



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE INGENIERÍA
COLEGIO DE GEOFÍSICA

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA A TRAVÉS DE LA
METODOLOGÍA DRASTIC EN UNA CUENCA SEDIMENTARIA DE LA MIXTECA
BAJA, PUEBLA**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADA EN INGENIERÍA GEOFISICA**

PRESENTA:

KARLA GARCÍA HUERTA

DIRECTOR INTERNO:

DR. VÍCTOR MANUEL VÁZQUEZ BÁEZ

ASESOR EXTERNO:

DRA. ANA BEATRIZ RUBIO ARELLANO

PUEBLA, MÉXICO

Noviembre 2025



BUAP

No. de Oficio SAC/0632/2025

**C. Karla García Huerta -201840540-
Pasante de Licenciatura en Ingeniería
Geofísica
Presente.**

En atención a la Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de esta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

“EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ACUÍFERA A TRAVÉS DE LA METODOLOGÍA DRASTIC EN UNA CUENCA SEDIMENTARIA DE LA MIXTECA BAJA, PUEBLA”.

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como director de tema al Dr. Víctor Manuel Vázquez Báez.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Z. a 04 de abril de 2025

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director**



**M'ACGZ/barv
C.c.p. Archivo**

Facultad
de Ingeniería

Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por estar siempre conmigo y por ser mi motivación en la vida; a mi mamá Estela por su amor incondicional y por brindarme palabras de aliento en los momentos que perdía las esperanzas; a mi papá Miguel Ángel por su esfuerzo para que pudiera salir adelante y la confianza que me brindo; y a mi hermana Abigail, por su cariño, alegría y por ser mi soporte en cada momento de mi vida y sé que siempre estará para apoyarme en el camino que elija.

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, en especial al Dr. José Alfredo Ramos Leal por sus aportaciones, tiempo y apoyo durante el desarrollo de este trabajo, a M.C. Berenice Gómez Mena por sus consejos y enseñanzas, a mi asesora externa, Dra. Ana Beatriz Rubio Arellano, por brindarme su apoyo incondicional, paciencia y dedicación a lo largo de todo este tiempo, además de los consejos recibidos para mi crecimiento personal y profesionalmente.

A mi asesor interno, el Dr. Víctor Manuel Vázquez Báez, por su aceptación para trabajar en conjunto, acompañamiento y apoyo en este proceso.

A mis maestros de licenciatura, quienes con sus conocimientos, enseñanzas y ejemplos contribuyeron a mi formación académica y personal.

De igual manera extendiendo agradecimientos a los miembros del comité evaluador, el M.C. José Serrano Ortiz y M.I. José Luis González Guevara, por su orientación, tiempo y valiosas observaciones para enriquecer el presente trabajo.

Finalmente, a todas aquellas personas que, aunque no menciono de manera directa, formaron parte de este trabajo; así como de mi formación tanto académica como personal, con sus consejos y palabras de apoyo, a cada uno de ustedes les agradezco profundamente.

Índice

1. Generalidades	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Planteamiento del problema	3
1.4. Justificación	4
1.5. Objetivos	4
1.5.1. Objetivo general	4
1.5.2. Objetivos específicos	4
1.6. Hipótesis	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Índices de vulnerabilidad acuífera	6
2.1.1. Métodos de evaluación de la vulnerabilidad acuífera	6
2.1.2. Calidad del agua	7
2.1.3. Contaminación del agua	7
2.2. Método Transitorio Electromagnético	8
2.2.1. Soluciones generales	9
2.2.2. Arreglo geométrico	13
2.2.3. Fuentes de error y ruido en los sondeos TEM	14
2.2.4. Inversión 1D	15
2.3. Hidrogeoquímica	16
2.3.1. Evolución química natural del agua subterránea	16
3. Área de estudio	18
3.1. Localización	18
3.2. Fisiografía	19
3.3. Clima	19
3.4. Edafología	20
3.5. Hidrografía	20
3.6. Geología	21
4. Metodología	29
4.1. Índices de evaluación de vulnerabilidad acuífera, calidad y contaminación del agua	29
4.1.1. Vulnerabilidad acuífera (DRASTIC)	29
4.1.1.1. Profundidad del nivel estático	30
4.1.1.2. Recarga Neta	30
4.1.1.3. Medio acuífero	34
4.1.1.4. Tipo de suelo y vegetación	34

4.1.1.5.	Gradiente topográfico	35
4.1.1.6.	Impacto a la zona vadosa	36
4.1.1.7.	Conductividad hidráulica	37
4.1.2.	Índice de calidad de agua (ICA)	37
4.1.3.	Índice de contaminación (ICON)	39
4.2.	Modelo geológico-geofísico	40
4.2.1.	Método Transitorio Electromagnético	40
4.2.2.	Marco hidrogeológico	44
5.	Resultados y discusión	45
5.1.	Sección geológica-geofísica	45
5.2.	Índice de evaluación de vulnerabilidad acuífera	51
5.3.	Índice de Calidad de agua (ICA)	61
5.4.	Índice de contaminación (ICON)	63
6.	Conclusiones	64
7.	Recomendaciones	65
	Referencias bibliográficas	67
	Anexos	75

Índice de tablas

Tabla 1. Ponderaciones asignadas a los parámetros DRASTIC de acuerdo a Aller et al. (1987).	29
Tabla 2. Rangos y ponderación del parámetro D (Aller et al., 1987; modificada por Ramos Leal, 2002).	30
Tabla 3. Coeficientes de escurrimiento de acuerdo a la textura, uso de suelo y pendiente (Schwab, 1990).....	33
Tabla 4. Rangos y ponderación del parámetro R (Aller et al., 1987).	33
Tabla 5. Material geológico y ponderación del parámetro A (Aller et al., 1987).....	34
Tabla 6. Tipo de uso de suelo y vegetación de la CMB con su ponderación del parámetro S modificada.	35
Tabla 7. Rangos y ponderación del parámetro T (Aller et al., 1987).	36
Tabla 8. Tipos de material geológico y su ponderación para el parámetro I modificada.	36
Tabla 9. Características del material litológico y su ponderación del parámetro C modificada....	37
Tabla 10. Clasificación de la constante k de acuerdo a las características físicas del agua (Conesa, 1993).	38
Tabla 11. Valores porcentuales de cada parámetro asignado para ICA (Martínez de Bascaran, 1979).	38
Tabla 12. Clasificación del índice de calidad del agua ICA (Dinius, 1987).	38
Tabla 13. Clasificación del agua establecido en el índice de contaminación ICON.	39
Tabla 14. Unidades geoelectricas y rangos de resistividad.	45
Tabla 15. Resultados de precipitación de las estaciones meteorológicas (1980-2022) mediante los polígonos de Thiessen y Evapotranspiración real en la CMB.	76

Índice de figuras

Figura 1. Modificación de Diagrama de flujo de la evolución química de aguas subterráneas de Tóth (1999).	17
Figura 2. Localización de la Cuenca Mixteca Baja.	18
Figura 3. Mapas temáticos de las características físicas de la CMB a) Fisiografía: Subprovincias fisiográficas y topoformas; b) Unidades climáticas; c) Tipos de suelo; d) Hidrografía.	21
Figura 4. Mapa geológico de la Cuenca Mixteca Baja (Ramos J, 1989; SGM, 1998; 2009; 2012; 2017; 2018a; 2018b; 2023).....	28

Figura 5. Distribución de los sondeos TEM en la zona de estudio.	40
Figura 6. Equipo Terratem, marca Alpha Geosciencie.	41
Figura 7. Ejemplo del TEM02 de la curva de decaimiento de voltaje y el ruido ambiental.	42
Figura 8. Ejemplo del modelo de capas y ajuste de curva suavizado del sondeo TEM02.....	43
Figura 9. Perfil geoelectrico 1.....	46
Figura 10. Perfil geoelectrico 2.....	47
Figura 11. Sección geológica-hidrológica del perfil 1.	49
Figura 12. Sección geológica-hidrológica del perfil 2.	51
Figura 13. Mapa de la distribución espacial del índice de vulnerabilidad para el parámetro D....	52
Figura 14. Mapa de distribución espacial del índice de vulnerabilidad para el parámetro R.	55
Figura 15. Mapa de distribución espacial del índice de vulnerabilidad del parámetro A.	56
Figura 16. Mapa de distribución espacial del índice de vulnerabilidad para el parámetro S.	57
Figura 17. Mapa de distribución espacial del índice de vulnerabilidad para el parámetro T.	58
Figura 18. Mapa de distribución espacial del índice de vulnerabilidad para el parámetro I.....	59
Figura 19. Mapa de distribución espacial del índice de vulnerabilidad para el parámetro C.	60
Figura 20. Mapa de la distribución espacial de vulnerabilidad DRASTIC normalizado.	61
Figura 21. Correlación entre el Índice de calidad ICA y DRASTIC normalizado.....	62
Figura 22. Correlación entre el índice de contaminación ICON y DRASTIC Normalizado.	63
Figura 23. a) Distribución de la precipitación media anual de la CMB por polígonos de Thiessen; b) Distribución de la Evapotranspiración real en la CMB.....	76
Figura 24. Mapas utilizados para la obtención del escurrimiento, a) Porcentaje de pendiente; b) Índice de Vegetación Normalizada (NDVI); c) Coeficiente de escurrimiento; d) Mapa de escurrimiento (mm/año).....	77
Figura 25. Recarga vertical (mm/año) de la CMB. Los colores rojo y naranja indican recarga baja a nula, mientras que verde y azul muestran valores altos.	78

1. Generalidades

1.1. Introducción

Durante los últimos años la creciente problemática de la contaminación del agua subterránea ha sido evidente y la demanda en su uso va cada vez en aumento por el desconocimiento y falta de planeación para su aprovechamiento, por lo que se hace énfasis en el desarrollo de investigaciones que busquen implementar soluciones para contrarrestar los problemas relacionados con la emisión de contaminantes debido al crecimiento de la población y de las actividades antropogénicas que se llevan a cabo (Freeze y Cherry, 1979; Samboni *et al.*, 2007).

El total de agua contenida en la Tierra es un 97.5% de agua salada y solo el 2.5% es agua dulce. De ese 2.5%, el 68.7% se encuentra en forma de hielo y nieve, por lo que no está disponible directamente, el 29.9% corresponde a aguas subterráneas y el 0.3% se distribuye en ríos, lagos y arroyos. Estas cifras hacen que surja el motivo de la necesidad de establecer gestiones de los recursos hídricos para su conservación, considerando a los sistemas de aguas subterráneas de suma importancia (Collazo y Montaña, 2012).

El desarrollo de esta investigación se centra en identificar las zonas vulnerables a presentar contaminación en la Cuenca Mixteca Baja (CMB) delimitada naturalmente por sus características en cuanto a topografía y descarga de agua que fluye hacia un mismo punto de salida, localizada entre los estados del sur de Puebla y noroeste de Oaxaca, así como a la evaluación de la calidad del agua, para conocer su estado y así generar un manejo adecuado y eficiente del recurso en el área.

El acceso y el suministro de agua en la región de la Mixteca baja es un tema importante que se ve afectado por las características naturales al ubicarse en una región semiárida, en donde las precipitaciones irregulares, las altas temperaturas y la topografía accidentada (Ocampo y Villarreal, 2014) provocan una disminución en la infiltración del agua en épocas de lluvia en el subsuelo y por lo tanto en la recarga del sistema de la cuenca, reduciendo su volumen en tiempos de sequía.

Para conocer el grado de vulnerabilidad existente se implementó la metodología DRASTIC, que integra diferentes parámetros en su evaluación para detectar zonas susceptibles a contaminantes superficiales (Aller *et al.*, 1987), además de la integración de la evaluación de los índices de calidad (ICA) y contaminación (ICON) con las

características físicas, químicas y biológicas del agua para identificar cambios en la calidad de ella, lo que permite la implementación de procesos de potabilización en zonas que lo requieran, asegurando que su consumo y suministro sean aceptables.

Por otro lado, el uso de la geofísica en temas hidrogeológicos ha sido de utilidad, ya que las prospecciones geofísicas permiten la detección de zonas favorables para la explotación de los recursos hídricos subterráneos (Kirsch R., 2006). La caracterización del subsuelo y sus propiedades hidráulicas son esenciales para una gestión adecuada de las aguas subterráneas y superficiales, pero en ocasiones es difícil obtener esta información por medios tradicionales, los cuales suelen ser destructivos para el ambiente o generar datos superficiales, por lo que la integración de técnicas geofísicas son de utilidad para inferir en la geometría de acuíferos, características transitorias del agua subterránea y condiciones hidrogeoquímicas de la calidad del agua en relación con la litología (Sendrós *et al.*, 2025; Christensen y Soren, 1998).

1.2. Antecedentes

En diversas zonas de México y otras partes del mundo que presenta características similares de clima semiárido, se han aplicado estudios de evaluación de la vulnerabilidad acuífera por medio de la metodología DRASTIC o por métodos distintos, al igual que la calidad de agua, con el fin de establecer medidas de gestión y protección del recurso. Algunos ejemplos de estudios desarrollados son en una zona de Oaxaca, en el acuífero del Valle de Etla, donde se evaluó la vulnerabilidad intrínseca del acuífero por SINTACS, integrando la Geofísica para determinar datos faltantes estimados en la metodología, así como para delimitar la geometría del acuífero y caracterizar la litología del área, con el fin de generar un ordenamiento en el uso de suelo y mejorar la administración del agua (Belmonte *et al.*, 2003); en Zacatecas, se evaluó la calidad del agua del acuífero Guadalupe Bañuelos, por medio de la interpretación hidrogeoquímica de muestras de agua, obteniendo resultados de la clasificación de los tipos de familia de agua y la dinámica del flujo subterráneo que influyen en las interpretaciones finales en cuanto a la interacción agua-roca que pueden ser origen de las características del agua con respecto al nivel de contaminación detectada (Padilla *et al.*, 2012); en San Luis Potosí,

en la zona Valle, se desarrolló un estudio con el fin de diagnosticar el estado del agua y la vulnerabilidad del sistema acuífero por DRASTIC, donde existe un crecimiento urbano y cambios del uso de suelo, identificando tres niveles del acuífero de distinta composición geológica, donde varía su calidad y vulnerabilidad, siendo el acuífero somero el más afectado con valores altos y los profundos con una calidad buena para su consumo y riesgo bajo a contaminantes (Almanza O., 2015).

Dichas evaluaciones aportan información valiosa para establecer un diagnóstico inicial en una zona donde existe escasez de estudios previos, lo cual resulta fundamental para impulsar una gestión sostenible del agua subterránea, considerada la principal fuente de suministro en la región.

Con respecto a la geología del área, al ser una zona de interés por su complejidad y origen en la parte sur de Puebla, existen diversos estudios que documentan los hallazgos de diversos autores en donde describen la secuencia en las que se depositaron las distintas formaciones, su ubicación, edades, composición y extensión de cada una (CENAPRED, 2009; CONAGUA, 2024; Hernández y Morales, 2002; Morales, 2014; Ramos-Leal, 1989; Sánchez- Zavala, 2008), sin embargo, dentro de la implementación geofísica no se tienen antecedentes previos que permitan tener información acerca de la distribución litológica en el subsuelo, para conocer los cambios de material y su espesor, al igual de sus propiedades físicas de porosidad y permeabilidad que sirven para identificar la zona saturada, así como la detección de posibles fallas o fracturas subterráneas que facilitan el movimiento del agua y de los contaminantes a través de las rocas, provocando el aumento de zonas propensas a una alta vulnerabilidad.

1.3. Planteamiento del problema

En la Mixteca Baja del estado de Puebla, la combinación de condiciones climáticas semiáridas y la ausencia de estudios previos generan un desconocimiento sobre la vulnerabilidad de los acuíferos y la calidad del agua subterránea. Esto impide evaluar adecuadamente la vulnerabilidad acuífera.

1.4. Justificación

El estudio de la vulnerabilidad acuífera y la calidad del agua en la Mixteca Baja es importante para la gestión del recurso hídrico y la salud pública. Aplicando DRASTIC y los índices ICA e ICON, se obtendrán datos esenciales para desarrollar estrategias efectivas de manejo del agua. En esta región caracterizada por la escasez de información climatológica e hidrológica. La evaluación de la potabilidad del agua permitirá identificar problemas de calidad de agua para consumo humano. Los resultados enriquecerán el conocimiento científico sobre cómo las condiciones geológicas y climáticas afectan la calidad del agua y la vulnerabilidad de los acuíferos, orientando futuras políticas y estrategias de gestión.

La información obtenida de esta investigación será fundamental para el desarrollo de estrategias de gestión y protección de los recursos hídricos en la Mixteca Baja de Puebla. Los resultados de este estudio podrán servir como base para futuras investigaciones y proyectos en otras regiones con características similares, contribuyendo así al conocimiento general sobre la hidrogeología de zonas semiáridas en México.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar la vulnerabilidad acuífera en una cuenca sedimentaria localizada en la Mixteca Baja, mediante la aplicación de la metodología DRASTIC, para un diagnóstico integral de la calidad y el riesgo de contaminación del agua subterránea de la Mixteca Baja.

1.5.2. Objetivos específicos

- Construir una sección hidrogeológica de la cuenca sedimentaria localizada en la Mixteca Baja mediante el análisis de datos obtenidos de Sondeos Electromagnéticos Transitorios para identificar y describir las características geológicas que afectan la calidad del agua subterránea.
- Evaluar el índice de la calidad del agua subterránea para consumo humano empleando los índices ICA e ICON, para determinar su potabilidad y asegurar que el suministro de agua sea seguro para los habitantes de la región.

- Obtener un mapa de la vulnerabilidad acuífera de la cuenca sedimentaria de la Mixteca Baja a través de DRASTIC para zonificar e identificar zonas propensas a sufrir contaminación.

1.6. Hipótesis

La vulnerabilidad acuífera en la cuenca sedimentaria de la Mixteca Baja, evaluada mediante la metodología DRASTIC, revelará zonas con diferentes niveles de riesgo de contaminación del agua subterránea, influenciadas por la litología de la región, la profundidad del agua y la recarga hídrica. Adicionalmente, el uso de los índices ICA e ICON permitirá determinar la calidad del agua para consumo humano, mientras que los datos obtenidos mediante TEM's proporcionarán una caracterización detallada del subsuelo, lo que permitirá una comprensión más completa de los factores geológicos que afectan la vulnerabilidad del acuífero en esta región semiárida.

2. Marco Teórico

2.1. Índices de vulnerabilidad acuífera

El concepto de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, fue introducido por el hidrogeólogo francés Margat en la década de los 60's y que inicialmente solo se relacionaba a aspectos cualitativos de contaminación, actualmente puede incluir aspectos cuantitativos de contaminación y calidad de agua subterránea (Ramos J., 2005).

La vulnerabilidad puede ser intrínseca o específica; la primera se refiere al riesgo potencial de contaminación del agua subterránea por contaminantes generados por actividades humanas y es independiente de la naturaleza del contaminante (Gogu y Dessargues, 2000). Y está determinada por las características físicas del acuífero, como la geología, hidrología, hidrogeología o geofísica (Douglas et al., 2018) y no depende de la naturaleza del contaminante (Gogu y Dessargues, 2000). Por otro lado, la específica se refiere a la evaluación de un sistema cuando se considera su capacidad de respuesta a uno o más contaminantes específicos y, por tanto, tiene en cuenta de manera explícita las características de los factores externos (Pedraza A., 2018; Martínez-Bastida *et al*, 2010).

2.1.1. Métodos de evaluación de la vulnerabilidad acuífera

Existen diversos métodos para la evaluación acuífera, los cuales consideran un número variable de parámetros en su aplicación. Estos parámetros pueden estar relacionados tanto con las características propias del acuífero como con las condiciones ambientales en las que se encuentra (Pedraza A., 2018).

Su clasificación depende generalmente en función del enfoque que se busca y nivel de detalle del impacto de la contaminación hacia el agua subterránea; además que la selección de uno en particular también está sujeta de la cantidad, calidad y disponibilidad de la información de los factores que se evalúan (Vargas-Quintero, 2010).

Autores como Patel *et al.* (2022), Vargas-Quintero (2010) y Belmonte *et al.* (2003) mencionan las categorías y clasificación de los métodos en los que se agrupan, siendo: a) métodos estadísticos; b) marco hidrológico; c) índices y estimadores agregados; d) los

basados en simulación, donde cada uno evalúa diferente vulnerabilidad acuífera, ya sea intrínseca o específica.

