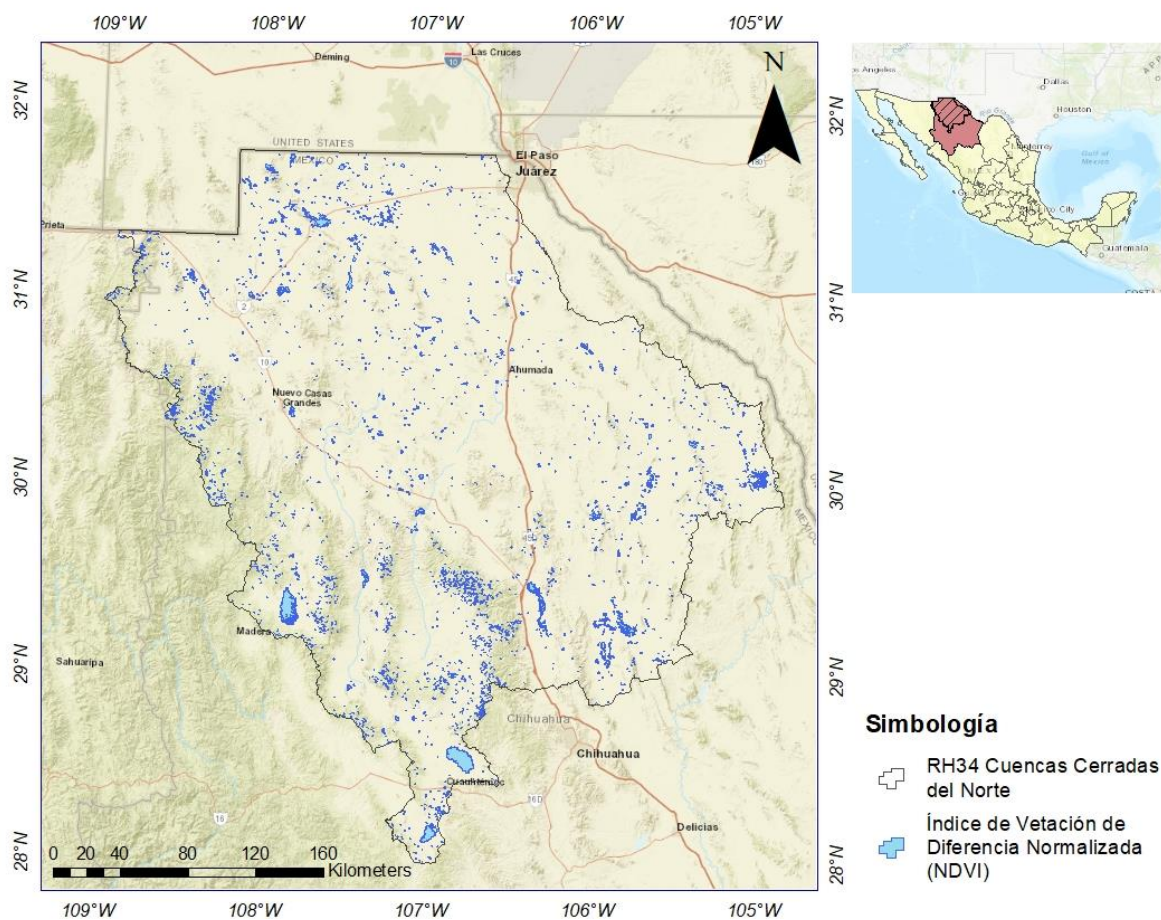


Figura 18. NDVI (Índice de Diferencia Normalizada)



La Curva ROC mostró un buen desempeño con un AUC = 0.796 (Figura 19), lo cual indica que el modelo tuvo una buena capacidad discriminatoria, es decir, es bastante preciso en identificar las zonas con alto potencial de recarga de agua subterránea en comparación con las áreas con menor susceptibilidad, lo cual valida la efectividad del modelo para su propósito.

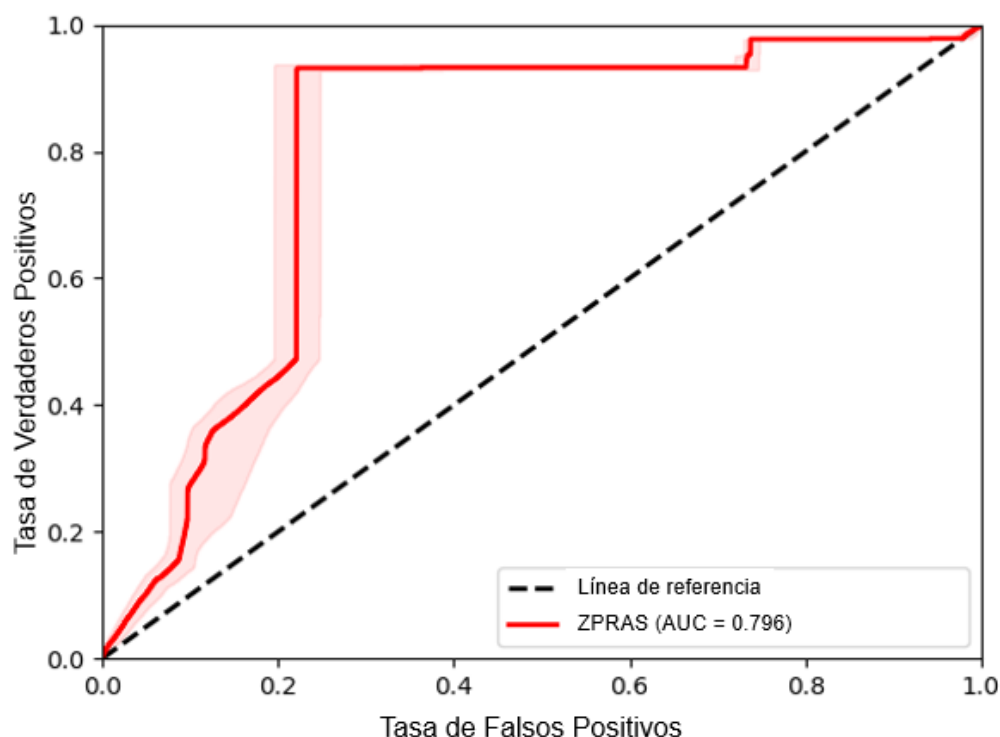


Figura 19. Validación mediante el modelo de la curva ROC

4.4. Discusión

Se espera que la cartografía del potencial de zonas para la recarga de las aguas subterráneas sea útil para la gestión sostenible de los recursos hídricos. El *iZPRAS* cuenta con un sustento metodológico internacional y local de expertos en materia de agua que, mediante la comparación de variables, se asignaron pesos a los factores, y así se logró obtener la distribución espacial de las ZPRAS de la RH34 Cuencas Cerradas del Norte, incorporando la opinión experta y reflejándola en una distribución espacial. El *iZPRAS* no solo incorpora la información disponible, sino que también refleja las perspectivas y conocimientos de los especialistas, asegurando que las decisiones de gestión de recursos hídricos se basen en evidencia científica.