Los métodos de índice (también conocidos paramétricos) son adecuados para este caso de estudio que busca estimar la vulnerabilidad acuífera intrínseca de la CMB; los cuales combinan un conjunto de características físicas del suelo, la zona no saturada, litología, etc., a los que se les asigna una puntuación según su importancia en lo que respecta en la evaluación de la vulnerabilidad. Los más utilizados son SINTACS (Civita *et al.*, 1990), GOD (Foster, 1988), AVI (Van Stempvoort, 1992) y DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) (Vargas-Quintero, 2010; Auge M., 2004 y Patel *et al.*, 2022). Este último en particular es la metodología empleada en el desarrollo de esta investigación, por su flexibilidad y difusión en diferentes estudios a nivel mundial.

2.1.2. Calidad del agua

La calidad del agua, de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud y otros organismos internacionales, se puede resumir como las condiciones en que se encuentra el agua respecto a características físicas, químicas y biológicas, en su estado natural o después de ser alteradas por el accionar humano (BCN, 2016).

La calidad del agua, en general, se determina comparando las características físicas y químicas de una muestra de agua con unas directrices de calidad del agua o estándares. Este concepto ha sido asociado principalmente al uso del agua para consumo humano, sin embargo, dependiendo de otros usos también se puede definir la calidad del agua en función de ello (BCN, 2016).

Para su evaluación se hace uso del Índice de calidad ICA propuesto por Horton (1965) y Liebman (1969); para ello se analizan componentes fisicoquímicos de una muestra de agua asignándoles un peso de acuerdo a las concentraciones de cada parámetro en cuestión conforme a su importancia (SEMARNAT, 2013; Rubio *et al.*, 2014).

2.1.3. Contaminación del agua

Custodio y Llamas (1996) realizaron una sugerencia de definición y hacen una diferencia entre lo que es la polución y lo que es la contaminación. Polución se refiere al caso en el

que la composición o el estado de un curso de agua son directa o indirectamente modificados por actividades antropogénicas. En una medida que su uso se ve restringida para todos o para algunos de aquellos usos para los que podría servir en su estado natural.

El concepto de contaminación del agua apunta a su calidad bacteriológica dominándose contaminada, y también cuando su alteración es tal que no puede ser utilizada para su consumo, porque afectará la salud del hombre (Pedraza A., 2018).

Para cuantificar la contaminación del agua subterránea se utiliza el Índice de contaminación ICON; el cual en México se toma como base la NOM-127-SSA1-2021, que es una Norma Oficial que regula las características químicas, microbiológicas, físicas y radiactivas del agua potable, evaluando las concentraciones permisibles para determinar que el agua sea apta para su consumo (DOF, 2022; Ramos J., 2005).

2.2. Método Transitorio Electromagnético

El Sondeo Transitorio Electromagnético se lleva a cabo con una unidad receptora y otra unidad transmisora conectadas a una bobina receptora y a un bucle transmisor, respectivamente (Fitterman y Steward, 1986).

Esta técnica geofísica induce corriente eléctrica en la tierra mediante inducción electromagnética. Se crea un campo magnético variable (campo magnético primario) en el tiempo utilizando la bobina o el bucle que es por medio de un cable sobre la superficie de la tierra (French R., 2002). Al cortar la corriente de forma abrupta, el campo primario crea una corriente eléctrica secundaria en la tierra que se propaga a través del terreno y de los conductores cercanos, las cuales disminuyen con el tiempo, provocando un campo magnético decreciente en superficie conocido como campo magnético secundario (Yañez R., 2017). Este campo provoca un decaimiento del voltaje variable en el receptor, lo que proporciona información sobre la resistividad del suelo (Fitterman y Steward, 1986; Yañez R., 2017).

2.2.1. Soluciones generales

Ecuaciones de Maxwell

Los fenómenos electromagnéticos se basan en las ecuaciones de Maxwell. Un campo magnético se define mediante cuatro funciones vectoriales:

E Intensidad del campo eléctrico en [V/m],

B Inducción magnética en [Wb/m² o Tesla],

D Desplazamiento dieléctrico en [C/m²],

H Intensidad del campo magnético en [A/m].

La interacción entre los elementos se rige por las ecuaciones de Maxwell y estas se encuentran dentro del dominio del tiempo (Kirsch, 2006).

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times H + \frac{\partial D}{\partial t} = j \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

Donde ρ es la densidad de carga eléctrica [C/m³] y j la densidad de corriente en A/m² (Kirsh, 2006; Ward y Hohmann, 1988).

Estas ecuaciones se pueden simplificar utilizando las relaciones constitutivas, estas se obtienen de las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia, resultando:

$$D = \varepsilon(\omega, E, r, t, T, P) * E \quad (5)$$

$$B = \mu(\omega, H, r, t, T, P) * H \quad (6)$$

$$J = \sigma(\omega, E, r, t, T, P) * E \quad (7)$$

Donde los tensores:

ε Permitividad dieléctrica [F/m]

μ Permeabilidad magnética [H/m]

σ Conductividad eléctrica [S/m]

Dependen de los factores como la frecuencia angular ω , fuerza del campo eléctrico E o inducción magnética B , posición r , tiempo t , temperatura T y presión P (Ward y Hohmann, 1988).

Nabighian y Macnae (1991) consideran que en la mayoría de análisis geofísicos es necesario asumir que todos los medios son lineales, isotrópicos, homogéneos y que poseen propiedades eléctricas que son independientes del tiempo, temperatura y presión (Cabrera Y., 2023).

Al aplicar la transformada de Fourier a las ecuaciones 1 y 2 que corresponden a la Ley de Faraday y Ampere respectivamente, se obtienen las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia con las relaciones constitutivas descritas anteriormente (Ward y Hohmann, 1988):

$$\nabla \times E + \hat{z}H = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \times H + \hat{y}H = 0 \quad (9)$$

Introduciendo la impedancia como $\hat{z} = i\mu\omega$ y admitancia $\hat{y} = \sigma + i\varepsilon\omega$.

Ecuación de onda

Aplicando el rotacional a las ecuaciones 1 y 2 se obtiene (Ward y Hohmann, 1988):

$$\nabla \times (\nabla \times E) + \nabla \times \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right) = 0 \quad (10)$$

$$\nabla \times (\nabla \times H) - \nabla \times \left(\frac{\partial D}{\partial t} \right) = \nabla \times j \quad (11)$$

Considerando las siguientes relaciones constitutivas en el dominio del tiempo en un medio no dispersivo:

$$D = \varepsilon E \quad (12)$$

$$B = H\mu \quad (13)$$

$$j = E\sigma \quad (14)$$

Las ecuaciones de onda para los campos eléctricos y magnéticos en el dominio del tiempo son:

$$\nabla^2 E - \mu\epsilon \left(\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) - \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (15)$$

$$\nabla^2 H - \mu\epsilon \left(\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \right) - \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

Para obtener las siguientes ecuaciones de onda en dominio de la frecuencia se aplica la transformada de Fourier:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (17)$$

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0 \quad (18)$$

Donde el número de onda k se define como $k^2 = \mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega$, para esto se considera que $\mu\epsilon\omega^2 \ll \mu\sigma\omega$ para materiales terrestres a frecuencias menores de 10 Hz; por lo cual las corrientes de desplazamiento son menores que las corrientes de conducción. Considerando lo anterior, las ecuaciones 15 y 16 se reducen a (Ward y Hohmann, 1988):

$$\nabla^2 E - \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

$$\nabla^2 H - \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (20)$$

En el dominio de la frecuencia sería:

$$\nabla^2 E - i\mu\sigma\omega E = 0 \quad (21)$$

$$\nabla^2 H - i\mu\sigma\omega H = 0 \quad (22)$$

Las ecuaciones 19 a 22 representan ecuaciones de difusión, las cuales se aplican a materiales terrestres reales y conducen a la falta de resolución de los métodos en la prospección electromagnética. Su expresión 1D son:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - i\mu\sigma\omega E = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - i\mu\sigma\omega H = 0 \quad (26)$$

Solución a la ecuación de onda

Las ecuaciones 23 a 26 son diferenciales de segundo orden, las cuales tienen dos soluciones de interés, pero solo se desarrolla una de ellas que presenta una dependencia sinusoidal al tiempo $e^{i\omega t}$ (Ward y Hohmann, 1988):

$$E = E_0^+ e^{-i(kz-\omega t)} + E_0^- e^{i(kz-\omega t)} \quad (27)$$

$$H = H_0^+ e^{-i(kz-\omega t)} + H_0^- e^{i(kz-\omega t)} \quad (28)$$

En donde k está en el dominio de los números complejos y se describe como $k = \alpha - i\beta$; además $E_0^\pm$ y $H_0^\pm$ son las amplitudes de las ondas, la dirección de su propagación se indica por su signo.

Las cantidades α y β están dadas por:

$$\alpha = w \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 w^2} \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (29)$$

$$\beta = w \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 w^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (30)$$

En la prospección eléctrica las corrientes de conducción dominan sobre las corrientes de desplazamiento, α y β son iguales y se definen como:

$$\alpha = \beta = \left(\frac{w\mu\sigma}{2} \right)^{1/2} \quad (31)$$

Ahora las soluciones de las ecuaciones 27 y 28 en donde decaen en dirección al eje positivo z son:

$$E = E_0^+ e^{-\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad (32)$$

$$H = H_0^+ e^{-\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad (33)$$

A partir de estas ecuaciones se observa que el término $e^{-\beta z}$ tiende a cero conforme aumenta el valor de z ; por lo que esto representa la atenuación (Ward y Hohmann, 1988). Una onda electromagnética se reduce en amplitud por una distancia δ , siguiendo una relación establecida de $1/e$. Esta distancia δ se le conoce como penetración nominal y está dada por (Ruiz D., 2010):

$$\delta = \left(\frac{2}{\omega \mu \sigma} \right)^{1/2} = 530 \left(\frac{1}{f \sigma} \right)^{1/2} \quad (34)$$

2.2.2. Arreglo geométrico

Nabighian y Macnae (1991) describe que un factor común en todas las técnicas inductivas de dominio en el tiempo es el uso de un bucle sin conexión a la tierra rectangular casi perfecto como transmisor. Dependiendo de la configuración del transmisor y receptor los conjuntos más comunes de TEM son (Ruiz D., 2010):

- Bobina simple

Este arreglo tiene una configuración donde se utiliza una bobina simple tanto como transmisor y receptor. En el instante en la que la corriente fluye por la bobina es cuando esta actúa como transmisora. Una vez que se apaga la corriente, la bobina se conecta al receptor y se mide la señal transitoria durante todo el periodo en el que el transmisor está en reposo. Las bobinas pueden presentar forma cuadrada o rectangular donde cada lado tiene una longitud que puede variar de 5 a 200 m.

- Bobina coincidente

Presenta la misma geometría y respuesta que el arreglo de la bobina simple, la diferencia es que en este arreglo el transmisor y receptor son bobinas independientes, pero coinciden espacialmente.

- Bobina central

Este arreglo es una variante de la bobina coincidente; se utiliza como receptor un dipolo múltiple que se coloca en el centro de la bobina transmisora.

- Bobinas separadas

En este arreglo el transmisor y receptor se encuentran separados en una distancia fija y las bobinas tienen longitudes de hasta unas cuantas decenas de metros por lado. La variante principal en este arreglo es que el dipolo receptor permanece fijo a una distancia en el exterior de la bobina transmisora.

- Bobina doble

Para este arreglo se utilizan dos bobinas adyacentes y conectadas en paralelo para así tener un mejor acoplamiento con los conductores verticales. Con esta configuración se reduce significativamente el ruido causado por fuentes remotas que interfieren con la señal; sin embargo, en zonas donde la conductividad varía lateralmente dicho ruido no se logra reducir.

- Transmisor largo fijo con receptor móvil

Consiste en una bobina grande y fija que funciona como transmisora, mientras que el receptor es pequeño y móvil para tomar mediciones a lo largo de líneas perpendiculares a la bobina. La longitud de cada lado de la bobina va de unos cuantos metros hasta un máximo de 2 km, aunque también han sido utilizadas bobinas de hasta 5 km.

2.2.3. Fuentes de error y ruido en los sondeos TEM

- Fuentes geométricos

Este tipo de error es derivado de la relación geométrica entre la fuente y receptor, pero con efectos prácticamente despreciables, ya que las mediciones se toman cuando el transmisor está apagado. Otro tipo es la topografía, ya que, si la roca es prácticamente no conductora, se debe considerar la posición relativa entre cada estación de medición y las corrientes inducidas en el suelo.

- Efectos culturales

Se genera por corrientes inducidas por conductores metálicos, como líneas eléctricas y telefónicas, tuberías, vallas, etc., que pueden generar anomalías a las respuestas de los TEM's. Estos tienen la capacidad de canalizar las corrientes inducidas en el medio. Su respuesta puede minimizarse colocando bobinas transmisoras distribuidas simétricamente sobre el elemento cultural.

- Ruido electromagnético

Existe varias fuentes de ruido electromagnético, entre ellos son las señales geomagnéticas que se encuentran por debajo de 1 Hz provenientes de la ionósfera. Por encima de 1 Hz, son señales provenientes de tormentas eléctricas que generan campos transitorios electromagnéticos naturales.

Otro ruido es el generado por construcciones del hombre, como la red de distribución eléctrica (50 a 60 Hz) y estaciones de radio con baja frecuencia (10 a 25 kHz). Cuando se toman mediciones en áreas despejadas, el ruido de movimiento inducido o microfónia afecta significativamente. Este ruido parte de que al mover los sensores de campo magnético es el campo geomagnético, las mediciones se verán afectadas ya que el campo de la Tierra es exageradamente más grande que los campos usados en la técnica de TEM. Este efecto es conocido generalmente como ruido de viento (Ruiz D., 2010).

2.2.4. Inversión 1D

La teoría de la inversión se basa en un conjunto de técnicas matemáticas que busca reducir los datos para adquirir información acerca del mundo físico en base a inferencias extraídas a través de observaciones (Menke W., 2018).

En términos de la geofísica, la teoría de la inversión aporta una descripción del interior de la Tierra ajustando los datos medidos en superficie a un posible modelo del subsuelo terrestre. Este proceso numérico puede presentar algunos inconvenientes como lo es que no se puede determinar una única solución para la existencia de un conjunto finito de datos, por lo que puede existir una amplia variedad de modelos que pueden ser compatibles con los datos medidos (GENCAT, s.f.). Por ese motivo se propone un modelo de ajuste con una solución simple que se adecue a las características del medio, sin ser demasiado complejo.

Esta filosofía fue basada en William Occam, el cual describe que “es vano hacer con más lo que se puede hacer con menos”, lo que se ha convertido en un principio fundamental de la ciencia moderna, las hipótesis no deben ser necesariamente complicadas ni numerosas (Constable *et al.*, 1987).

Con lo anterior, para el procesamiento de datos electromagnéticos se hace uso de la regresión Occam, el cual reduce las incertidumbres y ambigüedades de las propiedades reales del subsuelo en la obtención de un modelo representativo suavizado.

2.3. Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica (o la química de las aguas subterráneas) se ocupa de la química del agua subterránea y su interacción con el medio geológico. Las investigaciones hidrogeoquímicas proporcionan conocimientos acerca del origen de las aguas subterráneas y ayudan a entender el funcionamiento de sistemas de flujo de las mismas (Werner J., 1996).

También se define como la compilación de varias ciencias, tales como la química del agua, que concierne al estudio de los procesos y reacciones químicas que afectan la distribución y circulación de especies disueltas en aguas naturales, combinada con la geología y biología, debido a que durante el ciclo hidrológico el agua interactúa directamente con la biosfera (García L., 2023).

2.3.1. Evolución química natural del agua subterránea

Existen causas fundamentales responsables de la acción geológica de las aguas subterráneas; 1) la interacción del agua y su entorno y, 2) las trayectorias de flujo sistematizadas y jerárquicas.

La interacción del agua con su entorno genera diversos procesos, productos y condiciones naturales. Los sistemas de flujo, por otra parte, funcionan como mecanismo de transporte y distribución de estos efectos en patrones espaciales regulares dentro del dominio del flujo de la cuenca (Tóth J., 1999).

Este mecanismo se describe en el diagrama desarrollado por Tóth (1999) donde sugiere que las redes de flujo y áreas de campo se pueden diferenciar sistemas locales, intermedios y regionales de flujo de agua subterránea (Figura 1).

Los sistemas de flujo local son sistemas que tienen su zona de recarga en un alto topográfico y la zona de descarga en un bajo topográfico adyacente, es decir, el agua entra y sale en el mismo valle. El sistema de flujo intermedio es aquel en el que sus zonas

de recarga y descarga no son adyacentes, ni tampoco ocupan las elevaciones altas y bajas de una cuenca, pero están separadas por uno o por más altos o bajos topográficos que no están en el mismo valle. El sistema de flujo regional va desde la parte topográficamente más alta hasta la zona de descarga más baja, esencialmente es el que llega al contacto con la roca basal o basamento (González A., 2011).

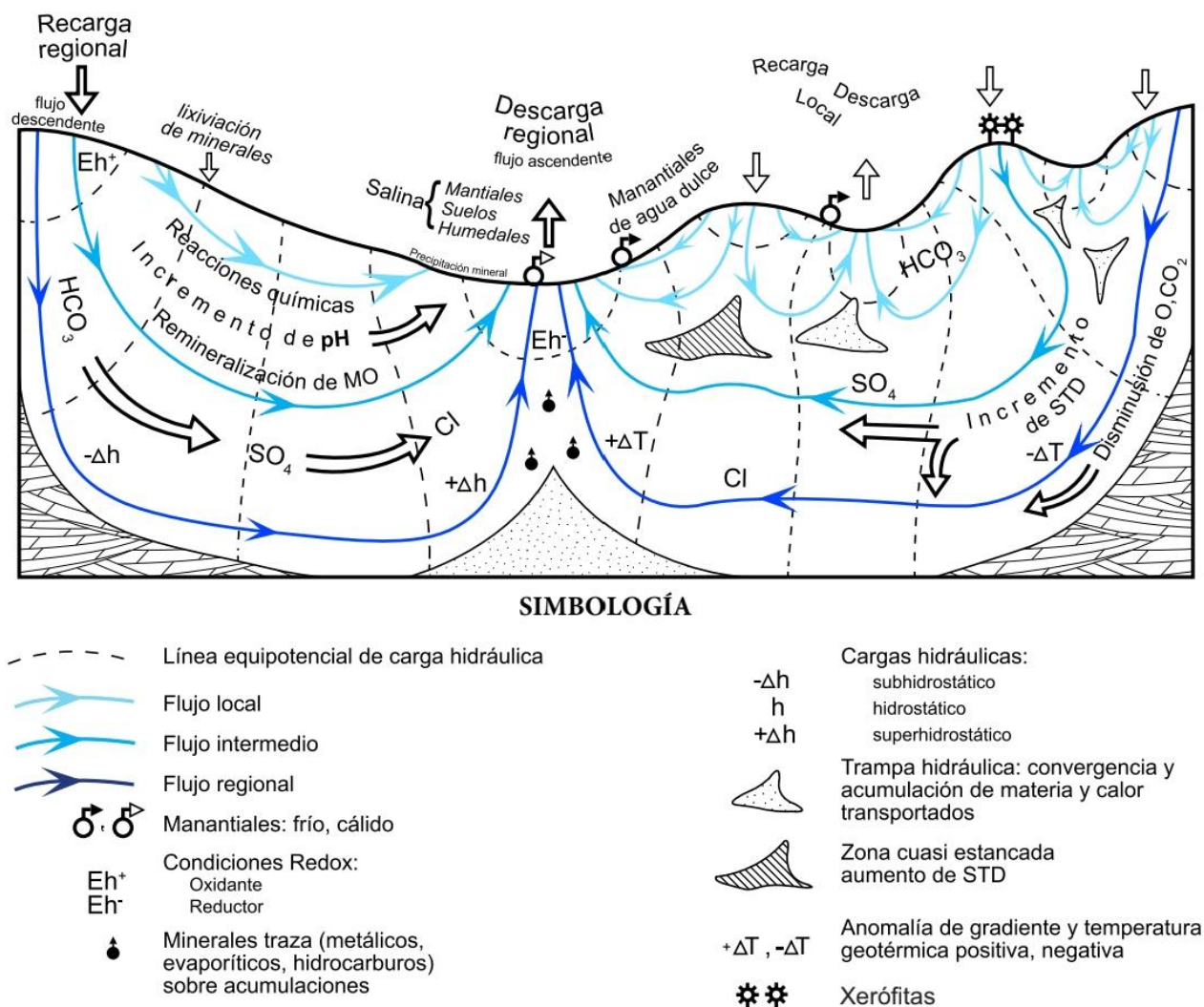


Figura 1. Modificación de Diagrama de flujo de la evolución química de aguas subterráneas de Tóth (1999).

3. Área de estudio

3.1. Localización

El área de estudio se localiza en la parte sur del estado de Puebla y noroeste del estado de Oaxaca, dentro de los límites del territorio de la Mixteca Baja, con coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) X: 584875 a 652875 e Y: 1991702 a 2053702 (Figura 2).

La CMB cubre una superficie de aproximadamente 2 769 km², en la cual integra 20 municipios total y parcialmente, como lo son Acatlán de Osorio, San Juan Ixcaquixtla, Totoltepec de Guerrero, Coyotepec, San Jerónimo Xayacatlán, Petlalcingo, Atexcal, Santiago Chazumba, Cosoltepec, entre otros.

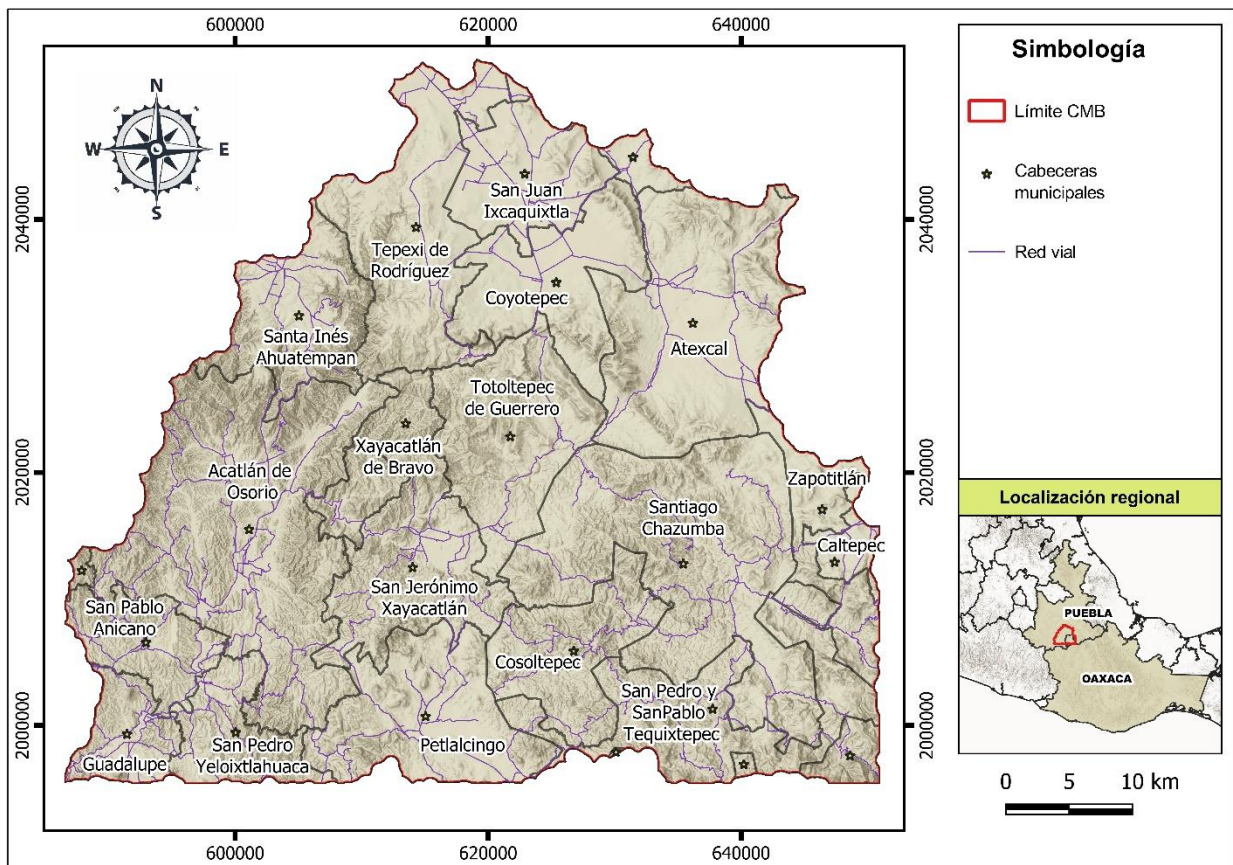


Figura 2. Localización de la Cuenca Mixteca Baja.

3.2. Fisiografía

El área de estudio se encuentra dentro de dos subprovincias fisiográficas: 1) Sierra del Sur de Puebla perteneciente a la provincia del Eje Neovolcánico Transmexicano que cubre la mayor parte de superficie; 2) Sierras Centrales de Oaxaca perteneciente a la provincia de la Sierra Madre del Sur (Figura 3a).

La Sierra del Sur de Puebla es una región de litología diversa, con rocas volcánicas, metamórficas y sedimentarias, dentro de estas últimas se incluyen depósitos de caliche y travertino. En otras porciones, hay aluviones antiguos y material metamórfico cubiertos en parte por rocas volcánicas. La altitud de esta zona oscila de 1 500 a 2000 m aproximadamente. El sistema de topoformas que dominan son los de llanura, lomeríos de cañadas, sierras complejas, sierra volcánica de laderas escarpadas y llanura de piso rocoso o cementado (INEGI, 2000; INEGI, 2004).

En cuanto a las Sierras Centrales de Oaxaca en la parte norte del estado de Puebla dominan calizas del Cretácico y hacia el sur hay afloramientos de rocas metamórficas, con abundancia de gneis al oeste de Oaxaca, donde las laderas son escarpadas. Dominan topoformas como sierras de cumbres tendidas en partes de la sierra de Zapotitlán, las cuales están por arriba de los 2000 m.s.n.m., laderas tendidas que se extienden hacia la parte sur y lomerío con llanuras (INEGI, 2000; INEGI, 2004).

3.3. Clima

De acuerdo a la clasificación de Köppen (1884) con modificaciones por E. García (1964) e INEGI (1980) para México, en el área predominan siete climas: Semicálido subhúmedo (A(C)w0(w)), cálido subhúmedo (Aw0(w)), semiseco muy cálido (BS1(h')w(w)), semiseco semicálido (BS1h(w)), semiseco templado (BS1kw(w)), templado subhúmedo (C(w0)(w)) y templado subhúmedo (C(w1)(w)); con la diferencia que el primero es menos húmedo y el segundo presenta una humedad media (INEGI, 2021) (Figura 3b).

3.4. Edafología

Los tipos de suelo que predominan en la CMB son Regozol, Litosol, Rendzina y Vertisol en mayor proporción; y los de menor son del tipo Feozem, Fluvisol y Castañozem (Figura 3c).

De acuerdo a sus características y factores como clima, tipo de roca, vegetación, entre otros, se clasifican suelos con rasgos y distribución diversa; por ejemplo, algunos pueden ser buenos para el desarrollo de la agricultura de acuerdo al clima, materia orgánica y textura del terreno, como los Vertisoles, Feozem's y Regozoles; donde dependiendo de la zona son aptos para el fomento de distintos tipos de cultivo.

3.5. Hidrografía

Se encuentra ubicada dentro de la región Hidrológica 18 del Rio Balsas, dentro de la cuenca del río Atoyac.

El río Atoyac es el principal conducto de agua en la CMB, que tiene su origen en las escorrentías del volcán Iztaccíhuatl, recorriendo el estado de Tlaxcala para regresar e introducirse al suroeste del territorio poblano. Conforme a INEGI (2006), en la superficie se tiene como cauce principal el río Acatlán, también conocido con Tizaá, el cual recibe pequeños afluentes que bajan de las sierras, como lo son Petlalcingo, Ramales, Estancia y Limón; así como de demás afluentes de ríos y arroyos que se ubican en la zona (Figura 3d).

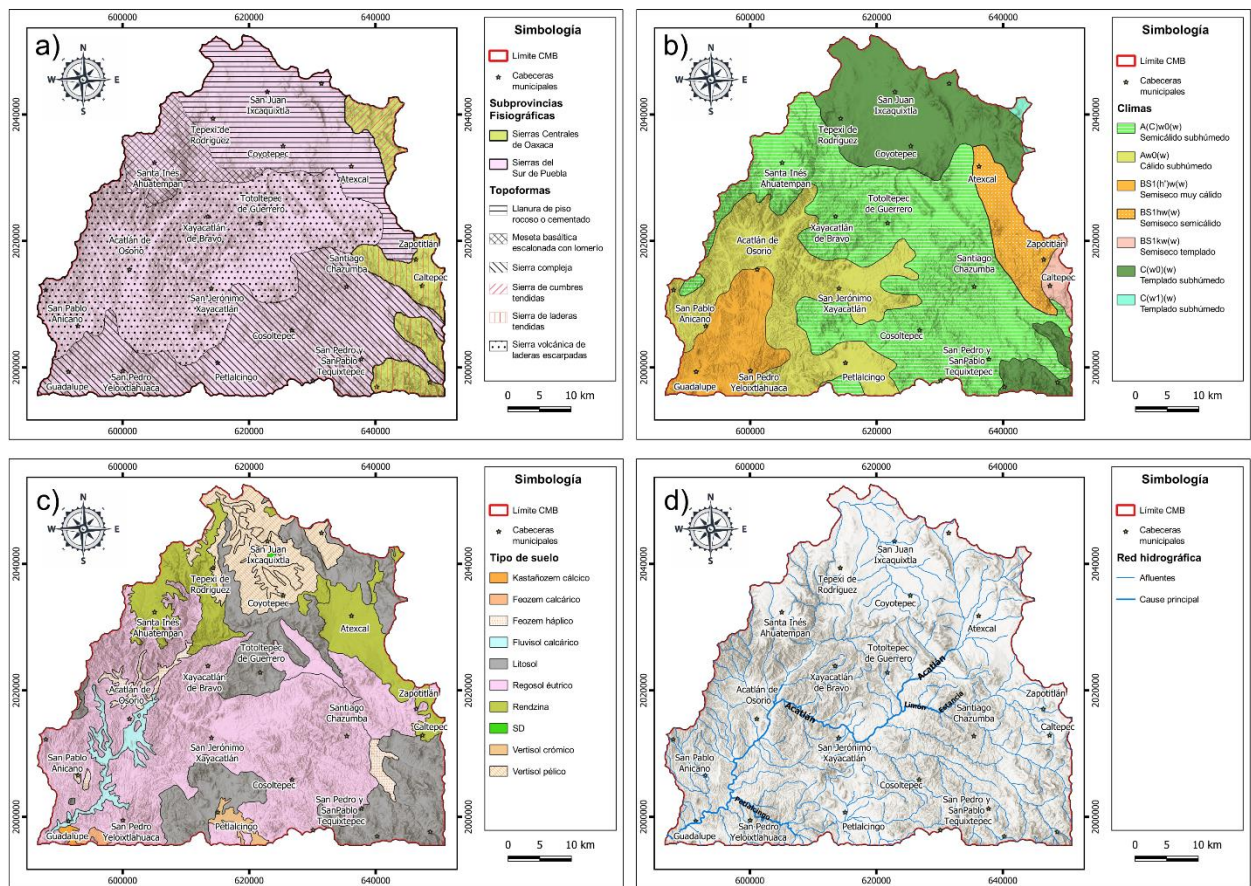


Figura 3. Mapas temáticos de las características físicas de la CMB a) Fisiografía: Subprovincias fisiográficas y topoformas; b) Unidades climáticas; c) Tipos de suelo; d) Hidrografía.

3.6. Geología

Geológicamente el territorio poblano es variable y complejo, en especial en la zona sur, donde se encuentran terrenos metamórficos de edades del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico, los cuales están yuxtapuestos y limitados por grandes zonas de fallas. Las rocas que los conforman han sufrido diferentes fases de metamorfismo y deformación a lo largo del tiempo, por lo que aún no se cubre en su totalidad la información necesaria para establecer un modelo evolutivo que expliquen su origen (INEGI, 2000).

Al ser un sitio de interés en cuanto a su variedad en secuencias litológicas y en la manera en la que se originó su geología histórica, es importante mencionar las etapas y unidades que conforman el terreno mixteco y por las cuales se encuentra la CMB, tanto del estado de Puebla, así como parte de la zona oaxaqueña (Figura 4).

Era Paleozoica

En este caso se presenta por el Complejo Acatlán del Paleozoico inferior, con una litología variada e integrado por diversas formaciones, el cual se dividió en subgrupos para su estudio.

Complejo Acatlán (Cosoltepec, Chazumba, Tecomate, Xayacatlán, Tronco de Totoltepec, Granitoides Esperanza)

El Complejo Acatlán está ubicado en la provincia morfotectónica de la Sierra Madre del Sur. Ortega-Gutiérrez, en 1978, describieron esta secuencia en base a un reconocimiento geológico de rocas cristalinas expuestas en la Mixteca del estado de Puebla y noroeste de Oaxaca. Posteriormente, en 1981, definieron su extensión a más de 200 km al oeste del Complejo Oaxaqueño (Hernández y Morales, 2002).

Ortega-Gutiérrez (1975) dividió esta secuencia en dos subgrupos petrotectónicos principalmente que domino Petlalcingo y Acateco respectivamente. En dichos subgrupos se distinguen cuatro unidades metasedimentarias y una de origen esencialmente magmático. El resto del Complejo está constituido por tres unidades graníticas que intrusionan a las anteriores (Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED], 2009).

Formación Cosoltepec

La Formación Cosoltepec es la más extensa del Complejo Acatlán, sobreyace a la Migmatita Magdalena y a la Formación Chazumba (Hernández y Morales, 2002).

En la base presenta intercalaciones de anfibolita-cuarcita; en la parte media predominan esquistos de granate y en la parte superior se presenta inicialmente una litología muy variada que incluye rocas verdes, cuarcitas interestratificadas, escasas pelitas, así como metapedernales, felsitas, esquistos ultramáficos y algunas capas semicalcáreas, predominando finalmente una litología de filita, filita cuarzosa y cuarcita (Ramos J. 1989).

Formación Tecomate

Según Sánchez (2008) la Formación Tecomate está definida informalmente por Rodríguez-Torres (1970) y posteriormente Ortega-Gutiérrez (1978) formalizó su descripción. Se ha reconocido principalmente en la región Acatlán-Mariscala, al

suroccidente de Puebla y occidente de Oaxaca, en los afloramientos de la porción centro y norte del Complejo Acatlán.

Consiste en una secuencia de rocas metasedimentarias de origen marino predominantemente clásticas que incluyen una amplia variedad litológica: arcosa, grauvaca, litarenita, pizarra, conglomerado, caliza, así como rocas de detritos volcánicos. Su espesor es variable de 500 a 1000 m (Sánchez J, 2008).

Sobreyace a la Formación Cosoltepec, a las rocas metamórficas de Piaxtla y a la Formación Rodeo; lo que sugiere en principio una relación tectónica o discordante. Además, se observa en relación de intrusión con rocas granítico-pegmatíticas tal vez relacionadas con el Tronco de Totoltepec (Sánchez J., 2008).

Formación Chazumba

Anteriormente se le asignó el termino Formación Chazumba por Ortega-Gutiérrez (1978), incluyéndola dentro del subgrupo Petlalcingo, junto con las Formaciones Cosoltepec y Magdalena. Posteriormente, Keppie *et al.* (2006), con base en el análisis a zircons de las partes inferiores del Grupo Petlalcingo, propone el uso del término Litodema Chazumba (SGM, s.f.a).

Consiste principalmente de esquisto de biotita con intervalos de cuarcita, escasas rocas máficas y ultramáficas como metagabros diferenciados y por ultimo esquistos pelíticos. Abarca la edad del Silurico (Homeriano) al Jurásico Temprano (Hettangiano), su contacto inferior es concordante con la migmatita Magdalena, en la parte superior es brusco y paralelo a la Formación Cosoltepec y se encuentra intrusionada por los Diques San Miguel (SGM, s.f.a).

Por otro lado, las unidades magmáticas que se encuentran dentro del área de estudio son la Formación Xayacatlán, Granitoides Esperanza y Tronco de Totoltepec.

Formación Xayacatlán

La Formación Xayacatlán está compuesta por esquistos verdes, anfibolitas, metagrabo, eclogita, serpentina, milonita, esquistos pelíticos y cuarcita (Ramos J., 1989). Su edad es del Devónico Medio; se encuentra cabalgando a la formación Cosoltepec y en discordancia parcial a la Formación Tecomazúchil (Hernández y Morales, 2002).

Granitoides Esperanza

Esta unidad está compuesta por rocas graníticas, aplíticas y pegmatitas cataclásticas y metamorfoseadas (Ramos J., 1989). Se encuentra en discordancia al sur con la Formación Balsas y su límite al este es por cabalgadura postmetamórfica con la Formación Cosoltepec (Hernández y Morales, 2002).

Ramírez (2001) propuso incluir a la Formación Xayacatlán y Granitoides Esperanza en el grupo Piaxtla, argumentando que estas presentan un grado de metamorfismo similar, estilo de deformación y relación tectónica con respecto a las demás unidades (SGM, s.f.d).

Tronco de Totoltepec

Fries *et. al.*, se refiere a un pequeño batolito granítico, que aflora en los alrededores del poblado de Totoltepec. Mayormente este cuerpo intrusivo es delimitado por el Complejo Acatlán, solo la porción norte es delimitada por el Grabo Santo Domingo y por rocas sedimentarias del Mesozoico. La composición de este cuerpo es variable, ya que Calderón (1956) la clasifica como una cuarzodiorita y Fries (1970) lo clasifica como una tonalita (Ramos J., 1989).

Era Mesozoica

Formación Tecomazúchil (Piedra hueca, Santa Cruz y Otlaltepec)

La unidad se ubica en el área de Petlalcingo e inicialmente Pérez *et. al.* (1965) le asignó el nombre. Está compuesta por conglomerados, areniscas y limolitas de color rojo, de origen continental; que descansa en discordancia angular sobre el Complejo Acatlán y es cubierta en forma transicional por la caliza chimeco de edad Oxforniano, por lo que se les asigna una edad del Jurásico Medio (Ramos J., 1989).

Esta a su vez se divide en tres unidades que lo conforman: Miembro Piedra Hueca, Miembro Santa Cruz y Miembro Otlaltepec.

Miembro Piedra Hueca

Ortega-Guerrero (1989) menciona que está conformado por una sucesión de conglomerado, arenisca, limolita y lutita de color rojo que se encuentra en contacto inferior discordantemente con el Complejo Acatlán y sobre el Tronco de Totoltepec; su límite superior está en discordancia angular con la formación Otlaltepec y en discordancia con la Formación Magdalena al este de San Pablo Ameyaltepec. Diversos ejemplares de fósiles vegetales han sido reportados con edades de Jurásico Inferior y Medio (Morales A., 2014).

Miembro Santa Cruz

Esta unidad presenta características litológicas similares a las descritas por Pérez *et. al.* (1965) en la región de Petlalcingo, aflora en los alrededores de Santa Cruz, en la Loma Encinera al noreste del mismo poblado; así mismo como en los alrededores de San Pablo Ameyaltepec (Ramos J., 1989).

En la parte basal presenta horizontes de conglomerados oligomícticos poco compactos, con fragmentos de cuarzo principalmente metamórficos y en algunos casos bien redondeados; en la parte media de esta unidad se presentan interestratificaciones de litarenitas rojas y limolitas verdes y moradas; en la parte superior se encuentran litarenitas de color rosado, de grano medio y grueso, llegando hasta conglomerados (Ramos J., 1989).

Esta descansa por falla sobre el Miembro Piedra Hueca del Jurásico Temprano, su contacto con el Complejo Acatlán del Paleozoico Temprano es por falla. Su contacto superior es transicional con el Miembro Otlaltepec del Jurásico Tardío (Ramos J. 1989).

Miembro Otlaltepec

Moran-Zenteno et al. 1993 la describen como una sucesión alternada de arcosas, lutitas y limolitas, tiene un espesor de 1,500 m aproximadamente, sobreyace discordantemente a las rocas del Complejo Acatlán, al Tronco de Totoltepec y a la formación Piedra Hueca con una discordancia angular, su contacto superior es discordante con la formación Magdalena, cuya edad se encuentra entre el Jurásico Medio y el Cretácico Inferior (Morales A., 2014).

Formación Zapotitlán

Aguilera (1906) utilizó el nombre de formación Zapotitlán a una serie de lutitas y lutitas con bancos margosos que florecen cerca del poblado de Zapotitlán, su espesor es de 100 m y se subdivide en dos miembros: Agua del Cordero del Barremiano Inferior y Superior, y Agua del Burro del Barremiano Superior (Hernández, 2018; González, 1974).

Buitrón y Marcelo (1980) y Ramírez (2009) mencionan que está constituida por lutita, lutita calcárea, marga y arenisca; en la parte basal presenta carbonatos, los cuales disminuyen hacia la cima. Esta secuencia descansa sobre las rocas metamórficas del Complejo y rocas continentales y está cubierta concordantemente por la Formación San Juan Raya (Hernández, 2018).