Las zonas con potenciales altos y muy altos para la recarga de aguas subterráneas pueden contribuir a determinar nuevos suministros del recurso hídrico para satisfacer la demanda de los diferentes usos en la región. No obstante, para asegurar la futura disponibilidad es necesario establecer medidas de gestión sostenible que logren un equilibrio entre la recarga y la extracción, por lo que es imperativo tomar medidas para preservar estos sitios. Las zonas de recarga efectiva son cruciales para mantener el equilibrio hidrológico de los ecosistemas locales. Proteger estas áreas puede ayudar a preservar la biodiversidad, mantener los hábitats naturales, y asegurar que los ecosistemas continúen proporcionando servicios vitales como la purificación del agua, la regulación del clima y el soporte de la vida silvestre.

En ese sentido, las zonas con idoneidad moderada, también requieren la implementación de medidas para su mejora en cuanto a la conservación y pueden llegar a ser nuevas fuentes del recurso hídrico. Las zonas con un potencial moderado presentan una oportunidad para la gestión y conservación del agua. Aunque estas áreas no exhiben inicialmente el mayor potencial, con las estrategias adecuadas pueden ser mejoradas para aumentar su capacidad de recarga y contribuir significativamente a la sostenibilidad hídrica, especialmente en zonas áridas.

Es importante resaltar que las zonas con aptitudes bajas requieren de mayor atención por la vulnerabilidad que representan debido a las características inadecuadas para que ocurra la recarga, por lo que es recomendable evitar la extracción y aumentar las medidas de preservación en estos sitios e inclusive recurrir a la remediación de ecosistemas si el uso de suelo lo permite.

La elaboración del *IZPRAS* usando pesos uniformes comparado con el uso de pesos diferenciados obtenidos a través del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) presenta diferencias en términos de precisión y relevancia de los resultados. La elección de cómo asignar estos pesos impacta directamente en cómo se valoran e interpretan diferentes áreas dentro del mapa resultante. Los pesos asignados a cada factor de recarga influyen en cómo cada factor contribuye al resultado final. Esto es crucial porque permite que el modelo refleje la importancia relativa de



diferentes características del terreno, como la pendiente, la vegetación, la precipitación y otros factores. Por otro lado, al utilizar pesos uniformes la principal limitación es que este enfoque puede no reflejar con precisión la realidad del sistema estudiado. Algunos factores pueden ser más críticos que otros para la recarga de agua en áreas específicas, y no advertir esta diferencia puede llevar a conclusiones erróneas.

En este estudio el ponderar los factores mediante el método de AHP incluyó la participación ciudadana, involucrando a múltiples partes interesadas y expertos, lo que no solo mejora la calidad de los datos de entrada, sino que también aumenta la transparencia de los resultados del estudio.

El método AHP facilitó la incorporación del juicio experto en el proceso de toma de decisiones. Esto es crucial en áreas donde los datos pueden ser limitados o inciertos, y donde el conocimiento local y experto es fundamental para entender los procesos de recarga. La metodología AHP proporciona un marco reproducible y transparente para la toma de decisiones, lo que es esencial para la planificación a largo plazo y para la comparación entre diferentes regiones o periodos de tiempo.

En zonas áridas, la gestión eficaz del agua es fundamental para la supervivencia y el desarrollo. Los mapas de zonas potenciales para la recarga de aguas subterráneas pueden guiar la implementación de medidas de conservación y recarga, asegurando un suministro de agua. Estos mapas proporcionan una base científica-técnica para el desarrollo de políticas públicas y estrategias de planificación. Pueden influir en decisiones críticas sobre el uso del suelo, la protección de áreas clave para la recarga y la mitigación de los impactos del cambio climático.

Por otra parte, el valor del AUC de 0.79 se considera un resultado sólido. Generalmente, un AUC entre 0.7 y 0.8 indica que el modelo tiene un rendimiento aceptable a bueno, con una capacidad razonable para distinguir entre las áreas de alto y bajo potencial de recarga. Aunque el resultado es positivo, es importante continuar mejorándolo, esto podría implicar la inclusión de más factores, la obtención de datos de mayor resolución o la refinación de los pesos asignados a cada criterio.



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La cartografía del potencial de las aguas subterráneas utilizando diversos factores es de vital importancia como primera aproximación en los estudios de las aguas subterráneas en grandes extensiones de terreno. El trabajo actual representa una recopilación de información de la RH34, que incluye datos de distintos estudios previos, información actualizada de la disponibilidad media anual de agua y, principalmente, las propuestas de las áreas con alto potencial para la conservación del recurso hídrico. Se empleó el enfoque de evaluación multicriterio, en conjunto de la asignación de pesos mediante la técnica AHP, incorporando la opinión de distintos expertos. La integración del modelo de Evaluación Multicriterio a escala espacial puede ser clave para identificar y priorizar las áreas más prometedoras para la conservación y gestión del agua en la región e identificar las zonas susceptibles con menor potencialidad para la protección y conservación de aguas subterráneas.

Para validar el modelo de EMC, se utilizó la información del mapa de susceptibilidad y un indicador espectral NDVI y se generó una curva ROC para evaluar la capacidad del modelo de discriminar entre las diferentes categorías de susceptibilidad en función a la presencia de agua detectada por el NDVI. El AUC = 0.79 indicó un desempeño satisfactorio del modelo predictivo logrando identificar correctamente las áreas con mayor potencial para la recarga de aguas subterráneas y las zonas con susceptibilidad lo cual respalda la eficacia del modelo.

La RH34 es una zona con pocos estudios enfocados a la administración del agua subterránea, por lo que los resultados obtenidos no solo proporcionan una visión regional de las zonas de recarga potencial, sino que también pueden servir como base para la implementación de planes regionales de conservación y manejo de recursos hídricos. Estos planes pueden incluir estrategias específicas para la captación y almacenamiento de aguas pluviales, la protección de áreas críticas para



la recarga y el desarrollo de políticas de gestión sostenible que equilibren la extracción y la recarga de acuíferos.