Formación San Juan Raya

Aguilera (1906) describe una secuencia de lutitas y areniscas de edad Aptiana, que aflora en los alrededores del poblado del cual toma el nombre. Descansa en forma concordante transicionalmente sobre la Formación Agua del Cordero del Barremiano Tardío-Aptiano Temprano y por cabalgadura con la Formación Cipiapa en el límite superior. Fisiográficamente se presenta en las partes bajas, formando lomas alargadas y pequeñas planicies (Ramos J., 1989).

Formación Cipiapa

Calderón en 1956 menciona que esta secuencia se compone de una serie de calizas compactadas, de color gris crema, de estratificación gruesa, de espesor de 10 m con nódulos de pedernal y fósiles como paquiodontos, foromaníferos y escasos ostrácodos. Su base presenta dolomía finamente cristalina, con coloración amarilla verdosa, de aspecto terroso y dolomías biógenas de estratificación media (Ramos J., 1989).

Sobreyace por medio de una cabalgadura las Formaciones San Juan Raya del Aptiano, Agua del Cordero del Barremiano Tardío-Aptiano Temprano y miembro Otlaltepec del Jurásico Tardío (Ramos J., 1989).

Era Cenozoica

Grupo Balsas

Nombre asignado por Fries en 1960, para referirse a una secuencia continental de conglomerados, calizas lacustres, arcosas, areniscas y limolitas, así como brechas volcánicas, tobas y lavas que se presentan en la cuenca del Río Balsas; de acuerdo a Fries, por sus relaciones estratigráficas establece su edad del Eoceno Tardío-Oligoceno Medio; sin embargo, autores como Ortega-Gutiérrez en 1980, sugiere que se amplié el alcance a Paleoceno-Oligoceno (CONAGUA, 2024).

Formación Coatzingo

Inicialmente Pantoja-Alor *et al.* (1989) menciona que esta formación en su base, está conformada por caliza, lacustre color crema, con estratificación delgada a mediana y bandas de sílice e intraclastos de caliza, pedernal y rocas volcánicas la cual se continua con una alternancia de capas de conglomerado polimíctico de 1 a 2 m de espesor, bien compactados con fragmentos de guijas de caliza, pedernal, cuarzo y rocas volcánicas diversas (SGM, s.f.b).

Después, en 1992 Pantoja agrega que se compone de depósitos terrígenos continentales fluviolacustres y aluviales, formados por conglomerado, agrava, arena, limo, arcilla, marga, caliza y travertino. Su afloramiento es de aproximadamente 53 m de espesor ubicado a 500 m al este de la Cantera Tlayúa, sobre la barranca del mismo nombre. Estudios palinológicos realizados por Martínez-Hernández y Ramírez-Arriaga (1999) permitieron asignar una edad que varía del Eoceno al Oligoceno que pertenece la unidad. (SGM, s.f.b).

Formación Huajuapán

Está constituida por derrames de andesita e intercalaciones de toba andesítica y ocasionalmente andesita basáltica, cuya edad se asigna al Oligoceno (CONAGUA, 2024).

Se distribuye en el estado de Oaxaca, en Juxtlahuaca, Tilantongo, Ixcatlán, Suchistepec, al sur del poblado Huajuapán de León, al este de Nochixtlán, al suroeste rumbo a Magdalena Jaltepec, al norte de Yanhuitlán, así como entre Yucuaño y Tlaxiaco; en el estado de Puebla, en Chila y al sur de Petlalcingo (Salas, 1949) y al noreste del estado

de Guerrero (Guzmán, 1950). Salas (1949) menciona que la unidad descansa discordantemente sobre el Cretácico Superior, en el estado de Puebla, al sur del poblado de Petlalcingo y en el estado de Oaxaca, al sur de Huajuapán de León (SGM, s.f.c).

Depósitos Recientes

Se encuentran depósitos de travertino que precipitan alrededor de manantiales, depósitos de talud y aluvión. Los depósitos de aluvión se ubican en los causes de los arroyos y valles, en varios tamaños que van desde arcillas, limos, arenas hasta gravas y boleas. El espesor máximo que alcanzan es de 10 m con una permeabilidad media a alta (CONAGUA, 2024).

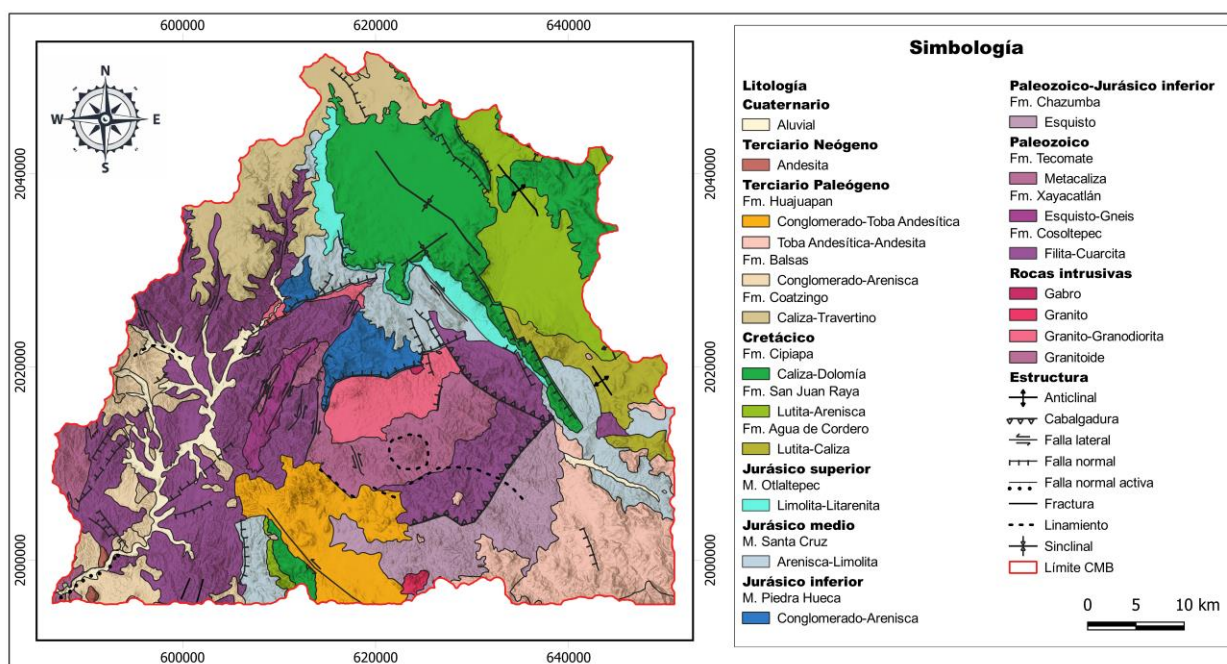


Figura 4. Mapa geológico de la Cuenca Mixteca Baja (Ramos J, 1989; SGM, 1998; 2009; 2012; 2017; 2018a; 2018b; 2023).

4. Metodología

4.1. Índices de evaluación de vulnerabilidad acuífera, calidad y contaminación del agua

Para un análisis integral sobre el estado en la cual se encuentra la vulnerabilidad del agua subterránea en relación con la calidad y contaminación presente en la CMB, se llevó a cabo la aplicación de diversas metodologías de manera independiente, las cuales se describen a continuación.

4.1.1. Vulnerabilidad acuífera (DRASTIC)

DRASTIC es una metodología intrínseca utilizada para el mapeo de la vulnerabilidad acuífera desarrollada por Aller *et al.* (1987) y patrocinada por la EPA (Agencia de Protección Ambiental).

En ella se consideran siete parámetros importantes que controlan el potencial de contaminación de las aguas subterráneas, cada uno por sus siglas en inglés conforman el acrónimo DRASTIC. Cada parámetro tiene su propio peso y valor de clasificación dependiendo de su importancia para la evaluación del área.

Se realiza una operación lineal a través de la ecuación 35 de cada uno, multiplicado por un factor de importancia que van del 1 al 5 establecidas por Aller *et al.* (1987) (Tabla 1) en donde se van sumando para obtener el índice de vulnerabilidad acuífera final.

$$DRASTIC_i = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (35)$$

Tabla 1. Ponderaciones asignadas a los parámetros DRASTIC de acuerdo a Aller *et al.* (1987).

Parámetro	Ponderación (w)
Profundidad del nivel estático (D)	5
Recarga neta (R)	4
Medio acuífero (A)	3
Tipo de suelo (S)	2
Gradiente topográfico (T)	1
Impacto a la zona vadosa (I)	5
Conductividad hidráulica (C)	3

Una vez que se ha obtenido el mapa de la distribución de la vulnerabilidad acuífera final en la cuenca, se procede a hacer una normalización de los valores para tener una unificación en la escala con los parámetros inmersos en la metodología por medio de la ecuación:

$$DRASTIC_n = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} * 100 \quad (36)$$

Donde:

$DRASTIC_n$ = Mapa de vulnerabilidad normalizado con escala de 0 a 100.

x_i = Mapa de valores DRASTIC.

x_{min} = Valor mínimo del mapa de vulnerabilidad DRASTIC.

x_{max} = Valor máximo del mapa de vulnerabilidad DRASTIC.

4.1.1.1. Profundidad del nivel estático

Se realizó a partir de la información registrada del nivel estático del agua subterránea de pozos proporcionada por CONAGUA-Puebla; estos datos son interpolados (método Kriging) para tener una distribución espacial en toda la zona de estudio y reclasificarlos de acuerdo a una modificación hecha a la metodología original realizada por Ramos-Leal (2002).

Tabla 2. Rangos y ponderación del parámetro D (Aller et al., 1987; modificada por Ramos Leal, 2002).

Rango (ft)	Rango (m)	Rango mod. (m)	Ponderación
0-5	0-1.5	0-7.5	10
5-15	1.5-4.6	7.5-23	9
15-30	4.6-9.1	23-45.5	7
30-50	9.1-15.2	45.5-76	5
50-75	15.2-22.9	76-114.5	3
>75	>22.9	>114.5	2

4.1.1.2. Recarga Neta

La recarga neta representa la cantidad de agua en milímetros (mm) que penetra desde la superficie de la tierra y llega al nivel freático anualmente (Aller *et al.*, 1987; Almanza O., 2015).

Para obtener el parámetro de la Recarga neta (R) se desarrolla el cálculo del balance hídrico, el cual se basa en el principio de conservación de masas; para ello se recurre a la información de los datos de estaciones meteorológicas dentro y fuera de los límites cercanos al área de estudio entre un periodo de 1980 a 2022. La ecuación para calcularla es (Vélez y Vásquez, 2004):

$$R_{neta} = P - ETR - Esc \quad (37)$$

Donde:

R_{neta} = Recarga neta.

P = Precipitación.

ETR = Evapotranspiración.

Esc = Escurrimiento.

Precipitación

Se define como la caída del agua en estado líquido o sólido sobre la superficie terrestre. Es la fuente principal de la formación de las aguas de ríos, lagos, aguas subterráneas y glaciares. Para obtener su valor en una cuenca o región es por medio de registros pluviométricos (Collazo M. y Montaña J., 2012).

Se determina con el promedio anual acumulado de precipitación en mm/año de acuerdo a la recopilación hecha por Servicio Meteorológico Nacional-CONAGUA. Como existe la falta de datos de precipitación y temperatura en las estaciones seleccionadas que dejaron de estar activas durante el periodo antes mencionado o no se tiene registro, se recurre al método del U.S. National Weather Service desarrollado por Chow *et al.* (1996) para su llenado. Por otra parte, en lo que concierne a la distribución de la precipitación total en la CMB, se hizo uso del método de los polígonos de Thiessen (Thiessen A.H., 1911).

Una manera de verificar que los datos calculados sean lo mayormente precisos y confiables para aplicarlos en la evaluación de la precipitación, se aplican pruebas de normalidad como Shapiro Wilk y Pruebas t de Student (Gutiérrez y De La Vara, 2008;

Campos-Aranda, 1998), con el fin de indicar que los datos siguen una distribución normal con respecto a los datos reales registrados.

Evapotranspiración real

Es el agua evaporada a partir de la relación de la humedad del suelo y la transpiración que desarrollan las plantas (Collazo M.P. y Montaña J., 2012).

Para su cálculo existen diversos métodos; para este caso de estudio se hace uso del método empírico de Turc (1961), el cual se determina con la ecuación:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (38)$$

Siendo P la precipitación media anual en mm/año y L la relación de temperatura (T) en °C. Para obtenerla es por medio de:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (39)$$

Su limitante teórica es con $P < 0.31 L$, ya que daría como resultado una ETR mayor que P, lo que se asumiría que $ETR = P$ (Campos-Aranda, 1998).

Escurrimiento

Para calcular el escurrimiento superficial es necesario determinar el coeficiente de escurrimiento desarrollado por la Secretaría de Agricultura y Recursos (Flores-López *et al.*, 2003); en donde se debe de aplicar las características de textura, uso de suelo y pendientes de la zona.

En primer lugar, para la determinación de la textura y uso de suelo, se calcula un mapa NDVI (Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación) con la ayuda de imágenes Landsat 8, con una diferencia de bandas descritas en la ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (40)$$

En donde *NIR* es la banda 5 (banda roja cercana) y *RED* hace referencia a la banda 4 (banda roja).

En segundo lugar, para conocer las pendientes se utiliza un CEM (Continuo de Elevaciones Mexicano), el cual se expresa en porcentajes para su uso.

Ambas variables se clasifican de acuerdo a la tabla 3, debido a las características geológicas del área de estudio.

Tabla 3. Coeficientes de escurrimiento de acuerdo a la textura, uso de suelo y pendiente (Schwab, 1990).

Uso del suelo y pendiente del terreno	Textura Gruesa	Textura media	Textura fina
Bosque			
Plano (0-5%)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10%)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (11-30%)	0.30	0.50	0.60
Pastizales			
Plano (0-5%)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10%)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (11-30%)	0.22	0.42	0.60
Terrenos cultivados			
Plano (0-5%)	0.30	0.50	0.60
Ondulado (6-10%)	0.40	0.60	0.70
Escarpado (11-30%)	0.52	0.72	0.82

Por último, una vez obtenido el mapa de coeficiente de escurrimiento, se lleva a cabo una multiplicación con el mapa de la precipitación obtenida a través de los polígonos de Thiesenn, desarrollado en la calculadora ráster teniendo como resultado el mapa de escurrimiento en mm/año.

Una vez que se elaboró el cálculo del balance hídrico en la CMB, se restan los elementos anteriores implicados en la realización de la Recarga neta por medio de la infiltración que sucede en él, aplicando la ecuación 36 anteriormente descrita; finalmente se clasifica de acuerdo a la metodología con respecto a la tabla 4.

Tabla 4. Rangos y ponderación del parámetro R (Aller el al., 1987).

Infiltración (in)	Infiltración (mm)	Ponderación
0-2	< 50	1
2-4	50-100	3
4-7	100-178	6
7-10	178-254	8
> 100	> 254	9

4.1.1.3. Medio acuífero

Este parámetro se determina a partir del medio geológico presente en la zona, ya que ejerce una influencia importante debido a la diversidad rocosa y a sus propiedades físicas, particularmente la porosidad y permeabilidad.

A cada tipo de litología se le asignó un valor modificado, ajustando la metodología original según los criterios de la tabla 5. Adicionalmente, se considera la presencia de estructuras geológicas, como fracturas o fallas, dado que estas favorecen el transporte de contaminantes.

Tabla 5. Material geológico y ponderación del parámetro A (Aller et al., 1987).

Litología presente	Ponderación
Aluvial	8
Andesita	1-2
Arenisca-Limolita	6-7
Caliza-Dolomía	6-7
Caliza-Travertino	6-7
Conglomerado-Arenisca	6-7
Conglomerado-Toba Andesítica	4-5
Esquisto	2
Esquisto-Gneis	3-4
Filita-Cuarcita	3-4
Gabro	2
Granito	2
Granito-Granodiorita	2-3
Granitoide	2-3
Limolita-Litarenita	6
Lutita-Arenisca	3-4
Lutita-Caliza	3
Metacaliza	3-4
Toba Andesítica-Andesita	3-4

4.1.1.4. Tipo de suelo y vegetación

Este parámetro puede determinarse de dos formas distintas: mediante la textura del suelo, como lo establece la metodología original, o a través del uso del suelo y vegetación. En el caso de este estudio, debido a las características particulares de la región, se optó por utilizar los datos del INEGI del uso del suelo y vegetación (escala 1:250 000) para calcular el parámetro S.

La selección de este enfoque se justifica porque la cobertura de vegetal natural y el grado de urbanización influyen directamente en la capacidad de infiltración de contaminantes hacia el agua subterránea. De igual forma se clasifican conforme a las características de cada tipo de acuerdo a la tabla 6.

Tabla 6. Tipo de uso de suelo y vegetación de la CMB con su ponderación del parámetro S modificada.

Uso del suelo	Ponderación
Agricultura de riego anual	7
Agricultura de riego anual y permanente	8
Agricultura de riego anual y semipermanente	6
Agricultura de temporal anual	4
Agricultura de temporal anual y permanente	5
Zona urbana	1
Bosque de táscate	5
Chaparral	4
Cuerpo de agua	10
Matorral crasicaule	3
Matorral desértico rosetófilo	2
Palmar inducido	6
Pastizal inducido	5
Selva baja caducifolia	6
Sin vegetación aparente	2
Veg. sec. arbórea de bosque de encino y selva baja caducifolia	5
Veg. sec. arbustiva de bosque de encino y de táscate	4
Veg. sec. arbustiva de chaparral	3
Veg. sec. arbustiva de matorral crasicaule	2
Veg. sec. arbustiva de selva baja caducifolia	5

4.1.1.5. Gradiente topográfico

La topografía son las pendientes y su variabilidad que existe en la zona, esta puede ayudar a que un contaminante se escurra con facilidad dependiendo de las direcciones de flujo natural del agua que toma en las zonas altas o bajas, siendo las segundas más vulnerables, por el tiempo de interacción del agua con la superficie del suelo.

Se calcula a partir del CME expresado en porcentaje, para posteriormente clasificarlos con los valores de la tabla 7.

Tabla 7. Rangos y ponderación del parámetro T (Aller et al., 1987).

Rango (%)	Ponderación
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

4.1.1.6. Impacto a la zona vadosa

La zona vadosa o no saturada corresponde al espacio comprendido entre la superficie del terreno y el nivel freático del acuífero (Patel *et al.*, 2022), funcionando como interfaz crítica entre la cobertura superficial y el sistema acuífero subyacente.

Para este caso se tomó como base la información de la litología descritas en el Medio acuífero con un valor aproximado reduciendo gradualmente los valores en las ponderaciones para evaluar este parámetro (Tabla 8), ya que no se cuenta con información necesaria que especifique las condiciones en las que se encuentra la zona vadosa en el área de estudio.

Tabla 8. Tipos de material geológico y su ponderación para el parámetro I modificada.

Litología presente	Ponderación
Aluvial	7
Andesita	1-2
Arenisca-Limolita	5-6
Caliza-Dolomía	5-6
Caliza-Travertino	5-6
Conglomerado-Arenisca	5-6
Conglomerado-Toba Andesítica	3-4
Esquisto	1
Esquisto-Gneis	2-3
Filita-Cuarcita	2-3
Gabro	1
Granito	1
Granito-Granodiorita	1-2
Granitoide	1-2
Limolita-Litarenita	5

Lutita-Arenisca	2-3
Lutita-Caliza	2
Metacaliza	2-3
Toba Andesítica-Andesita	2-3

4.1.1.7. Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica (k) se refiere a la capacidad de transmitir el agua a una cierta velocidad a través de los materiales rocosos del acuífero. Este parámetro se determina normalmente mediante pruebas de bombeo. En el presente estudio, al no disponer de datos directos de pruebas de bombeo, se recurrió a la información contenida en las cartas hidrogeológicas E14-5 y E14-6 del INEGI (escala 1:250 000), en donde se documentan los puntos de aprovechamiento de aguas subterráneas (pozos, norias y manantiales) y proporcionan valiosa información sobre las características hidrológicas regionales.

A partir de estos datos secundarios se establecieron valores ponderados de k. La asignación de estos valores se realizó conforme a los criterios especificados en la tabla 9, que relaciona los tipos de rocas con rangos característicos de k.

Tabla 9. Características del material litológico y su ponderación del parámetro C modificada.

Tipo de material y su valor de conductividad hidráulica	Ponderación
No consolidado con un valor medio	9
No consolidado con valor bajo	5
Consolidado con un valor bajo	4
Cuerpos de agua superficiales	10

4.1.2. Índice de calidad de agua (ICA)

El método para evaluar la calidad del agua para consumo humano de las muestras obtenidas de los distintos lugares de la zona, es el índice de calidad del agua (ICA), el cual considera una serie de parámetros físicos, químicos o biológicos medidos en campo o laboratorio (Orozco M.G. *et al.*, 2020).

Para su evaluación se asigna un peso y una ponderación establecida de acuerdo a las concentraciones o valores de cada variable en cuestión, con la siguiente ecuación (Rubio *et al.*, 2014):

$$ICA = k \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (41)$$

Donde:

k es la constante asignada a las características físicas de la muestra de agua (tabla 10).

C_i Valor porcentual asignado al parámetro (Tabla 11).

P_i Peso asignado al parámetro.

Tabla 10. Clasificación de la constante k de acuerdo a las características físicas del agua (Conesa, 1993).

valor k	Características físicas del agua
1	Agua limpia sin aparente contaminación.
0.75	Agua con ligero color, escoria, turbia, sin apariencia natural.
0.50	Agua con apariencia contaminada y oler fuerte.
0.25	Aguas negras con evidente fermentación y olor.

Tabla 11. Valores porcentuales de cada parámetro asignado para ICA (Martínez de Bascaran, 1979).

Valor	pH	Temp (°C)	CE (S/cm)	STD (mg/L)	Cl (mg/L)	SO4 (mg/L)	NO3 (mg/L)	Na (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)
0	1 o 4	>50 o <=-8	16000	20000	1500	1500	100	500	1000	500
10	2 o 13	45 o -6	12000	10000	1000	1000	50	300	600	300
20	3 o 12	40 o 4	8000	5000	700	600	20	250	500	250
30	4 o 11	36 o -2	5000	3000	500	400	15	200	400	200
40	5 o 10	32 o 0	3000	2000	300	250	10	150	300	150
50	6 o 9.5	30 o 5	2500	1500	200	150	8	100	200	100
60	6.5	28 o 10	2000	1000	150	100	6	75	100	75
70	9	26 o 12	1500	750	100	75	4	50	50	50
80	8.5	24 o 14	1250	500	50	50	2	25	25	25
90	8	22 o 15	1000	250	25	25	1	15	15	15
100	7	21 o 16	750	100	0	0	0	10	10	10
PESO	1	1	4	2	1	2	2	1	1	1

Una vez que se evalúan los parámetros y se aplica la ecuación a cada muestra, se realiza una clasificación propuesta por Dinius (1987) en base a los criterios establecidos dentro del índice de calidad ICA (Tabla 12) de acuerdo a rangos que van entre 0 al 100 para conocer si el agua es apta para fines de abastecimiento público y consumo humano.

Tabla 12. Clasificación del índice de calidad del agua ICA (Dinius, 1987).

Rango	Escala de ICA	Recomendaciones
100-91	Excelente	No requiere purificación
90-81	Aceptable	Purificación menor

80-51	Ligeramente contaminada	Mayor necesidad de tratamiento
50-41	Contaminada	Dudoso para consumo
40-0	Excesivamente contaminada	No aceptable

4.1.3. Índice de contaminación (ICON)

El índice de contaminación (ICON) es otra de las formas de evaluar la contaminación del agua subterránea el cual representa la suma de factores individuales de los componentes que exceden los límites máximos permisibles reportados por la NOM-127-SSA1, 2021 (Ramos J, 2005).

Para su evaluación se calcula de la siguiente manera (Backman *et al*, 1998):

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_{fi} \quad (42)$$

$$C_{fi} = \frac{C_{Ni}}{C_{Ai}} - 1 \quad (43)$$

Donde:

C_{fi} Factor de contaminación para el i-ésimo parámetro.

C_{Ni} Valor analítico del i-ésimo parámetro.

C_{Ai} Límite máximo permisible del i-ésimo parámetro.

Esos valores se encuentran en un rango establecido en la tabla 13, en donde pueden ser menores a cero, representando una libre contaminación de acuerdo a los límites permisibles establecidos, sin embargo, si se encuentran por encima de un rango igual o mayor a 3, no cumplen con la norma para que el ser humano pueda consumir el agua.

Tabla 13. Clasificación del agua establecido en el índice de contaminación ICON.

Rangos	Clasificación del índice de contaminación
< 1	Baja
1-3	Media
> 3	Alta

4.2. Modelo geológico-geofísico

4.2.1. Método Transitorio Electromagnético

Se llevó a cabo la medición de 25 sondeos por medio del método Transitorio Electromagnético (TEM) para la caracterización del medio geológico en la CMB, cuyas coordenadas se describen en el Anexo A. La distancia promedio de separación entre cada uno es de 3.5 km. aproximadamente y de acuerdo a su distribución se trazaron dos perfiles para la creación de las secciones geoelectricas.

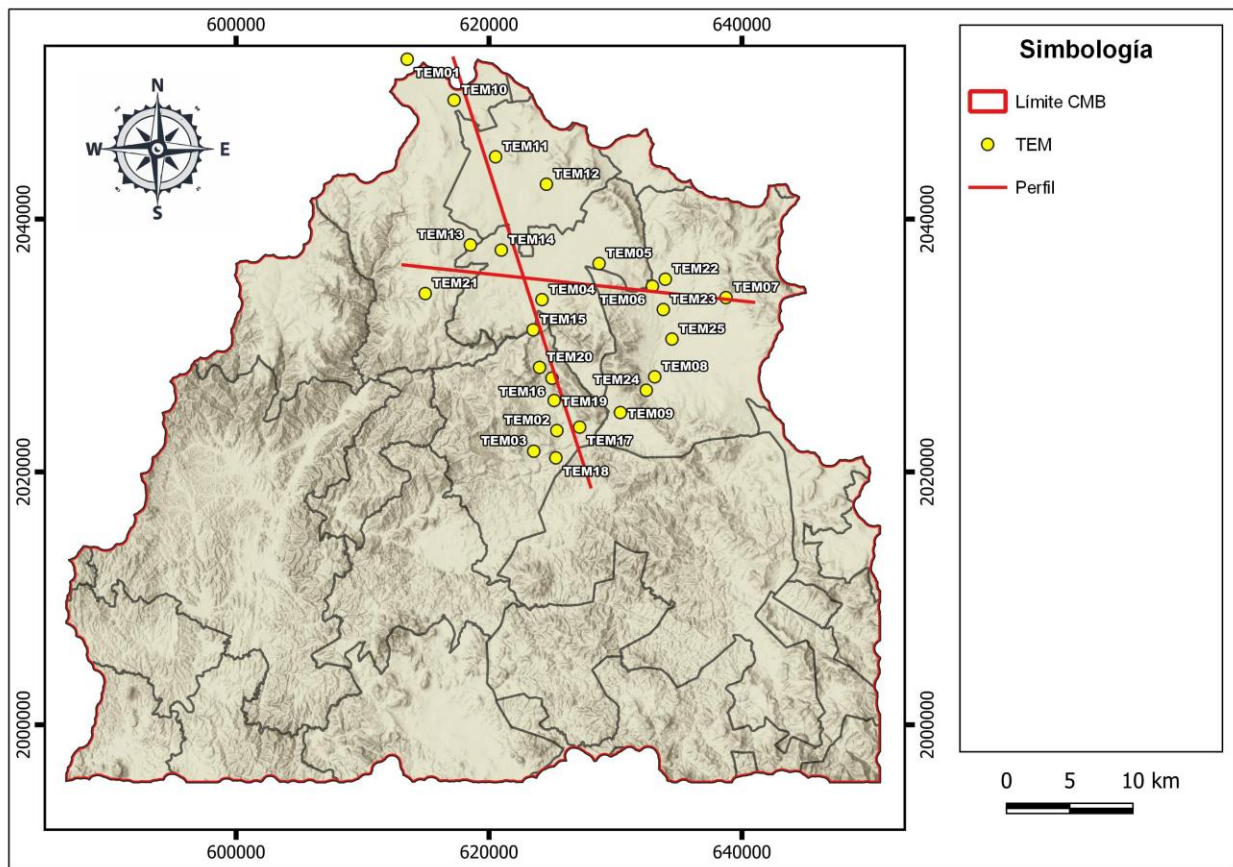


Figura 5. Distribución de los sondeos TEM en la zona de estudio.

El muestreo consistió en utilizar una configuración con bobina simple, en la cual tanto el receptor (Rx) como transmisor (Tx) provienen de una misma fuente; el tendido de los cables fue en forma cuadrangular con dimensiones de 100m x 100m (área cubierta de 10 000 m²) o 150m x 150m (área de 22 500 m²), esto dependiendo de las condiciones del terreno del lugar en donde se toman los datos; con el equipo Terratem de Alpha Geoscience (Figura 6).



Figura 6. Equipo Terratem, marca Alpha Geoscience.

Especificaciones del equipo:

- Canales de entrada disponibles: 1, 2, 3, 6 ó 9 canales con grabación simultánea, con opción de extensión a 12.
- Rango de entrada: ± 200 V medibles, con protección a sobrevoltaje hasta 700 V.
- Frecuencia de muestreo seleccionable de 78 kHz hasta 625 kHz por canal, manteniendo 24 bits de resolución y paths separados para minimizar interferencias.
- Ganancia: desde 0.1 hasta 100, con opción de auto-gain, ideal para loop coincidente o single loop.
- Apilamientos: desde 1 hasta 65,536 acumulaciones.
- Corriente de salida interna: hasta 50 A con voltaje desde 6 V hasta 12 V (6 Kw).
- Temperatura de operación: -20°C a 50°C .
- Pantalla táctil de capacidad de 10", visible a plena luz y resolución de 800 x 600.
- Almacenamiento: 30 GB para guardar datos apilados, por ventanas y waveform completo si se desea.
- Conectividad: USB para transferencia de datos.
- Dimensiones aproximadas: 46 x 36 x 16 cm con un peso de 10 kg, incluido estuche de transporté resistente.

Procesamiento de los datos TEM

La información de cada sondeo es guardada en un archivo .sir y después exportada al programa WinGLink, en donde se visualizan las curvas obtenidas en campo en una gráfica que representa el voltaje inducido en función del tiempo, de esta forma se realiza la primera corrección de los datos que consiste en enmascarar puntos que no sigan una tendencia de decaimiento o que estén por debajo de la curva de ruido también medido en campo.

La Figura 7 muestra un ejemplo del TEM02, el cual en a) se observa una línea azul que representa los datos obtenidos durante el ciclo medido y la línea roja tenue es el ruido presente en ese punto; en la figura b) se genera una nueva curva corregida (línea roja) en donde se eliminan los datos que puedan estar influenciados por el ruido; esta se guarda en formato .tem para seguir con su procesamiento.

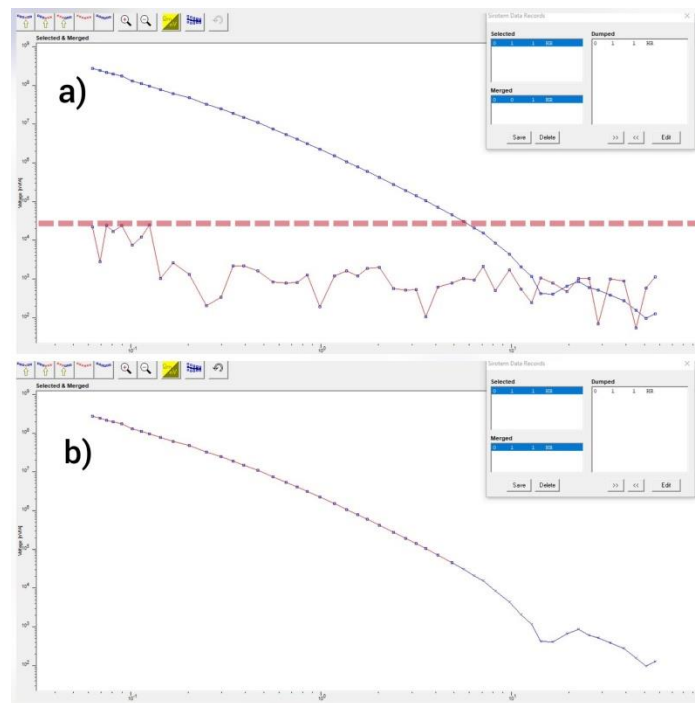


Figura 7. Ejemplo del TEM02 de la curva de decaimiento de voltaje y el ruido ambiental.

Lo siguiente es realizar una conversión de la curva de decaimiento a una de resistividad aparente que está en función del tiempo; con ella se obtiene un modelo inicial en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de la curva, el tiempo en el que ocurren y de las pendientes que presente. A partir de esto se lleva a cabo una inversión 1D para ajustar este modelo de manera suavizada por medio de la regresión Occam, en la cual se establecen propuestas de un valor de resistividad inicial y una final, un valor máximo de iteraciones, así como el número de capas y profundidades estimadas, con el propósito de buscar soluciones simples y evitar inferencias más allá de lo que se observa en campo y de la información geológica que existe en el área.

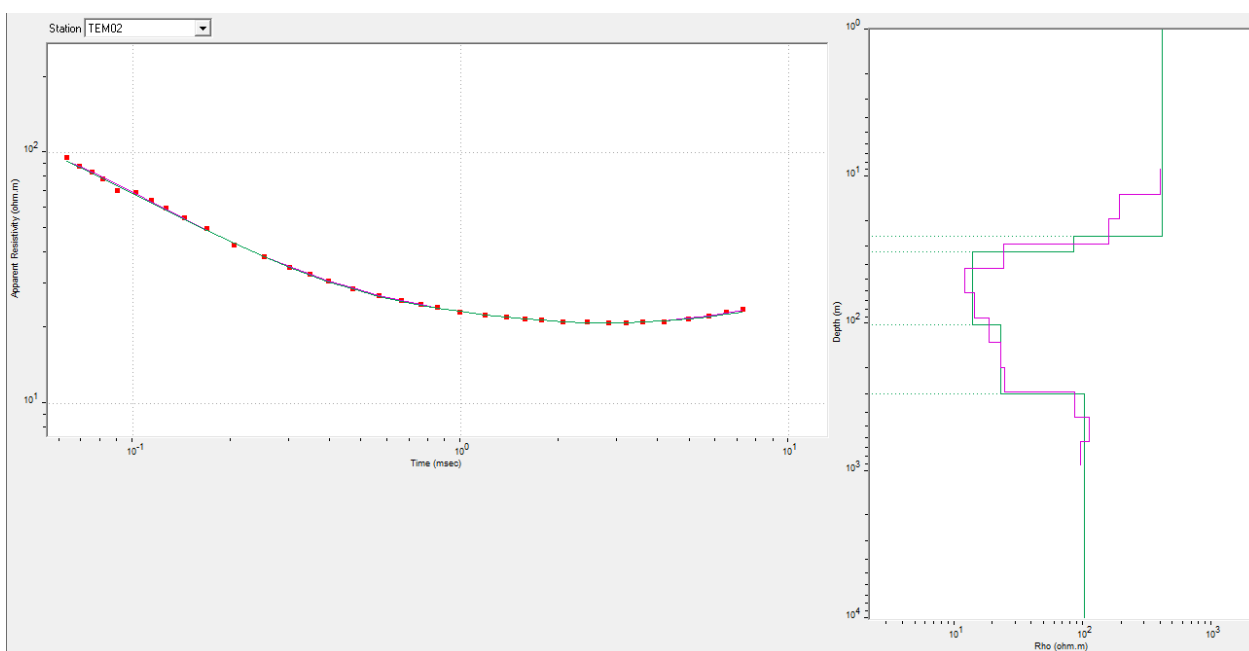


Figura 8. Ejemplo del modelo de capas y ajuste de curva suavizado del sondeo TEM02.

Una vez analizadas cada una de las curvas de resistividad en 1D, se procede con la elaboración de las secciones geoelectricas. En primer lugar, se colocan los sondeos con sus coordenadas sobre un mapa digital de elevación para visualizar la topografía de la zona de estudio, posteriormente se trazan los perfiles muestreados en la Figura 5, en los que se proyectan los sondeos más cercanos a cada línea para llevar a cabo la interpolación de los datos de cada uno por medio del método Kriging y así obtener las secciones en las que se observan la distribución de las resistividades a profundidad en el subsuelo para su interpretación.

4.2.2. Marco hidrogeológico

Para determinar la calidad de agua en la Mixteca Poblana se realizó una campaña de muestreo en diferentes puntos de aprovechamientos como Pozos, Manantiales, Norias y cuerpos de agua superficiales. La recolección en total fue de 21 muestras (Anexo B), en los que se midieron parámetros in situ como pH, conductividad eléctrica, Oxígeno disuelto (OD), Potencial REDOX (ORP), Sólidos Totales Disueltos (SDT) y de la temperatura, con la ayuda del multiparámetro Hanna® Instruments HI9829-00041, así como la medición de la alcalinidad por medio de un kit test de prueba química modelo HI3811.

Posteriormente se almacenó muestras de agua en cuatro botellas de polietileno, una para aniones, cationes, elementos traza y materia orgánica, etiquetadas para su conservación y almacenamiento a no mayor a 4°C, las cuales fueron enviadas al Laboratorio de geoquímica (CGEO) de la Universidad Autónoma de México, campus Juriquilla, Querétaro; en donde se realizaron los análisis químicos de los datos de iones mayoritarios y elementos traza, los cuales para fines de esta tesis se utilizaron únicamente estos datos.

5. Resultados y discusión

5.1. Sección geológica-geofísica

Unidades geoelectricas

A partir del procesamiento de cada sondeo y sus modelos 1D, se elaboraron dos secciones geoelectricas, en las cuales se identificaron tres unidades, siendo dos de ellas subdivididas para una mejor interpretación. Los rangos de resistividad son variados, por lo que se clasificaron de acuerdo a como se describen en la Tabla 14.

Tabla 14. Unidades geoelectricas y rangos de resistividad.

Unidad	Intervalo resistivo (Ω/m)
U1a	2133 a 8000
U1b	294 a 2133
U2a	56 a 294
U2b	29 a 56
U2c	4 a 29
U3	56 a 1100

Perfil 1

El perfil 1 está orientado NW-SE y lo conforma diez sondeos (10, 11, 14, 4, 15, 20, 16, 19, 2 y 7) con una longitud de 33.5 km y una profundidad máxima de 650 m aproximadamente. Se puede observar que la unidad 1b se encuentra en los primeros 13 km con resistividades de 294 a 1533 Ohm/m y a partir de los 20 km vuelve a aparecer con resistividades de 294 a 2133 Ohm/m, su espesor vario alrededor de 100 a 150 m. La unidad 1a aflora en los 21 km por encima de la unidad 1b, con valores de resistividad mayores de 2133 a 8000 Ohm/m en la zona más elevada de la sección, extendiéndose hacia el sureste en los altos topográficos, con una resistividad máxima de 4131 Ohm/m, cerca del TEM18, se ubican las zonas con la elevación más baja de la sección, presentando resistividades altas, lo que puede estar relacionado a la litología que predomina en esa zona en particular.

La unidad 2a se muestra en todo el perfil con un espesor variable aproximado de 100 a 150 m, adelgazándose hacia el centro entre los 16-19 km, sus valores de resistividad son de 56 a 294 Ohm/m; la unidad 2b también se encuentra en casi todo el perfil, su rango de resistividad esta entre 29 a 56 Ohm/m con un espesor variable siendo más delgada

en la zona noroeste de 10 a 20 m aproximadamente. La unidad 2c se observa confinada por la unidad anterior, con valores de resistividad más bajos de 4 a 29 Ohm/m y un espesor máximo de 250 m en la zona centro.

Por último, la unidad 3 es la que subyace a las dos unidades anteriormente descritas, se puede ver en los primeros 22 km del perfil, donde su espesor máximo es de 400 m disminuyendo hacia el sureste, sus resistividades van de 56 a 1100 Ohm/m.

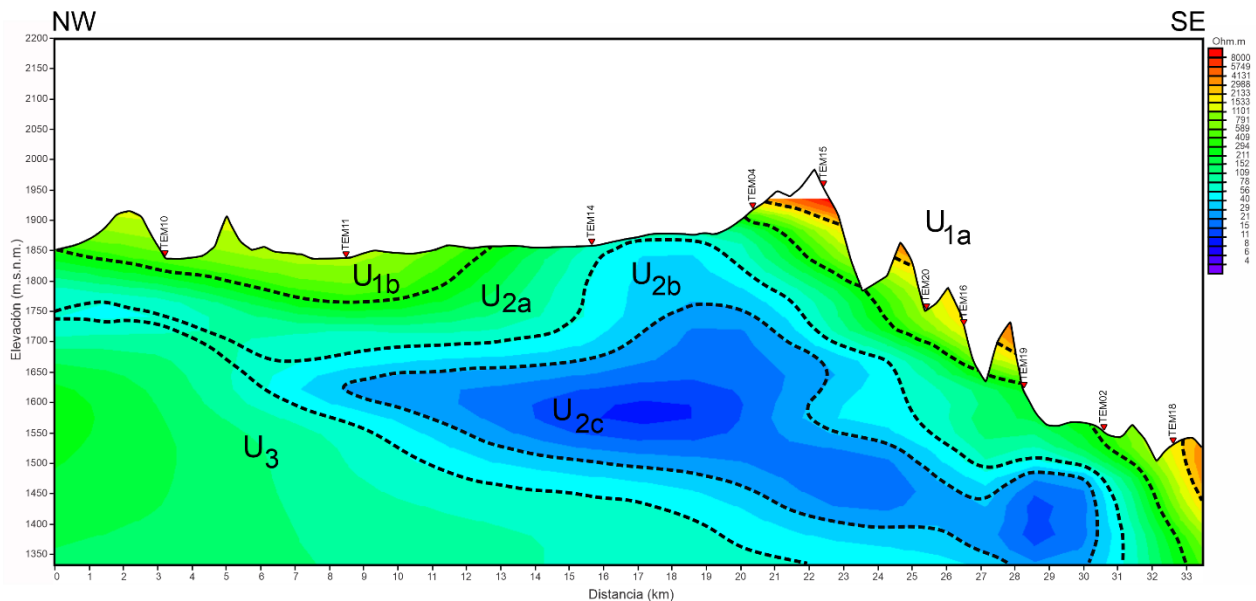


Figura 9. Perfil geoelectrico 1.