5.2. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos y las conclusiones del estudio, se enlistan las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones:

1. Integrar mayor número de factores que intervienen en la recarga de aguas subterráneas, de manera que se logre obtener un mayor panorama al momento de asignar pesos por individual a cada criterio.
2. El alcance de los SIG es bastante amplio, por lo que este tipo de estudios puede realizarse a escalas grandes, como es el caso de la RH34, sin embargo, se recomienda que para identificar con mayor precisión las ZPRAS se delimiten a zonas más pequeñas, como por ejemplo a nivel de cuenca, acuífero o municipio.
3. Aumentar el número de expertos en materia del agua que asignen pesos a los factores y, en ese sentido, de ser necesario concretar reuniones de manera personal para asegurar que los participantes logren un valor de CR $< 10\%$.
4. La reclasificación y estandarización de factores se realizó con base a la literatura y la consulta a expertos geólogos en el caso de la litología y edafología, sin embargo, en este proceso también se puede integrar la opinión de expertos en cada uno de los factores para obtener una reclasificación y estandarización global.
5. Se recomienda realizar este tipo de estudios, previo a las metodologías tradicionales como sondeos o detección geoelectrica con el propósito de delimitar las ZPRAS y acotar los sitios donde se realicen dichos métodos.
6. Las *iZPRAS* obtenidas en el presente estudio son una aproximación a escala regional por lo que se sugiere realizar el proceso de verificación y comprobación con visitas a campo en el área de interés.



REFERENCIAS CONSULTADAS

- Abdekareem, M., Al-Arifi, N., Abdalla, F., Mansour, A., & El-Baz, F. (2022). Fusion of Remote Sensing Data Using GIS-Based AHP-Weighted Overlay Techniques for Groundwater Sustainability in Arid Regions. *Sustainability*, 14(13), 7871.
- Aceves-De-Alba, J., Júnez-Ferreira, H. E., González-Trinidad, J., CARDONABENAVIDES, A., & Bautista-Capetillo, C. F. (2019). Methodology for the optimization of groundwater quality monitoring networks oriented to satisfy a specific spatial coverage. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(5), 10861-10882.
- Achu, A. L., Thomas, J., & Reghunath, R. (2020). Multi-criteria decision analysis for delineation of groundwater potential zones in a tropical river basin using remote sensing, GIS and analytical hierarchy process (AHP). *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100365.
- Adhikary, P. P., Dubey, S. K., Chakraborty, D., & Dash, C. J. (2021). Geospatial and Geophysical Approaches for Assessment of Groundwater Resources in an Alluvial Aquifer of India. *Groundwater and Society: Applications of Geospatial Technology*, 53-82.
- Ahmadi, H., Kaya, O. A., Babadagi, E., Savas, T., & Pekkan, E. (2020). GIS-based groundwater potentiality mapping using AHP and FR models in central antalya, Turkey. *Environmental Sciences Proceedings*, 5(1), 11.
- Ajay Kumar, V., Mondal, N. C., & Ahmed, S. (2020). Identification of groundwater potential zones using RS, GIS and AHP techniques: a case study in a part of Deccan volcanic province (DVP), Maharashtra, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48, 497-511.
- Ajayi, O. G., Nwadiolor, I. J., Odumosu, J. O., Adetunji, O. O., & Abdulwasiiu, I. O. (2022). Assessment and delineation of groundwater potential zones using integrated geospatial techniques and analytic hierarchy process. *Applied Water Science*, 12(12), 276.
- Alagha, J. S., Seyam, M., Said, M. A. M., & Mogheir, Y. (2017). Integrating an artificial intelligence approach with k-means clustering to model groundwater



- salinity: the case of Gaza coastal aquifer (Palestine). *Hydrogeology Journal*, 25(8), 2347-2361.
- Alley, W. M., & Leake, S. A. (2004). The journey from safe yield to sustainability. *Groundwater*, 42(1), 12-16.
- Arulbalaji, P., Padmalal, D., & Sreelash, K. (2019). GIS and AHP techniques based delineation of groundwater potential zones: a case study from southern Western Ghats, India. *Scientific reports*, 9(1), 2082.
- Arunbose, S., Srinivas, Y., Rajkumar, S., Nair, N. C., & Kaliraj, S. (2021). Remote sensing, GIS and AHP techniques based investigation of groundwater potential zones in the Karumeniyar river basin, Tamil Nadu, southern India. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, 100586.
- Barrera-de-Calderón, M. L., Garfias, J., Martel, R., & Salas-García, J. (2022). Estimación de la distribución espacio temporal de la recarga de agua subterránea en regiones húmedas con clima tropical. *Tecnología y ciencias del agua*, 13(2), 340-404.
- Bera, A., Mukhopadhyay, B. P., & Barua, S. (2020). Delineation of groundwater potential zones in Karha river basin, Maharashtra, India, using AHP and geospatial techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(15), 693.
- Bourjila, A., Dimane, F., Nouayti, N., Taher, M., & El Ouarghi, H. (2020, March). Use of GIS, remote sensing and AHP techniques to delineate groundwater potential zones in the Nekor Basin, Central Rif of Morocco. In *Proceedings of the 4th Edition of International Conference on Geo-IT and Water Resources 2020*, Geo-IT and Water Resources 2020 (pp. 1-7).
- Caravantes, R. E. D., Peña, L. C. B., Cejudo, L. C. A., & Flores, E. S. (2013). Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2013(82), 93-103.
- Carrard, N., Foster, T., & Willetts, J. (2019). Groundwater as a source of drinking water in southeast Asia and the Pacific: A multi-country review of current reliance and resource concerns. *Water*, 11(8), 1605.



- Cerón, L. M., Sarria, J. D., Torres, J. S., & Soto-Paz, J. (2021). Agua subterránea: tendencias y desarrollo científico. *Información tecnológica*, 32(1), 47-56.
- Chung, C. J. F., & Fabbri, A. G. (2003). Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30, 451-472.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2006). Estadísticas del agua en México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2016). Estadísticas del agua en México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2020). Aguas Subterráneas. Disponibilidad por Acuíferos. Recuperado el día 21 de febrero del 2024 en: <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/chihuahua/chihuahua.html>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2020). Aguas Subterráneas. Disponibilidad por Acuíferos. Recuperado el día 15 de marzo del 2023 en: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2022). Información Estadística Climatológica. Recuperado el día 08 de marzo del 2023 en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2022). Base de datos de temperatura media anual y precipitación media anual. CONAGUA Delegación Chihuahua.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2023). Aguas Subterráneas. Disponibilidad por Acuíferos. Recuperado el día 05 de marzo del 2024 en: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html
- CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías). (2022). PRONACE Agua en: <https://conahcyt.mx/pronaces/pronaces-agua/>
- Comisión Nacional del Agua. (2018). Atlas del agua en México.
- Cotterman, K. A., Kendall, A. D., Basso, B., & Hyndman, D. W. (2018). Groundwater depletion and climate change: future prospects of crop production in the Central High Plains Aquifer. *Climatic change*, 146, 187-200.
- Das, B., & Pal, S. C. (2019). Combination of GIS and fuzzy-AHP for delineating groundwater recharge potential zones in the critical Goghat-II block of West Bengal, India. *HydroResearch*, 2, 21-30.