Perfil 2

El perfil 2 tiene una orientación W-E, conformado por ocho sondeos (21, 13, 14, 4, 5, 6, 23 y 7) con una longitud de 26.5 km y una profundidad máxima de 670 m aproximadamente; de acuerdo a la distribución de resistividades. La unidad 1a con valores de 2133 a 8000 Ohm/m se encuentra en la zona más elevada del perfil extendiéndose desde los 2.5 a los 7.5 km, su espesor aproximado es de 100 m adelgazándose hacia el este. Por otro lado, la unidad 1b, se encuentra dividida a lo largo de la sección, con un espesor variable aproximado de 25 a 50 m con resistividades de 294 a 2133 Ohm/m.

La unidad 2 tiene tres subdivisiones, la 2a se presenta en todo el perfil, con un espesor mínimo en la zona oeste, incrementando al este con un espesor aproximado de 100 m con valores de resistividad de 56 a 294 Ohm/m; por debajo de ella se encuentra la unidad

2b, la cual se observa a lo largo de todo el perfil, con un espesor variado de un mínimo de 20 m en la porción este y un máximo aproximado de 125 m en zona centro y este, el rango de resistividad que presenta es de 29 a 56 Ohm/m; la unidad 2c al igual que el perfil 1 se ubica en confinamiento por la unidad 2b al este, centro y oeste de la sección, con una resistividad menor de 4 a 29 Ohm/m.

Finalmente, la unidad 3 subyacente a las dos unidades anteriores, se extiende en todo el perfil, con un espesor mayor de 400 m y resistividades de 56 a 1100 Ohm/m.

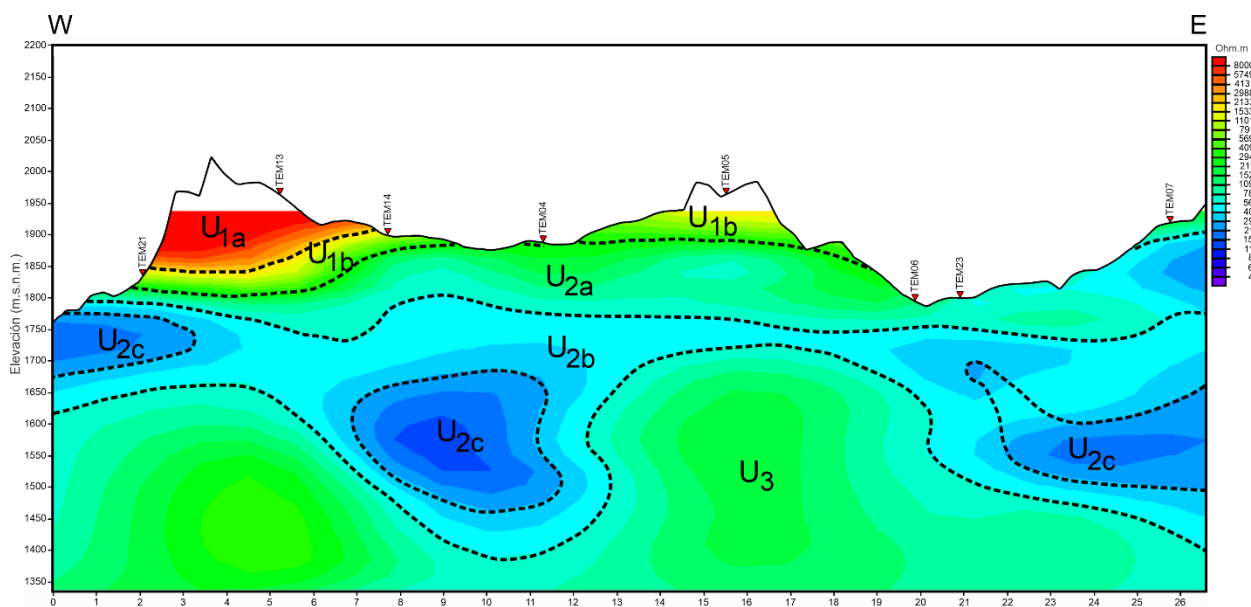


Figura 10. Perfil geoelectrico 2.

Correlación geofísica-hidrogeológica

De acuerdo con la información recopilada de la zona de estudio en cuanto a la geología, los valores de la distribución de las resistividades que se obtuvieron en el procesamiento de los datos y observaciones de campo, se asociaron las unidades geoelectricas de cada perfil con unidades geológicas.

Perfil 1

Para el perfil 1, los primeros 23 km se asociaron con caliza-dolomía, la cual tiene un espesor de 100 a un máximo de 180 m aproximadamente y conforme se desplaza al sureste se va adelgazando, sus valores de resistividad van de 50 a 8000 Ohm/m, lo que

puede estar relacionado a que en superficie se encuentra seca y a profundidad la roca retiene la humedad provocando que la resistividad sea menor.

La subyace otra unidad asociada con limolita-litarenita, con un espesor de 20 a 50 m en la parte noroeste, la cual va aumentando hacia el sureste con un máximo de 180 m, sus rangos de resistividad varía de 29 a 1300 Ohm/m, por lo cual las zonas más resistivas se encuentran insaturadas.

Por debajo, la subyace otra unidad a partir de los 6 km relacionada con arenisca-limolita, con un espesor variado de 100 m y un máximo de 320 m al sureste, esta unidad cuenta con potencial hidrogeológico, gracias a que se encuentra fracturada y fallada, con rangos de resistividad de 21 a 294 Ohm/m.

Otra unidad identificada es asociada con conglomerado-arenisca, que, por sus propiedades en cuanto a porosidad y permeabilidad, además de contar con un sistema de fallas, se infiere a una zona saturada de agua, con valores de resistividad bajos de 11 a 60 Ohm/m.

La unidad que subyace a todas las anteriores se asoció con el basamento metamórfico perteneciente al complejo Acatlán, que, por su composición mineralógica y poco permeable, su resistividad alcanza valores de resistividad de 70 a 1100 Ohm/m, su espesor máximo es de 400 m, adelgazándose al sureste.

En la parte sureste del perfil se identificaron otras tres unidades, una de ellas compuesta de material sedimentario como arenas, limos y litarenitas, con un espesor de 30 m y resistividades de 90 a 790 Ohm/m, la cual en zonas de baja resistividad son potencialmente a encontrar agua. Esta unidad separa a las rocas identificadas anteriormente, así como al Complejo Acatlán, con dos rocas de tipo ígneas intrusivas.

La primera se relacionó con granito-granodiorita, con un espesor aproximado de 50 m y con valores de resistividad entre 300 a 4100 Ohm/m; la otra unidad se asoció con gabro con un espesor de 30 m y con rangos de resistividad entre 130 a 300 Ohm/m. En ambos casos los valores altos de resistividad en los que se encuentran es debido a que cuentan con una baja porosidad por lo que tienen un bajo contenido de agua.

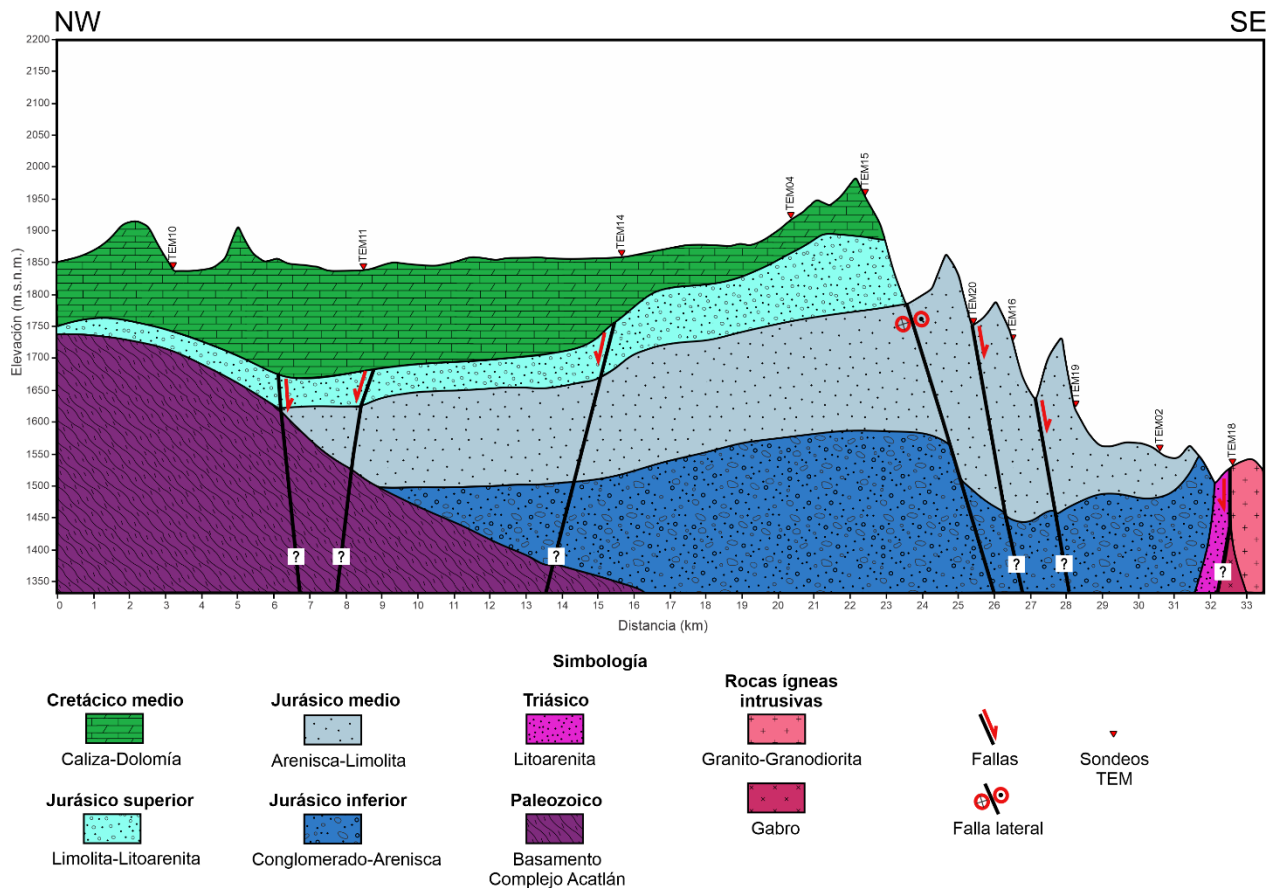


Figura 11. Sección geológica-hidrológica del perfil 1.

Perfil 2

En el perfil 2, a partir de los 2 hasta los 19 km se asociaron a caliza-dolomía, con un espesor variado de 80 m a un máximo de 250 m, la resistividad de esta unidad es de 70 a 8000 Ohm/m, en donde los valores de alto resistivo están relacionados a zonas insaturadas.

La subyace otra unidad asociada con limolita-litoarenita, la cual se extiende hasta los 19.5 km aproximadamente del perfil, con un espesor de 40 a 80 m aproximadamente, sus resistividades van entre 29 a los 300 Ohm/m, lo que puede intuirse que la roca tiene presencia de humedad.

Por debajo se ubica otra unidad subyacente asociada con arenisca-limolita, donde su espesor es variado con un mínimo de 25 m cercano al este, a un máximo de 180 m en la parte central de la unidad, su rango de resistividad esta entre 29 a 130 Ohm/m, por lo que se trata de una zona con potencial hidrológico.

La siguiente unidad se identificó como conglomerado-arenisca, entre los 2 y 15 km del perfil, en donde su espesor va de un máximo de 200 m, adelgazándose tanto en las zonas oeste y este, sus resistividades son menores entre 15 a 56 Ohm/m, por lo que en esta unidad podría estar la zona saturada de agua.

La unidad que subyace a toda la secuencia de las unidades anteriores se asoció de igual forma al basamento metamórfico del Complejo Acatlán, su espesor va de 250 a un máximo al Este de 400 m aproximadamente, de acuerdo a sus características poco permeables y su composición mineralógica, sus valores de resistividad oscilan entre 56 a 600 Ohm/m.

También se identificaron en las partes bajas de los altos topográficos depósitos aluviales, en los primeros 2 km de la sección con rangos de resistividad entre 20 a 150 Ohm/m con granos más gruesos y a los 19 km con resistividades de 120 a 200 Ohm/m con material más fino.

Por otro lado, en la parte Este, se distinguen otras unidades litológicas, en primer lugar, se asoció a rocas de tipo lutita-arenisca con un espesor variado entre 50 a 170 m aproximadamente con valores de resistividad de 56 a 220 Ohm/m, lo que significa que la roca se encuentra saturada.

La siguiente unidad identificada se relacionó a rocas de tipo lutita-caliza con un espesor entre 100 a 150 m, sus valores de resistividad oscilan entre 29 a 56 Ohm/m, lo que puede indicar una zona con potencial hidrológico.

Por debajo la subyace una unidad de arenisca-conglomerado con un espesor entre 100 a 230 m, con valores de resistividad entre 21 a 40 Ohm/m, donde se ubicaría la zona saturada de agua por los bajos resistivos presentes.

Por último, se asoció otro basamento relacionado al Complejo Oaxaqueño compuesto por ortogneis con un espesor de 150 a 230 m, con resistividades menores entre 56 a 200 Ohm/m.

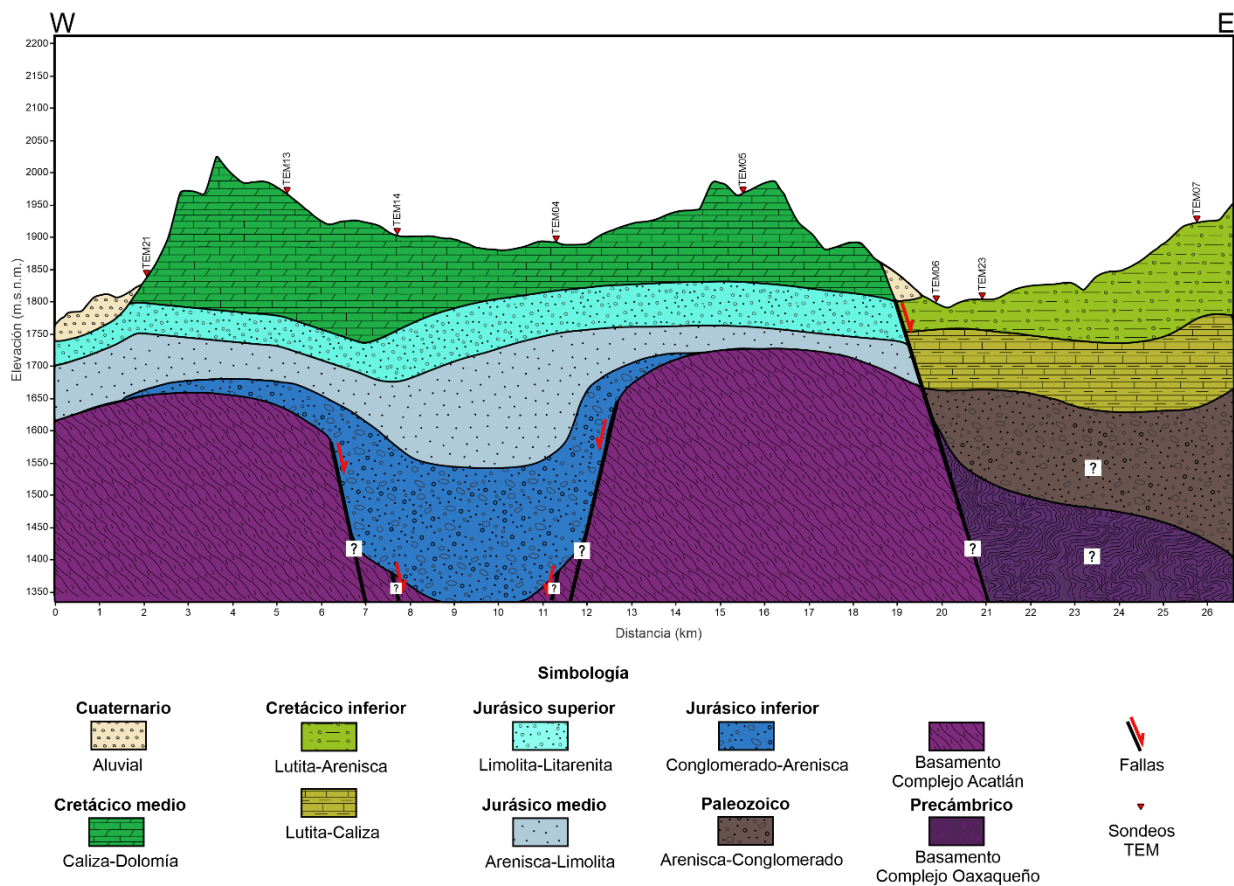


Figura 12. Sección geológica-hidrológica del perfil 2.

5.2. Índice de evaluación de vulnerabilidad acuífera

Profundidad del nivel estático (D)

Los resultados obtenidos para el parámetro de la profundidad del nivel estático muestran que en la parte suroeste se cuenta con aguas someras con profundidades que van de 0.2 a 17.09 m, al igual que en la parte norte en pequeñas zonas que se encuentra entre los rangos de 1.7 a 21.6 m, por lo que los valores de vulnerabilidad son altos de 10 y 9 en esas zonas. Por otro parte, se cuentan con valores medios de vulnerabilidad de 7 y 5 en el municipio de Coyotepec, al norte de San Juan Ixcaquixtla y una porción mínima en el centro de la cuenca con una profundidad variable entre 23.85 a 71.3 m. Caso contrario, existen zonas en la parte centro, sureste y una pequeña zona del norte donde la

profundidad del agua es mayor por lo que de acuerdo a la clasificación tienen valores bajos de riesgo a contaminación de 3 a 1 (Figura 13).

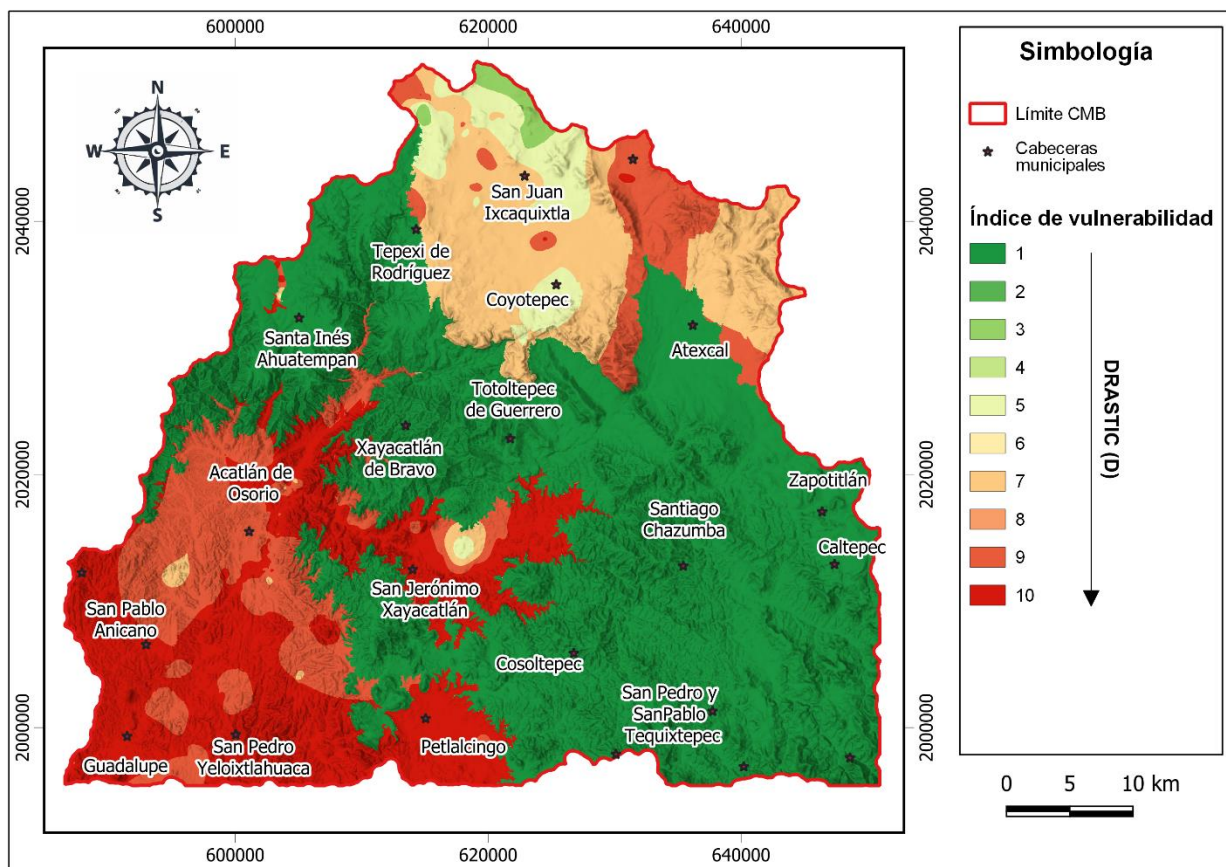


Figura 13. Mapa de la distribución espacial del índice de vulnerabilidad para el parámetro D.