- Das, S. (2021). Hydro-geomorphic characteristics of the Indian (Peninsular) catchments: Based on morphometric correlation with hydro-sedimentary data. *Advances in Space Research*, 67(8), 2382-2397.
- De Reu, J., Bourgeois, J., Bats, M., Zwertvaegher, A., Gelorini, V., De Smedt, P., ... & Crombé, P. (2013). Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. *Geomorphology*, 186, 39-49.
- Dévora Isiorda, G. E., & Cervantes Rendón, E. (2019). Problemáticas del agua y medidas sustentables en estados desérticos de México, caso Chihuahua.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (1998). ACUERDO por el que se determina el número, lugar y circunscripción territorial de las gerencias regionales de la Comisión Nacional del Agua. Recuperado el día 14 de noviembre del 2023 en:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php%3Fcodigo%3D4878553%26fecha%3D18/05/1998#gsc.tab=0
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2018). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican. Recuperado el día 28 de abril del 2023 en:
https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2020). Disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 Regiones Hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos. Recuperado el día 28 de febrero del 2023 en:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600849&fecha=21/09/2020#gsc.tab=0
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2020). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. Recuperado el día 25 de mayo del 2023 en:



https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600593&fecha=17/09/2020

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2023). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. Recuperado el día 03 de marzo del 2024 en:

https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5708074&fecha=09/11/2023

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2023). Disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 Regiones Hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos. Recuperado el día 05 de marzo del 2024 en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5712948&fecha=28/12/2023

Doke, A. B., Zolekar, R. B., Patel, H., & Das, S. (2021). Geospatial mapping of groundwater potential zones using multi-criteria decision-making AHP approach in a hardrock basaltic terrain in India. *Ecological Indicators*, 127, 107685.

Duran-Llacer, I., Munizaga, J., Arumí, J. L., Ruybal, C., Aguayo, M., Sáez-Carrillo, K., ... & Rojas, O. (2020). Lessons to be learned: Groundwater depletion in Chile's Ligua and Petorca watersheds through an Interdisciplinary approach. *Water*, 12(9), 2446.

Echogdali, F. Z., Boutaleb, S., Bendarma, A., Saidi, M. E., Aadraoui, M., Abioui, M., ... & Sajinkumar, K. S. (2022). Application of analytical hierarchy process and geophysical method for groundwater potential mapping in the Tata basin, Morocco. *Water*, 14(15), 2393.

El Jazouli, A., Barakat, A., & Khellouk, R. (2019). GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). *Geoenvironmental Disasters*, 6(1), 1-12.

Escalante, A. Y. R., & Rodríguez, M. S. S. SOLUCIONES MULTIDISCIPLINARIAS PARA EL DESARROLLO REGIONAL DEL NORESTE DE CHIHUAHUA.



- Esquivel, J. M., Morales, G. P., & Esteller, M. V. (2015). Groundwater monitoring network design using GIS and multicriteria analysis. *Water resources management*, 29, 3175-3194.
- FAO. (Food and Agriculture Organization). (1976). A framework for land Evaluation. Recuperado el día 02 de marzo del 2023 en: <https://www.fao.org/3/x5310e/x5310e00.htm#Contents>
- FAO. (Food and Agriculture Organization). (2001). LECTURE NOTES ON THE MAJOR SOILS OF THE WORLD en: <https://www.fao.org/3/Y1899E/y1899e00.htm#toc>
- Feng, W., Shum, C. K., Zhong, M., & Pan, Y. (2018). Groundwater storage changes in China from satellite gravity: An overview. *Remote Sensing*, 10(5), 674.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, R. E. (2014). Índices de Vulnerabilidad a la Sequía en la Cuenca del Río Bravo. México DF: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ghosh, D., Mandal, M., Banerjee, M., & Karmakar, M. (2020). Impact of hydro-geological environment on availability of groundwater using analytical hierarchy process (AHP) and geospatial techniques: A study from the upper Kangsabati river basin. *Groundwater for sustainable development*, 11, 100419.
- Giordano, M. (2009). Global groundwater? Issues and solutions. *Annual review of Environment and Resources*, 34, 153-178.
- Gobierno de México (2019). Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024.
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2022). Integra JCAS Comité Técnico de Aguas Subterráneas para el uso eficiente de las aguas subterráneas de Chihuahua en: <https://chihuahua.gob.mx/prensa/integra-jcas-comite-tecnico-de-aguas-subterraneas-para-el-uso-eficiente-de-las-aguas>
- Goepel, K.D. (2018). Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, Vol. 10 Issue 3 2018, pp 469-487,



- Gong, H., Pan, Y., & Xu, Y. (2012). Spatio-temporal variation of groundwater recharge in response to variability in precipitation, land use and soil in Yanqing Basin, Beijing, China. *Hydrogeology Journal*, 20(7), 1331.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27.
- Guasselli, L. A., Simioni, J. P. D., & Laurent, F. (2020). Mapeamento e classificação de áreas úmidas usando Topographic Wetness Index (TWI) a partir de modelos digitais de elevação, na bacia hidrográfica do Rio Gravataí: Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. Vol. 21, n. 3 (jul./set. 2020), p. 639-659.
- Harini, P., Sahadevan, D. K., Das, I. C., Manikyamba, C., Durgaprasad, M., & Nandan, M. J. (2018). Regional groundwater assessment of Krishna River basin using integrated GIS approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46, 1365-1377.
- Hernández-Juárez, R. A., Martínez Rivera, L. M., Peñuela-Arévalo, L. A., & Rivera-Reyes, S. (2020). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio. *Investigaciones geográficas*, (101).
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American geophysical union*, 13(1), 350-361.
- Hosseini, S. M., Parizi, E., Ataie-Ashtiani, B., & Simmons, C. T. (2019). Assessment of sustainable groundwater resources management using integrated environmental index: Case studies across Iran. *Science of the total environment*, 676, 792-810.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). (2013). Extractor rápido de información climatológica (ERIC).
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). (2019). Aguas Subterráneas en: <https://www.gob.mx/imta/articulos/aguas-subterraneas>
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (1993). Aspectos técnicos de las imágenes Landsat.



- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2003). Síntesis de Información geográfica del estado de Chihuahua.
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2013). Plataforma de Información Geoespacial en: <https://idegeo.centrogeo.org.mx/interactive/layers>
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2017). Diccionario de datos edafológicos, Escala 1:250 000 (versión 4).
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2023) Continuo de elevaciones mexicano (CEM) en: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2023). Geografía y Medio Ambiente en: <https://www.inegi.org.mx/temas/geologia/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2022). Sexto informe de evaluación del IPCC: Cambio Climático 2022 en: <https://www.unep.org/es/resources/informe/sexta-informe-de-evaluacion-del-ipcc-cambio-climatico-2022>
- Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J. D., & Ross, A. (2016). Integrated groundwater management (p. 762). Springer Nature.
- JCAS (Junta Central de Agua y Saneamiento). (2019). Plan Estatal Hídrico 2040 del Estado de Chihuahua. Recuperado el día 05 de marzo del 2023, de <https://www.jcas.gob.mx/peh2040/>
- Kulandaisamy, P., Karthikeyan, S., & Chockalingam, A. (2020). Use of GIS-AHP tools for potable groundwater potential zone investigations—a case study in Vairavanpatti rural area, Tamil Nadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-15.
- Madrigal-Solís, H., Echeverría-Sáenz, S., Pizarro-Mendez, Y., Alfaro-Chinchilla, C., Jiménez-Cavallini, S., Centeno-Morales, J., ... & Suárez-Serrano, A. (2020). What do we Think About Water? Public Perception of the Current Situation of Water Resources in Costa Rica: an Indicator of Water Understanding and Management. *Uniciencia*, 34(1), 152-188.



- Martínez Morales, M. (2017). Estrategia nacional de seguridad hídrica para el manejo de aguas transfronterizas México-EUA.
- Masoud, A. M., Pham, Q. B., Alezabawy, A. K., & El-Magd, S. A. A. (2022). Efficiency of geospatial technology and multi-criteria decision analysis for groundwater potential mapping in a Semi-Arid region. *Water*, 14(6), 882.
- Medrano, F. G. (2012). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Instituto Nacional de Ecología.
- Moiwo, J. P., & Tao, F. (2014). Evidence of land-use controlled water storage depletion in Hai River Basin, North China. *Water resources management*, 28, 4733-4746.
- Mokarram, M., Roshan, G., & Negahban, S. (2015). Landform classification using topography position index (case study: salt dome of Korsia-Darab plain, Iran). *Modeling Earth Systems and Environment*, 1, 1-7.
- Moodley, T., Seyam, M., Abunama, T., & Bux, F. (2022). Delineation of groundwater potential zones in KwaZulu-Natal, South Africa using remote sensing, GIS and AHP. *Journal of African Earth Sciences*, 193, 104571.
- Mukate, S., Wagh, V., Panaskar, D., Jacobs, J. A., & Sawant, A. (2019). Development of new integrated water quality index (IWQI) model to evaluate the drinking suitability of water. *Ecological indicators*, 101, 348-354.
- Nair, H. C., Padmalal, D., Joseph, A., & Vinod, P. G. (2017). Delineation of groundwater potential zones in river basins using geospatial tools—an example from Southern Western Ghats, Kerala, India. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 1, 1-16.
- NASA. (2024). Data Power Access. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Noriega Quijada, G. G. (2017). Análisis de la desertificación y su relación con los niveles freáticos en el acuífero Valle del Río Yaqui, Sonora, México (Master's thesis, NORIEGA QUIJADA, GLENDA GUADALUPE).
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2023). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Cumbre sobre los ODS de 2023 de las Naciones Unidas en:



<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2023/05/un-2023-sdg-summit/>

- Prieto-Amparán, J. A., Pinedo-Alvarez, A., Morales-Nieto, C. R., Valles-Aragón, M. C., Álvarez-Holguín, A., & Villarreal-Guerrero, F. (2021). A regional GIS-assisted multi-criteria evaluation of site-suitability for the development of solar farms. *Land*, 10(2), 217.
- Priya, U., Iqbal, M. A., Salam, M. A., Nur-E-Alam, M., Uddin, M. F., Islam, A. R. M. T., ... & Rak, A. E. (2022). Sustainable groundwater potential zoning with integrating GIS, remote sensing, and AHP model: a case from North-Central Bangladesh. *Sustainability*, 14(9), 5640.
- Reyes-Gómez, V. M., Díaz, S. C., Brito-Castillo, L., & Núñez-López, D. (2013). ENSO drought effects and their impact in the ecology and economy of the state of Chihuahua, Mexico. *WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering*, 64.
- Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W., & Lo, M. H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557(7707), 651-659.
- Rodríguez-Urrego, D., Rodríguez-Urrego, L., González-Díaz, B., & Guerrero-Lemus, R. (2022). Sustainability Analysis and Scenarios in Groundwater Pumping Systems: A Case Study for Tenerife Island to 2030. *Energies*, 15(15), 5635.
- Rzedowski, J., 2006. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process (AHP). *The Journal of the Operational Research Society*, 41(11), 1073-1076.
- Sánchez-Lozano, J. M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P. L., & García-Cascales, M. S. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and sustainable energy reviews*, 24, 544-556.



- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2015). Atlas Digital Geográfico. Recuperado el día 07 de febrero del 2023 en: <http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/agua.html>
- Singha, S. S., Pasupuleti, S., Singha, S., Singh, R., & Venkatesh, A. S. (2021). Analytic network process-based approach for delineation of groundwater potential zones in Korba district, Central India using remote sensing and GIS. *Geocarto International*, 36(13), 1489-1511.
- SGM. (Servicio Geológico Mexicano). (2000). Carta Geológica de Litología esc. 1:250,000 disponible en: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#>
- Sha, K., Srinivasa, A., & Madhu, D. (2020). The study on variability of NDVI over Kerala using satellite observations. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2287, No. 1). AIP Publishing.
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., Mansor, S., & Ahmad, N. (2015). Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena*, 125, 91-101.
- Trabelsi, N., Hentati, I., Triki, I., Zairi, M., & Banton, O. (2022). A GIS-Agriflux modeling and AHP techniques for groundwater potential zones mapping. *Journal of Geographic Information System*, 14(2), 113-133.
- Uc Castillo, J. L., Martínez Cruz, D. A., Ramos Leal, J. A., Tuxpan Vargas, J., Rodríguez Tapia, S. A., & Marín Celestino, A. E. (2022). Delineation of groundwater potential zones (GWPZs) in a semi-arid basin through remote sensing, GIS, and AHP approaches. *Water*, 14(13), 2138.
- Verma, P., Singh, P., & Srivastava, S. K. (2020). Development of spatial decision-making for groundwater recharge suitability assessment by considering geoinformatics and field data. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-18.
- Villa Hoyos, J. F. (2020). Reúso de las aguas residuales como alternativa al estrés hídrico en Colombia.
- Voisin, O., & Orona, I. (1993). Agricultura de Temporal. Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica, (36), 273-285.