Recarga neta (R)

Para el caso de este parámetro se hizo el cálculo del balance hídrico (Anexo C) en el cual se integran diferentes parámetros; a continuación, se describen los resultados obtenidos de cada uno para determinar la recarga neta total de la cuenca.

Balance hídrico

Precipitación

Entre el periodo medido de los años 1980 a 2022 la precipitación total anual acumulativo en la cuenca Mixteca Baja se encuentra entre rangos bajos a medios, derivado por las características de una zona semiárida con escasas lluvias.

En la zona centro y noreste se presentan las precipitaciones menores que van entre los rangos de 448 a 504 mm/año, siendo la mayor parte sitios de bajos topográficos, por otro lado, en la parte noreste y norte de la cuenca se registran las precipitaciones altas, siendo el norte por San Juan Ixcaquixtla y Tepexi de Rodríguez en donde las precipitaciones tienen una tasa mayor con un total de 730 mm/año (Anexo C, Figura 23a). La precipitación promedio de la CMB por medio de los polígonos de Thiessen y como resultado del mapa final de la precipitación es de un total de 547.7 mm/año (Anexo C, Tabla 15).

Evapotranspiración real

Para calcular la distribución espacial de la evapotranspiración real (ETR) por medio de la fórmula de Turc se contempló la información disponible de la precipitación y temperatura media de las estaciones meteorológicas (Anexo C, Tabla 15). Los valores mínimos oscilan de 432.4 a 501.4 mm/año ubicados al centro y noreste de la CMB, mientras que, al norte, noroeste y suroeste se encuentran los máximos valores entre 572.5 a 608.5 mm/año (Anexo C, Figura 23b).

Pendiente

La variación de las pendientes que predominan en la zona van desde leves a pronunciadas. En la parte norte y algunas áreas reducidas las pendientes son planas (0-5 %) a elevaciones pequeñas (6-10 %); por otro lado, el centro, sureste y zonas que delimitan los alrededores de la cuenca las pendientes son elevadas (>11 %), que corresponden a los distintos tipos de sierras que caracterizan al área (Anexo C, Figura 24a).

Índice de vegetación normalizada (NDVI)

Para este caso se muestran que existe una tendencia de escasez de vegetación propias de una zona semiárida en la parte suroeste y centro donde se ubican algunas zonas urbanas, a una vegetación media que cubre la mayor parte de la cuenca correspondiente a pequeñas áreas agrícolas y laderas de sierras poco pronunciadas. Finalmente, la vegetación densa es representada en áreas reducidas donde la agricultura es más frondosa y alrededor de las vertientes donde fluye el río (Anexo C, Figura 24b).

Coeficiente de escurrimiento

Como se había mencionado anteriormente, este parámetro está asociado por las características de la pendiente y la vegetación, ya que, si existe una cobertura de vegetación alta y una pendiente suave, permiten una infiltración favorable del agua al subsuelo, disminuyendo el escurrimiento y viceversa. Los valores altos de coeficiente de escurrimiento que van entre 0.415 a 0.520 se ubican principalmente al centro y suroeste, mientras que los valores bajos de 0.100 a 0.205 se observan a los alrededores que delimitan la cuenca, así como en la parte norte (Anexo C, Figura 24c).

Escurrecimiento superficial

Se observan valores bajos de 44.820 a 111.682 mm/año al noreste y pequeñas áreas al centro de la cuenca, así como otras zonas del norte, noroeste y sureste escurrecimiento superficial al norte, noroeste y sureste con valores que alcanzan los 178.544 mm/año, donde se ubican principalmente valles y zonas agrícolas. Por otro lado, los altos valores de 245.407 a 379.131 mm/año se encuentran al sur, sureste y suroeste, donde están las zonas de sierras altas del área (Anexo C, Figura 24d).

Recarga neta

Con los parámetros anteriores se obtuvo el cálculo de la recarga vertical (Anexo C, Figura 25), el cual muestra que la mayoría de la extensión del área presenta una recarga baja a nula, solo en algunas áreas específicas del norte, donde se ubica la zona agrícola presenta valores importantes de recarga que va de los 72 a 120 mm/año, esto puede ser debido en relación a que en estas áreas existen sistemas de riego para mantener los cultivos, por lo tanto, favorecen a que las entradas de agua en la recarga sea mayor.

En base a la Figura 25 del Anexo C, se realizó la clasificación de acuerdo a DRASTIC para el parámetro de la recarga neta por medio de la infiltración total, obteniendo que la mayoría del área su valor de vulnerabilidad es de 1, ya que presenta valores de infiltración por debajo de los 50 mm, por lo que la probabilidad que contaminantes superficiales alcancen a penetrar la zona freática sea baja. Por lo contrario, existe en la zona norte un índice de vulnerabilidad de 3 y 6 donde la precipitación, evapotranspiración y fugas provenientes de la zona agrícola favorecen a que las infiltraciones sean mayores.

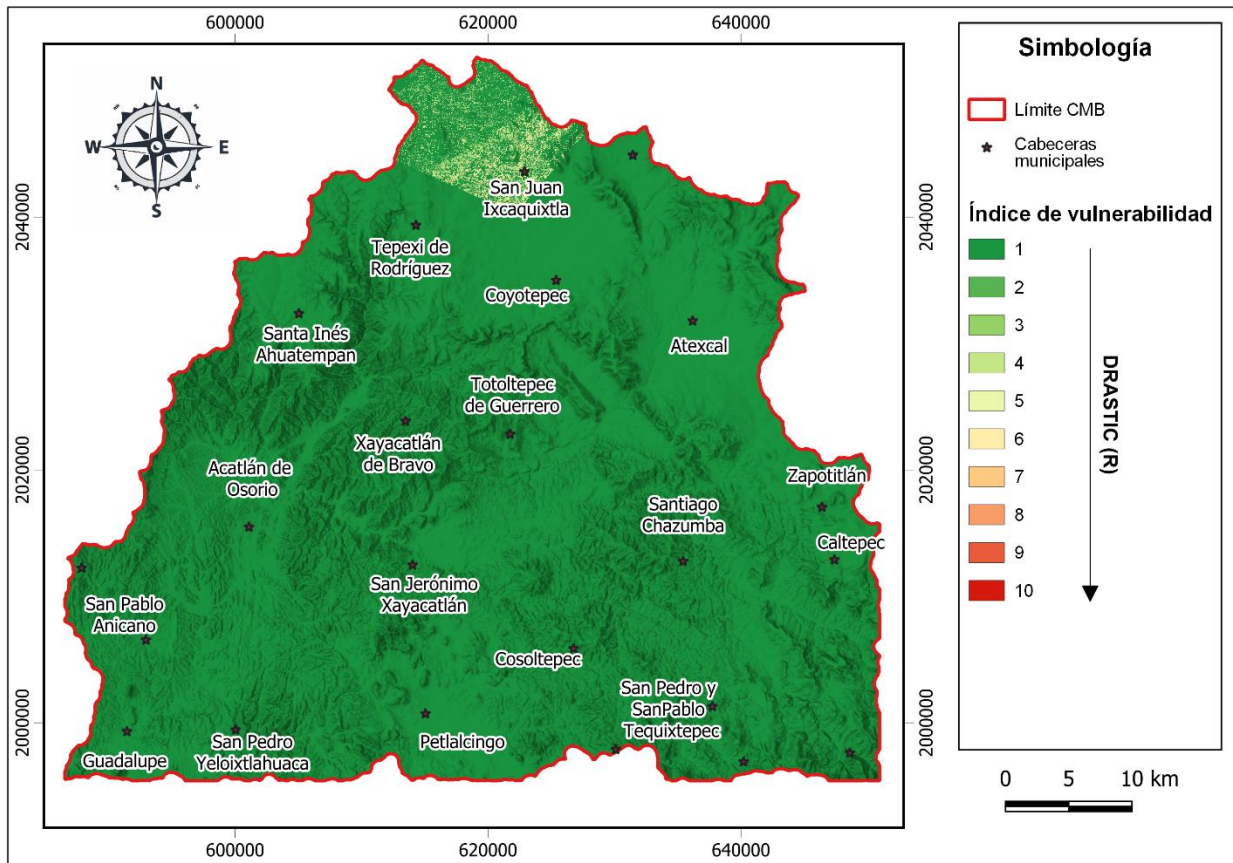


Figura 14. Mapa de distribución espacial del índice de vulnerabilidad para el parámetro R.

Medio acuífero (A)

De acuerdo a las características en relación a la litología presente, las zonas que pueden estar en riesgo menor a moderada a la contaminación se encuentran en la parte sur y sureste, así como porciones pequeñas al suroeste y noreste de la CMB, donde se ubican rocas de tipo sedimentario, metamórfico y de origen volcánico, siendo la mayoría pertenecientes a las formaciones que conforman al Complejo Acatlán, los valores van de 1 a 3 si estas no contienen alteraciones y de 4 a 5 en presencia de fallas y/o fracturas, facilitando el paso de contaminantes al interior de la cuenca. Las zonas en donde los valores son mayores de 6 a 7 son las más susceptibles a contaminarse, siendo rocas de tipo sedimentario como la caliza, dolomía, travertino, conglomerado y arenisca, además de depósitos aluviales con valores de 8 a 9.

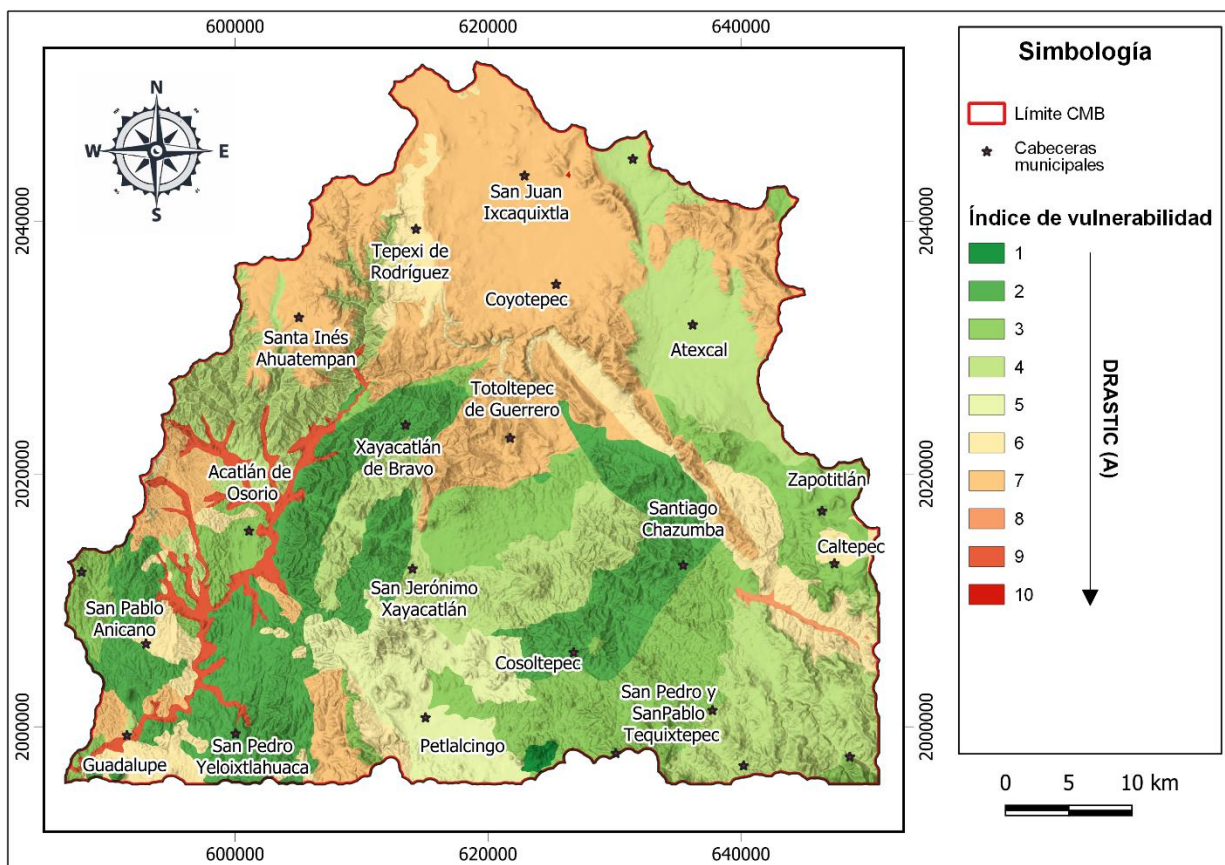


Figura 15. Mapa de distribución espacial del índice de vulnerabilidad del parámetro A.

Tipo de suelo y vegetación (S)

De acuerdo a la amplia variedad del uso del suelo que existe en la región, se muestran valores bajos entre 1 a 3 en áreas reducidas del noreste y sureste de la cuenca, donde están ubicadas las zonas urbanas y vegetaciones como arbustos y matorrales, lo que ayudan a una baja infiltración de los contaminantes por la infraestructura y la vegetación densa que actúan como una capa protectora del suelo. También existen valores moderados entre 4 a 6 en las partes centro, sur y suroeste donde hay presencia de bosques de pino y encino, así como selva del tipo caducifolia, donde debido a su cobertura vegetal y la porosidad que caracteriza a zonas de este tipo pueden existir un riesgo parcial de infiltración de contaminantes al subsuelo que podrían llegar en cierto tiempo a la zona saturada.

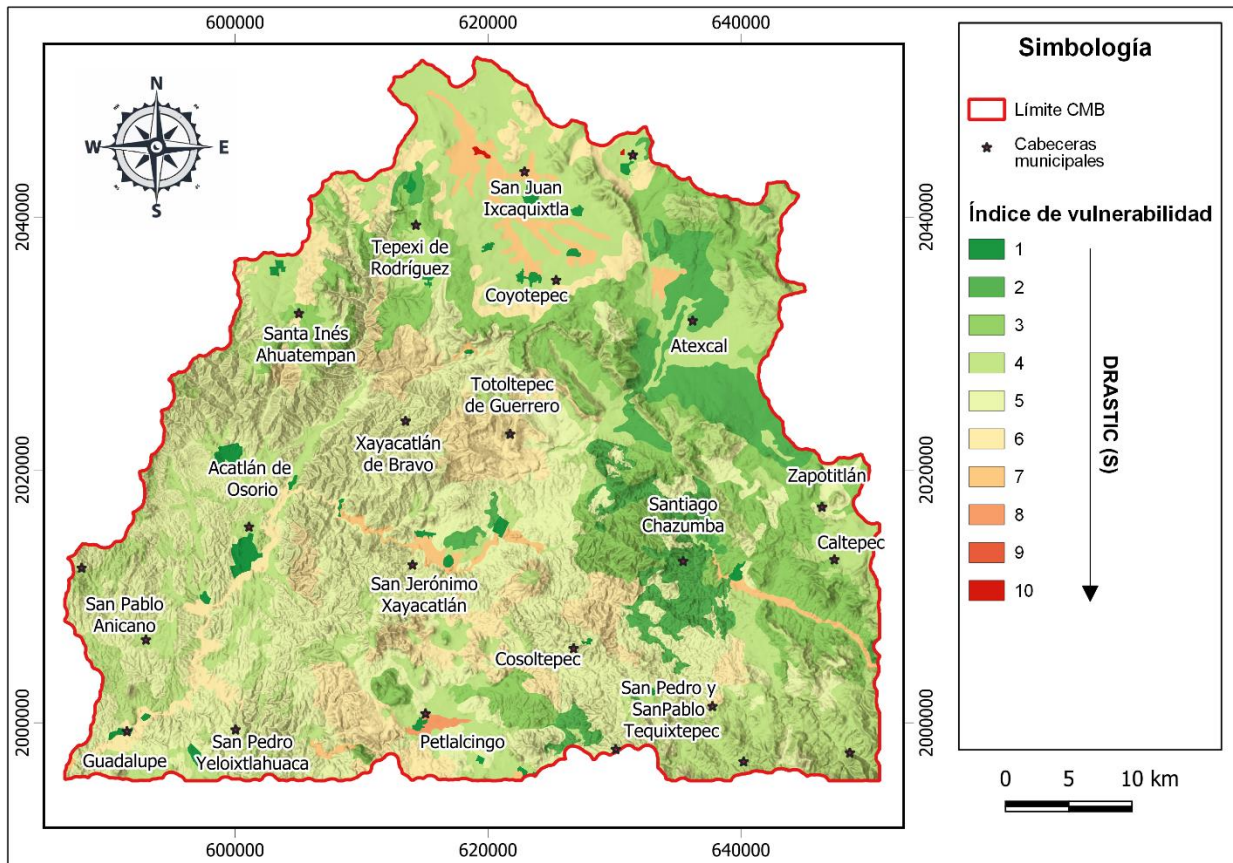


Figura 16. Mapa de distribución espacial del índice de vulnerabilidad para el parámetro S.

Gradiente topográfico (T)

En lo que respecta a la Mixteca Baja en cuanto a la topografía, se obtuvieron que las zonas centro, oeste y sureste la vulnerabilidad es menor con valores de 1 y 3, debido a que las pendientes presentes en esos lugares son del 18%, en ella predominan las sierras con cumbres y laderas en donde las variaciones topográficas en el terreno son moderadas a abruptas, es decir, con elevaciones altas. Para otra parte, en lo que respecta al norte, este y otras pequeñas zonas de la cuenca, la vulnerabilidad es mayor entre valores de 5 y 9, ya que se relacionan a zonas de baja pendiente con un 12 a 2% en donde de acuerdo a la fisiografía se encuentran terrenos de tipo llanuras y mesetas, donde su principal característica es que la superficie es relativamente plana a ser colinas pequeñas.