- Walker, B. B., Schuurman, N., Swanlund, D., & Clague, J. J. (2021). GIS-based multicriteria evaluation for earthquake response: a case study of expert opinion in Vancouver, Canada. *Natural Hazards*, 105, 2075-2091.
- Werner, A.D., Zhang, Q., Xue, L., Smerdon, B., Li, X., Zhu, X., Yu, L., and Li, L. (2013). An Initial Inventory and Indexation of Groundwater Mega-Depletion Cases. *Water Resour Manage* 27, 507–533
- WRI México. (2019). Actualizan Aqueduct e identifican los principales países con estrés hídrico. Recuperado el día 16 de febrero del 2023 en: <https://wrimexico.org/news/bolet%C3%ADn-de-prensa-actualizan-aqueduct-e-identifican-los-principales-pa%C3%ADses-con-estr%C3%A9s-h%C3%ADrico>
- Yariyan, P., Avand, M., Omidvar, E., Pham, Q. B., Linh, N. T. T., & Tiefenbacher, J. P. (2022). Optimization of statistical and machine learning hybrid models for groundwater potential mapping. *Geocarto International*, 37(13), 3877-3911.
- Zende, A.M., Nagarajan, R. and Atal, K.R. (2012) Assessment of Groundwater Potential Zones by Using GIS Techniques in Yerala River Basin, Western Maharashtra, India. *Journal of Advance Civil Engineering*, 2, 9-17.
- Zheng, K., Wei, J.-Z., Pei, J.-Y., Cheng, H., Zhang, X.-L., Huang, F.-Q., Ye, J.-S. (2019). Impacts of climate change and human activities on grassland vegetation variation in the Chinese Loess Plateau. *Science of The Total Environment*, 2, 236-244.



ANEXOS

Anexo 1. Disponibilidad media anual de aguas subterráneas por acuífero (DOF, 2015, 2018, 2020 y 2023)

Clave	Acuífero	Año			
		2015	2018	2020	2023
0801	Ascensión	-107.004752	-107.283944	-109.05673	-104.204731
0802	Alta Babícora	17.290389	9.861635	-0.4665	8.885923
0803	Baja Babícora	-13.38861	-94.389801	-138.5232	-107.03213
0804	Buenaventura	-65.127887	-116.684714	-150.284566	-121.394067
0805	Cuauhtémoc	-197.039507	-11.505972	-7.64785	-7.750545
0806	Casas Grandes	-20.384803	-20.102283	-27.05484	-17.229987
0807	El Sauz-Encinillas	-27.925299	-54.653188	-58.65833	-58.14068
0808	Janos	-44.383662	-44.425161	-44.47852	-41.755087
0809	Laguna de Mexicanos	2.85527	-6.907104	-18.41274	-20.770298
0810	Samalayuca	-6.087802	-8.413001	-13.66323	-7.848608
0811	Las Palmas	2.4295	2.4295	-0.61191	0.064721
0812	Palomas-Guadalupe Victoria	-2.802073	-2.962073	-3.3961	-4.835035
0813	Laguna Tres Castillos	17.702178	-28.427866	-64.28422	-35.239827
0814	Laguna de Tarabillas	32.385125	-209.016531	-287.1029	-263.362262
0815	Laguna E l Diablo	0.017635	0.002123	-0.001027	-0.05633
0816	Aldama-El Cuervo	16.703121	16.443121	0.74763	-0.206879
0817	Laguna de Patos	0.235544	-26.149574	-96.89285	-53.918933
0818	Laguna de Santa María	38.197733	-266.083392	-419.8383	-319.492601
0819	Laguna La Vieja	24.847292	-166.291751	-217.0367	-196.171314
0820	Ignacio Zaragoza	72.479331	71.486865	67.21585	70.214055
0821	Flores Magón-Villa Ahumada	-110.384547	-116.319714	-118.62609	-113.80544
0822	Santa Clara	-12.411483	-12.832017	-16.49273	-28.536345
0823	Conejos-Médanos	12.99435	-82.017728	-102.0746	-90.422817
0824	Laguna de Hormigas	8.736943	-205.386264	-268.9559	-222.318672
0825	El Sabinal	0.7	18.571448	-20.61068	-28.353186
0826	Los Lamentos	9.595856	9.584687	-0.23131	11.577687
0827	El Cuarenta	1.916875	-2.98652	-9.06423	-5.861231
0828	Los Moscos	-0.760738	-0.760738	-0.7667	-6.526843
0829	Josefa Ortiz de Domínguez	1.93075	1.93075	0.20675	0.166307



Anexo 2

Anexo 2.1. Reclasificación de la litología / geología en la escala de Saaty (1980)

Roca	Característica	Aptitud
Aluvial (suelo)	Sedimentos altamente permeables	5
Andesita	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Andesita-Basalto	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Andesita-Toba andesítica	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Arenisca-Caliza	Roca sedimentaria semipermeable	4
Arenisca-Conglomerado poligénico	Roca sedimentaria poco permeable	3
Arenisca-Limolita	Roca sedimentaria altamente permeable	5
Arenisca-Lutita	Roca sedimentaria altamente permeable	5
Basalto	Roca ígnea semipermeable	3
Basalto-Andesita	Roca ígnea semipermeable	3
Brecha volcánica andesítica	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Brecha volcánica riolítica	Roca ígnea distribuida cerca de fallas y fracturas	2
Caliza	Roca sedimentaria semipermeable	4
Caliza-Arenisca	Roca sedimentaria semipermeable	4
Caliza-Dolomía	Roca sedimentaria semipermeable	4
Caliza-Lutita	Roca sedimentaria semipermeable	4
Caliza-Yeso	Roca sedimentaria semipermeable	4
Coluvial (sedimento)	Sedimentos altamente permeables	5
Conglomerado monogénico	Sedimentos cerca de fallas y fracturas	5
Conglomerado poligénico	Sedimentos cerca de fallas y fracturas pero cerca de las sierras	4
Conglomerado poligénico-Arenisca	Sedimentos lejos de fallas y fracturas	3
Cuarzomonzonita	Roca ígnea intrusiva poco permeable	1
Dacita	Roca ígnea intrusiva poco permeable	1
Diorita	Roca ígnea intrusiva poco permeable	1
Dolomía-Arenisca	Roca sedimentaria altamente permeable	5
Dolomía-Lutita	Roca sedimentaria altamente permeable	5
Eólico (sedimentos)	Roca sedimentaria altamente permeable	5
Gneis	Roca metamórfica poco permeable	1
Granito	Roca ígnea intrusiva poco permeable	1
Granito-Granodiorita	Roca ígnea intrusiva poco permeable	1
Granodiorita	Roca ígnea intrusiva poco permeable	1
Hornfels-Skarn	Roca metamórfica poco permeable	1
Ignimbrita-Toba riolítica	Roca ígnea cerca de fallas y fracturas	3
Lacustre (sedimentos arcillosos)	Sedimentos altamente permeables	5
Latita	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1



Continuación de Anexo 2.1.

Limolita-Conglomerado poligénico	Sedimentos altamente permeables	5
Lutita-Arenisca	Sedimentos altamente permeables	5
Lutita-Caliza	Sedimentos altamente permeables	5
Monzonita	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Pórfido andesítico	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Pórfido dacítico	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Pórfido granítico	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Pórfido monzonítico	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Pórfido riolítico	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Pórfido traquítico	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Riodacita	Roca ígnea semipermeable	3
Riolita	Roca ígnea semipermeable	3
Riolita-Riodacita	Roca ígnea semipermeable	3
Riolita-Toba riolítica	Roca ígnea semipermeable	3
Sienita	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Skarn-Hornfels	Roca metamórfica poco permeable	1
Toba andesítica	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Toba riolítica	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Toba riolítica-Ignimbrita	Roca ígnea con alta densidad de fallas y fracturas	5
Toba riolítica-Riolita	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Tonalita	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1
Traquita	Roca ígnea distribuida lejos de fallas y fracturas	1



Anexo 2.2. Reclasificación de los suelos en la escala de Saaty (1980)

Suelos	Características	Aptitud
Arenosol	Suelos de textura gruesa, rico en arenas, altamente permeable	5
Calcisol	Suelos con poca capacidad de retener humedad, con suficiente percolación en épocas de lluvia	3
Cambisol	Suelos altamente porosos con buena capacidad de retener humedad y buen drenaje interno.	5
Chernozem	Suelos altamente porosos que favorecen una profunda percolación	5
Durisol	Suelos que suelen obstruir el movimiento vertical del agua	1
Fluvisol	Suelos influenciados por el agua ubicados en planicies de inundación	4
Gypsisol	Suelos que no permiten la infiltración del agua superficial cuando están encostrados, de lo contrario, tienen una alta percolación	3
Gleysol	Suelos localizados en zonas cóncavas que propician la infiltración	5
Kastañozem	Suelos con baja porosidad que propician el escurrimiento	1
Leptosol	Suelos delgados con baja capacidad de retención	3
Luvisol	Suelos con buen drenaje interno, susceptibles al interperismo	4
Phaeozem	Suelos medianamente porosos que propician la retención del agua	3
Planosol	Suelos deficientes poco permeables	2
Regosol	Suelos con baja capacidad de retención y alta permeabilidad de agua, sin embargo, son susceptibles a la compactación	3
Solonchak	Suelos arcillosos con baja permeabilidad	2
Solonetz	Suelos arcillosos con baja permeabilidad	2
Umbrisol	Suelos que dependiendo su ubicación varían sus características hidrológicas, pueden llegar a ser permeables en planicies e impermeables en sierras	3
Vertisol	Suelos que retienen la humedad y se inundan rápidamente, pero tienen un bajo índice de infiltración,	4



Anexo 2.3. Reclasificación de los Usos de suelo y Vegetación en la escala de Saaty (1980)

Uso de Suelo y Vegetación	Características	Aptitud
Agricultura de humedad anual	Si hay recarga pero no es significativa	2
Agricultura de riego anual	Si hay recarga pero no es significativa	2
Agricultura de riego anual y permanente	Si hay recarga pero no es significativa	2
Agricultura de riego anual y semipermanente	Si hay recarga pero no es significativa	2
Agricultura de riego permanente	Si hay recarga pero no es significativa	2
Agricultura de riego semipermanente	Si hay recarga pero no es significativa	2
Agricultura de riego semipermanente y permanente	Si hay recarga pero no es significativa	2
Agricultura de temporal anual	Si hay recarga pero no es significativa	2
Agricultura de temporal anual y permanente	Si hay recarga pero no es significativa	2
Asentamientos humanos	Generalmente el suelo esta compactado	1
Bosque de encino	Vegetación densa que propicia la retención de humedad	5
Bosque de encino-pino	Vegetación densa que propicia la retención de humedad	5
Bosque de galería	Vegetación densa que propicia la retención de humedad	5
Bosque de mezquite	Vegetación poco densa que propicia la recarga	4
Bosque de pino	Vegetación densa que propicia la retención de humedad	5
Bosque de pino-encino	Vegetación densa que propicia la retención de humedad	5
Bosque de táscate	Vegetación poco densa que propicia la recarga	4
Chaparral	Vegetación poco densa que propicia la recarga	3
Cuerpo de agua	Recarga permanente	5
Desprovisto de vegetación	Evapotranspiración inmediata	1
Matorral desértico micrófilo	Vegetación poco densa característico de climas secos	2
Matorral desértico rosetófilo	Vegetación poco densa característico de climas secos	2
Mezquital xerófilo	Vegetación poco densa característico de climas secos	2
Pastizal halófilo	Vegetación densa que propicia la retención de humedad	4
Pastizal inducido	Vegetación densa que propicia la retención de humedad	4
Pastizal natural	Vegetación densa que propicia la retención de humedad	4



Continuación de Anexo 2.3.

Sin vegetación aparente	Evapotranspiración inmediata	1
Tular	Recarga permanente	5
Vegetación de desiertos arenosos	Vegetación poco densa característico de climas secos	1
Vegetación de galería	Vegetación poco densa que propicia la recarga	4
Vegetación halófila xerófila	Vegetación poco densa característico de climas secos	3
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	Vegetación poco densa que propicia la recarga	5
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino	Vegetación poco densa que propicia la recarga	5
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	Vegetación poco densa que propicia la recarga	5
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	Vegetación poco densa que propicia la recarga	5
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	Vegetación poco densa que propicia la recarga	5
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de mezquite	Vegetación poco densa que propicia la recarga	4
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	Vegetación poco densa que propicia la recarga	5
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	Vegetación poco densa que propicia la recarga	5
Vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico micrófilo	Vegetación poco densa característico de climas secos	2
Vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico rosetófilo	Vegetación poco densa característico de climas secos	2
Vegetación secundaria arbustiva de mezquital xerófilo	Vegetación poco densa característico de climas secos	2
Vegetación secundaria arbustiva de pastizal halófilo	Vegetación poco densa característico de climas secos	4
Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	Vegetación densa que propicia la retención de humedad	4
Vegetación secundaria arbustiva de vegetación halófila xerófila	Vegetación poco densa característico de climas secos	3



Anexo 3

Anexo 3.1. Pesos asignados por los expertos en materia del agua a los Factores Topográficos

Expertos en materia de agua	Factores Topográficos				
	Pendiente	Altitud / Elevación	TPI	Geomorfología	Curvatura
Resultados de grupo	10.16%	6.52%	4.60%	4.98%	6.88%
Experto "1"	3.80%	3.00%	2.90%	4.20%	2.50%
Experto "2"	2.40%	2.90%	2.20%	5.80%	1.30%
Experto "3"	15.00%	22.60%	2.00%	1.50%	1.50%
Experto "4"	16.90%	7.50%	7.10%	6.90%	4.10%
Experto "5"	5.30%	5.30%	5.30%	3.10%	12.60%
Experto "6"	12.70%	1.90%	4.00%	13.20%	6.70%
Experto "7"	2.80%	1.30%	3.00%	4.30%	7.80%
Experto "8"	7.50%	10.50%	4.20%	4.00%	3.90%
Experto "9"	19.40%	8.40%	3.10%	3.30%	18.70%
Experto "10"	3.80%	8.00%	2.20%	8.90%	12.80%
Experto "11"	13.60%	3.40%	12.90%	1.40%	3.40%
Experto "12"	17.90%	3.00%	2.10%	5.60%	5.60%
Experto "13"	18.50%	17.50%	5.20%	2.30%	2.60%
Experto "14"	10.00%	2.90%	4.60%	1.80%	14.80%
Experto "15"	1.10%	1.90%	0.30%	8.30%	3.20%
Experto "16"	5.20%	5.20%	5.20%	2.90%	21.00%
Experto "17"	5.60%	5.60%	5.60%	8.70%	2.20%
Experto "18"	11.20%	11.20%	11.20%	1.20%	2.80%
Experto "19"	29.50%	6.40%	2.20%	13.10%	7.30%
Experto "20"	6.20%	5.70%	6.30%	2.70%	4.30%
Experto "21"	4.90%	2.80%	4.90%	1.30%	5.40%



Anexo 3.2. Pesos asignados por los expertos en materia del agua a los Factores Biofísicos o Ambientales

Factores Biofísicos o Ambientales						
Expertos en materia de agua	Litología / Geología	TWI	Suelos	Uso de suelos y vegetación	Precipitación	Temperatura de la superficie terrestre
Resultados de grupo	7.17%	9.02%	7.90%	15.12%	5.27%	1.67%
Experto "1"	4.40%	3.50%	6.20%	5.10%	20.90%	6.50%
Experto "2"	6.80%	6.30%	1.90%	6.80%	14.60%	1.30%
Experto "3"	34.20%	2.00%	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%
Experto "4"	19.80%	6.80%	5.30%	4.10%	4.40%	1.40%
Experto "5"	5.30%	5.30%	22.00%	5.90%	3.50%	1.60%
Experto "6"	2.20%	7.20%	16.80%	16.50%	6.40%	0.70%
Experto "7"	6.30%	5.20%	5.40%	36.70%	6.80%	0.90%
Experto "8"	7.50%	10.30%	7.60%	20.30%	2.60%	1.40%
Experto "9"	6.10%	8.40%	8.40%	11.30%	2.00%	0.30%
Experto "10"	6.80%	4.00%	11.20%	11.70%	7.80%	3.10%
Experto "11"	5.30%	28.50%	2.90%	12.50%	1.40%	0.90%
Experto "12"	8.70%	1.70%	5.60%	5.60%	5.60%	6.70%
Experto "13"	3.40%	20.90%	6.90%	10.70%	1.70%	0.40%
Experto "14"	1.60%	8.80%	10.30%	21.50%	13.90%	0.20%
Experto "15"	1.60%	2.50%	6.20%	34.80%	2.50%	0.90%
Experto "16"	5.20%	5.20%	12.00%	21.50%	2.20%	2.10%
Experto "17"	5.60%	5.60%	2.30%	38.70%	2.30%	1.40%
Experto "18"	11.20%	11.20%	5.10%	16.70%	2.30%	2.40%
Experto "19"	5.30%	3.70%	4.40%	3.20%	1.50%	0.30%
Experto "20"	2.10%	25.10%	11.20%	9.60%	5.50%	0.40%
Experto "21"	1.20%	17.30%	12.80%	22.90%	1.20%	0.70%



Anexo 3.3. Pesos asignados por los expertos en materia del agua a los Factores de Distancia o Proximidad

Expertos en materia de agua	Factores de Distancia o Proximidad				
	Fallas y fracturas	Densidad de drenaje	Distancia a ríos	Distancia cuerpos de agua	Distancia a carreteras
Resultados de grupo	7.37%	4.23%	3.22%	3.19%	2.74%
Experto "1"	12.40%	15.10%	4.10%	3.20%	2.30%
Experto "2"	2.80%	14.60%	14.60%	14.60%	1.40%
Experto "3"	8.70%	1.50%	1.50%	1.50%	1.50%
Experto "4"	5.50%	2.60%	2.80%	2.50%	2.30%
Experto "5"	18.80%	1.60%	1.60%	1.60%	1.60%
Experto "6"	3.00%	0.80%	2.00%	2.90%	2.90%
Experto "7"	7.70%	5.80%	4.10%	0.70%	1.20%
Experto "8"	1.70%	3.60%	6.00%	4.20%	4.80%
Experto "9"	1.80%	5.20%	1.50%	0.90%	1.10%
Experto "10"	7.00%	3.10%	3.10%	3.10%	3.10%
Experto "11"	4.30%	4.30%	2.70%	1.40%	1.10%
Experto "12"	5.60%	6.70%	6.70%	6.70%	6.70%
Experto "13"	0.80%	1.20%	2.70%	3.30%	1.90%
Experto "14"	2.70%	4.10%	0.90%	1.00%	1.00%
Experto "15"	17.70%	1.20%	2.10%	5.70%	10.20%
Experto "16"	4.10%	2.10%	2.10%	2.10%	2.10%
Experto "17"	10.70%	1.40%	1.40%	1.40%	1.40%
Experto "18"	3.90%	2.40%	2.40%	2.40%	2.40%
Experto "19"	17.60%	3.40%	1.50%	0.30%	0.30%
Experto "20"	12.20%	2.60%	2.60%	1.40%	2.10%
Experto "21"	5.80%	5.50%	1.20%	6.00%	6.20%



Anexo 3.4. Valores de CR obtenidos en la comparación de variables por los expertos en materia del agua

Expertos en materia de agua	CR
Resultados de grupo	9.02%
Experto "1"	8.60%
Experto "2"	9.70%
Experto "3"	9.70%
Experto "4"	9.60%
Experto "5"	8.90%
Experto "6"	9.90%
Experto "7"	9.80%
Experto "8"	9.40%
Experto "9"	8.60%
Experto "10"	8.90%
Experto "11"	7.20%
Experto "12"	9.50%
Experto "13"	9.00%
Experto "14"	7.90%
Experto "15"	7.00%
Experto "16"	13.70%
Experto "17"	8.50%
Experto "18"	9.80%
Experto "19"	9.50%
Experto "20"	4.60%
Experto "21"	9.60%