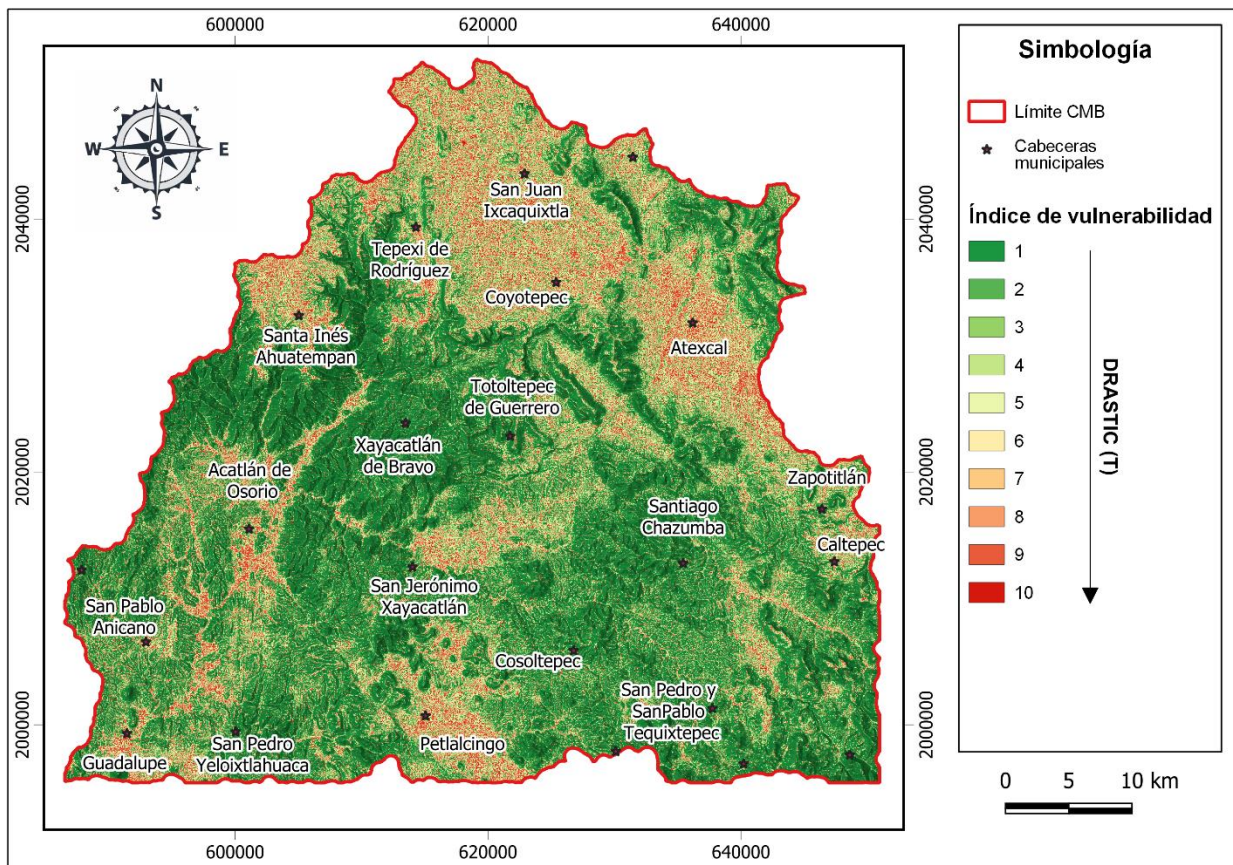


Figura 17. Mapa de distribución espacial del índice de vulnerabilidad para el parámetro T.

Impacto a la zona vadosa (I)

Para este caso, se muestra valores moderados a altos de vulnerabilidad entre 5 a 8 en áreas del norte, suroeste y zonas limitadas del sureste, donde el tipo de material es poroso y permeable, permitiendo la facilidad de movimiento de los contaminantes que traspasan la zona no saturada para llegar a la zona freática donde se almacenan y se mezclan con el agua subterránea.

Por otro lado, en el centro, sur y noroeste donde el material litológico es de tipo ígneo, metamórfico y sedimentario como arenisca y lutita los valores son bajos de 4 a 1, ya que son más compactos y su porosidad es moderada a baja en el caso de materiales volcánicos, lo que la infiltración de contaminantes puede ser de forma indirecta.

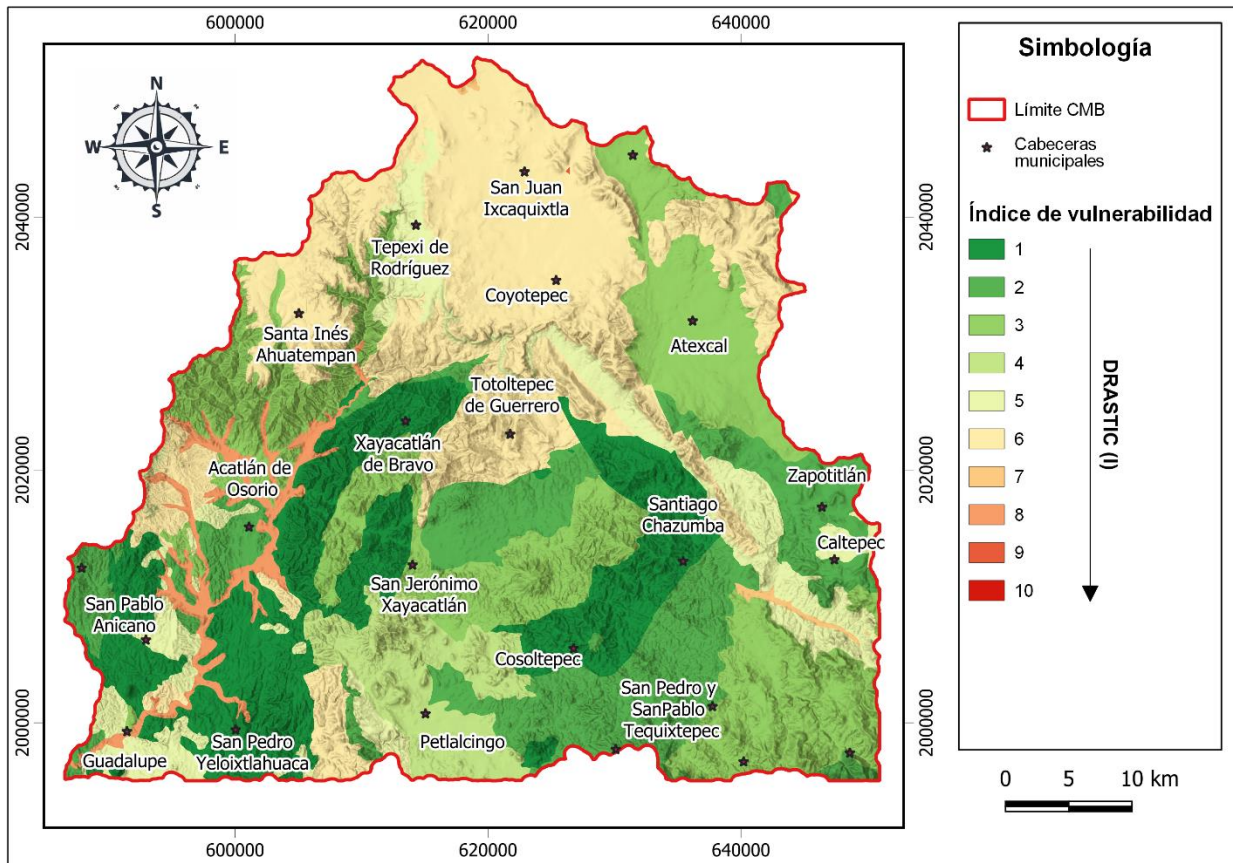


Figura 18. Mapa de distribución espacial del índice de vulnerabilidad para el parámetro I.

Conductividad hidráulica (C)

Los valores de vulnerabilidad para este parámetro se encuentran de medios a altos, de acuerdo al tipo de material litológico y su composición.

La mayor parte de extensión de la cuenca tiene un valor de 4 que corresponde a materiales metamórficos y sedimentarios consolidados por lo que su conductividad hidráulica es baja con posibilidad a ser moderada si estas se encuentran en un estado de poco a muy fracturados. Algunas zonas pequeñas del sur y sureste se encuentran valores de 5, correspondientes a materiales ígneos como tobas volcánicas y andesitas; en la parte norte y suroeste los valores aumentan de 9 a 10, donde la conductividad hidráulica puede tener valores medios por la presencia de materiales no consolidados que incluyen arenas, limos y gravas, además de presencia de cuerpos de agua.

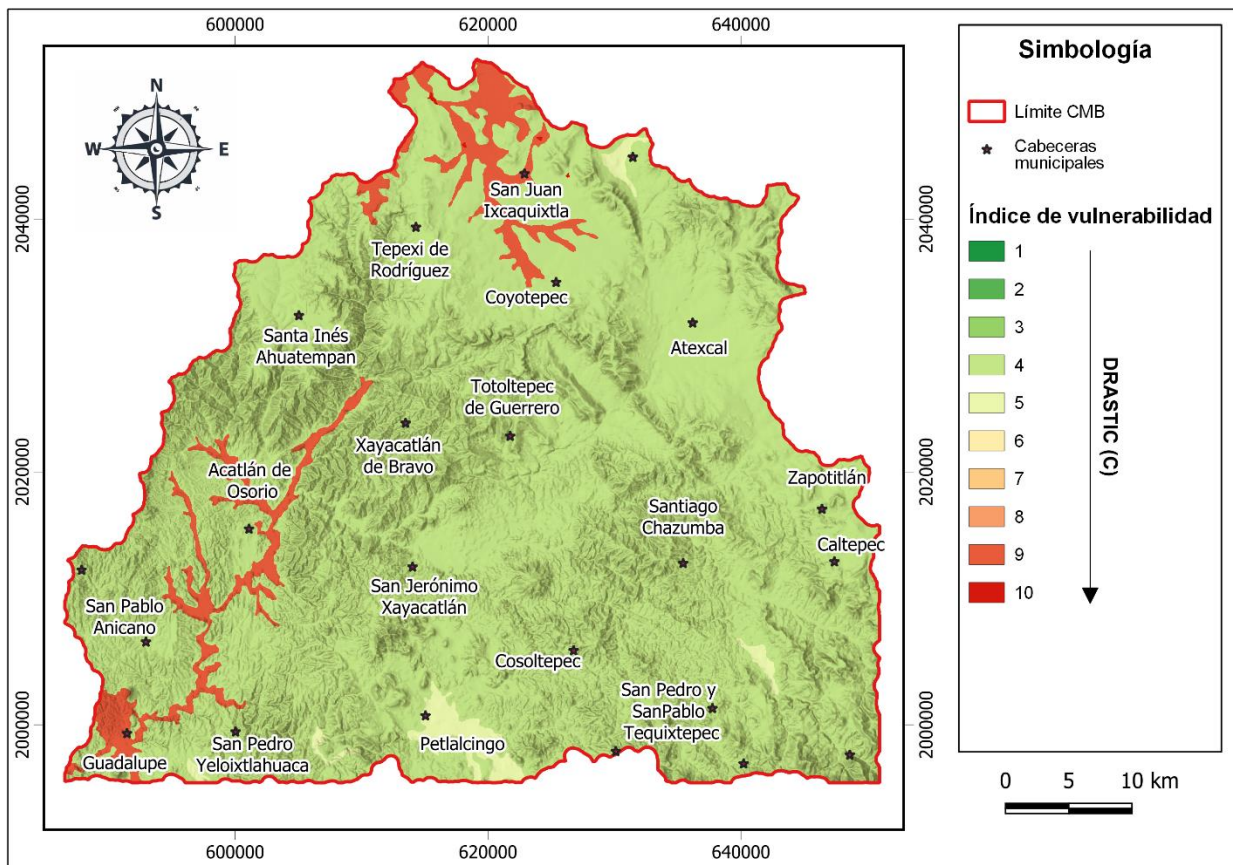


Figura 19. Mapa de distribución espacial del índice de vulnerabilidad para el parámetro C.

DRASTIC Y DRASTIC normalizado

Utilizando la ecuación 35 con las ponderaciones asignadas para cada parámetro de la metodología DRASTIC de la Tabla 1 se obtuvo el mapa de vulnerabilidad de la Cuenca Mixteca Baja, donde se muestra una distribución de valores que va desde un mínimo de vulnerabilidad de 34 a valor máximo de 174, como se mencionó anteriormente es necesario realizar la normalización de los valores para una mejor interpretación, dando como resultado que la mayor parte del área tiene muy bajos índices a estar en riesgo de contaminación con valores de 0 a 20 al sureste y una pequeña zona del noroeste, así como baja entre 20 a 40 al centro, suroeste, y áreas reducidas del noreste. Los valores intermedios de vulnerabilidad que están entre 40 a 60 y que alcanzan un riesgo elevado entre los 80 y por encima del 90 se ubican al norte principalmente y pequeñas zonas del sur, suroeste y noreste.

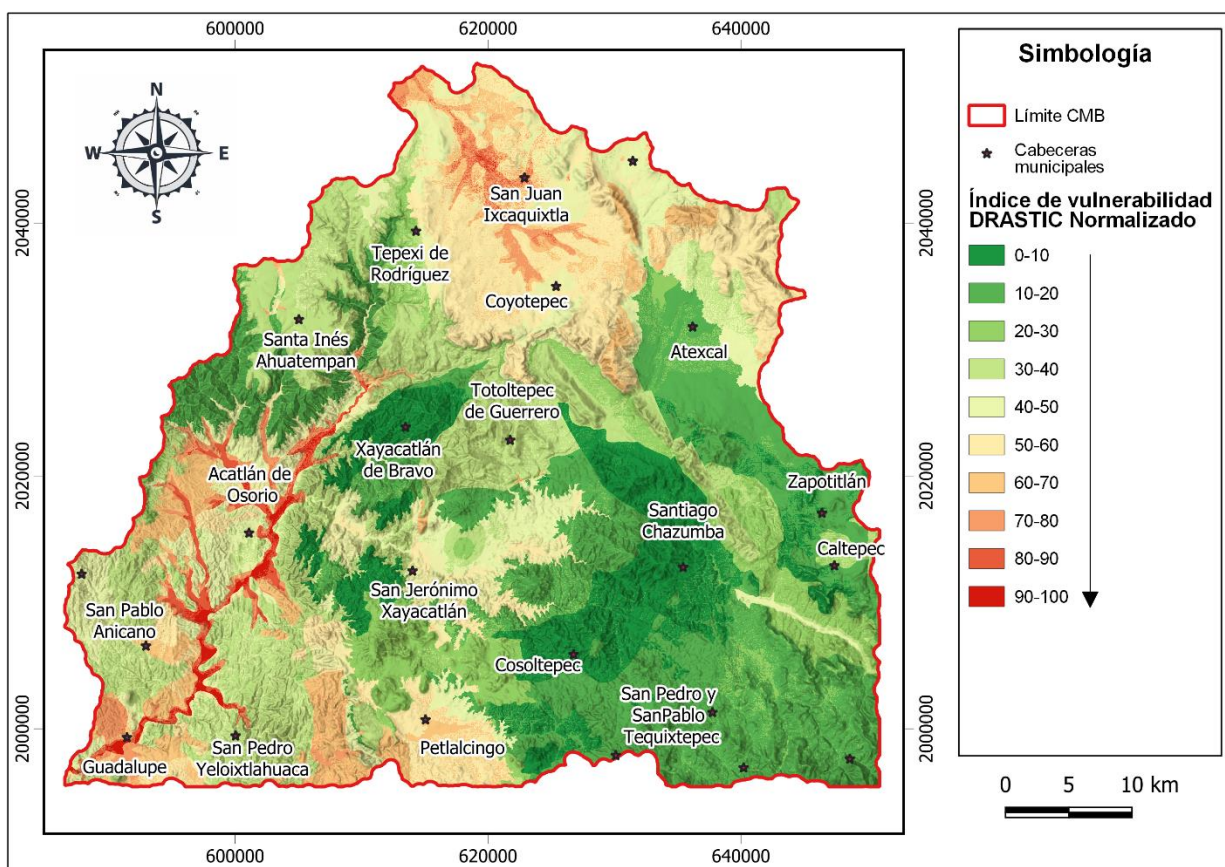


Figura 20. Mapa de la distribución espacial de vulnerabilidad DRASTIC normalizado.

5.3. Índice de Calidad de agua (ICA)

Los valores que se obtuvieron de acuerdo con la clasificación de calidad de agua de la tabla 12 en base a la información de las muestras de agua recaudadas, se hizo una correlación con los resultados que se reflejan en el mapa de vulnerabilidad acuífera normalizado (Figura 21). Con ello se puede observar que siete muestras presentan una calidad aceptable para su consumo con valores de 81 a 90, las cuales cuatro de ellas se ubican en zonas de baja a moderada vulnerabilidad, por otro lado, tres están en zonas donde la vulnerabilidad es alta entre rangos de 70 a 90, esto puede deberse que, aunque son aceptables, en un futuro pueden contaminarse si las condiciones de las características físicas del área cambian.

En cambio, las restantes muestras se comportan de ligeramente contaminadas con valores de 51 a 80 a estar contaminadas de 41 a 50; ubicándose en zonas donde el riesgo a la contaminación es elevado, a excepción de una de ellas que su valor es excesivo y

no es aceptable para su consumo que se encuentra en una zona de baja vulnerabilidad, estas condiciones pueden estar relacionadas con lo que se observa en la Figura 1, con respecto al diagrama de Tóth, en donde esta zona su flujo del agua subterránea es de tipo regional, por lo que su recarga de agua proviene desde la zona más alta, provocando que contaminantes como sales, minerales y demás compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden derivar de los Solidos Totales Disueltos (STD) entren en interacción con el medio geológico durante su recorrido para concentrarse finalmente en la parte de descarga del flujo, por lo que el agua ya presenta condiciones de contaminación en esa zona.

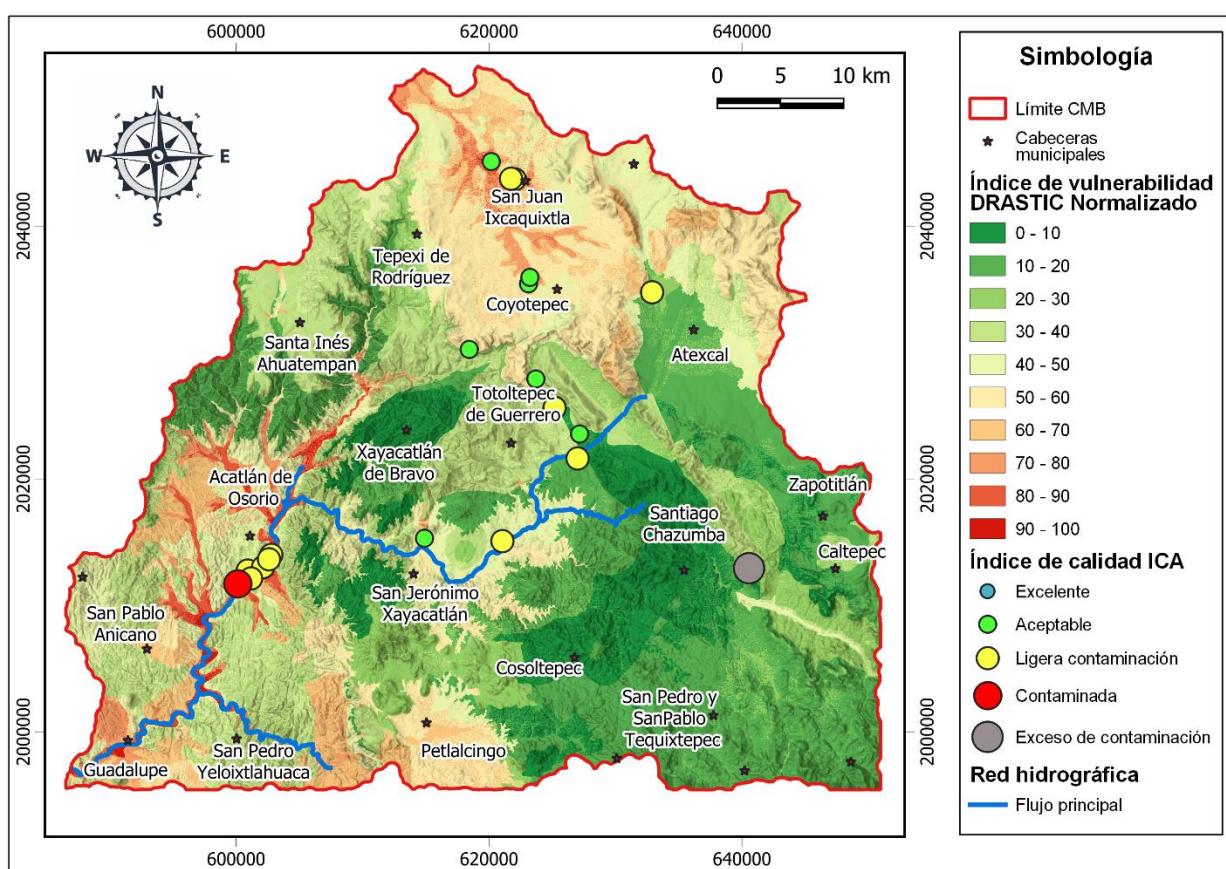


Figura 21. Correlación entre el Índice de calidad ICA y DRASTIC normalizado.

5.4. Índice de contaminación (ICON)

De igual forma que en el caso anterior para ICA, también se realizó una correlación con los resultados obtenidos en la metodología DRASTIC normalizado con los valores de las muestras evaluadas con el índice de contaminación ICON (Figura 22).

La mayoría de las muestras presentan valores de contaminación baja de -1.70 a -13.37, en zonas que presentan un grado bajo a la vulnerabilidad, por otra parte, en donde las muestras tienen una alta contaminación entre 3.87 a 20.73 están en áreas de igual índice alto de vulnerabilidad, las excepciones están en áreas donde la vulnerabilidad es alta y su índice es bajo y viceversa; esto se relaciona con los valores de los elementos traza que se consideran para evaluar ICON, por lo que pueden tener valores altos de Aluminio (Al), Cobre (Cu), Magnesio (Mg), Bario (Ba), Hierro (Fe), etc., derivados de las características físicas del área como el medio geológico y tipo de suelo, además de fuentes puntuales externos de contaminación que son conducidos a otras zonas por los flujos de agua subterránea que predominan.

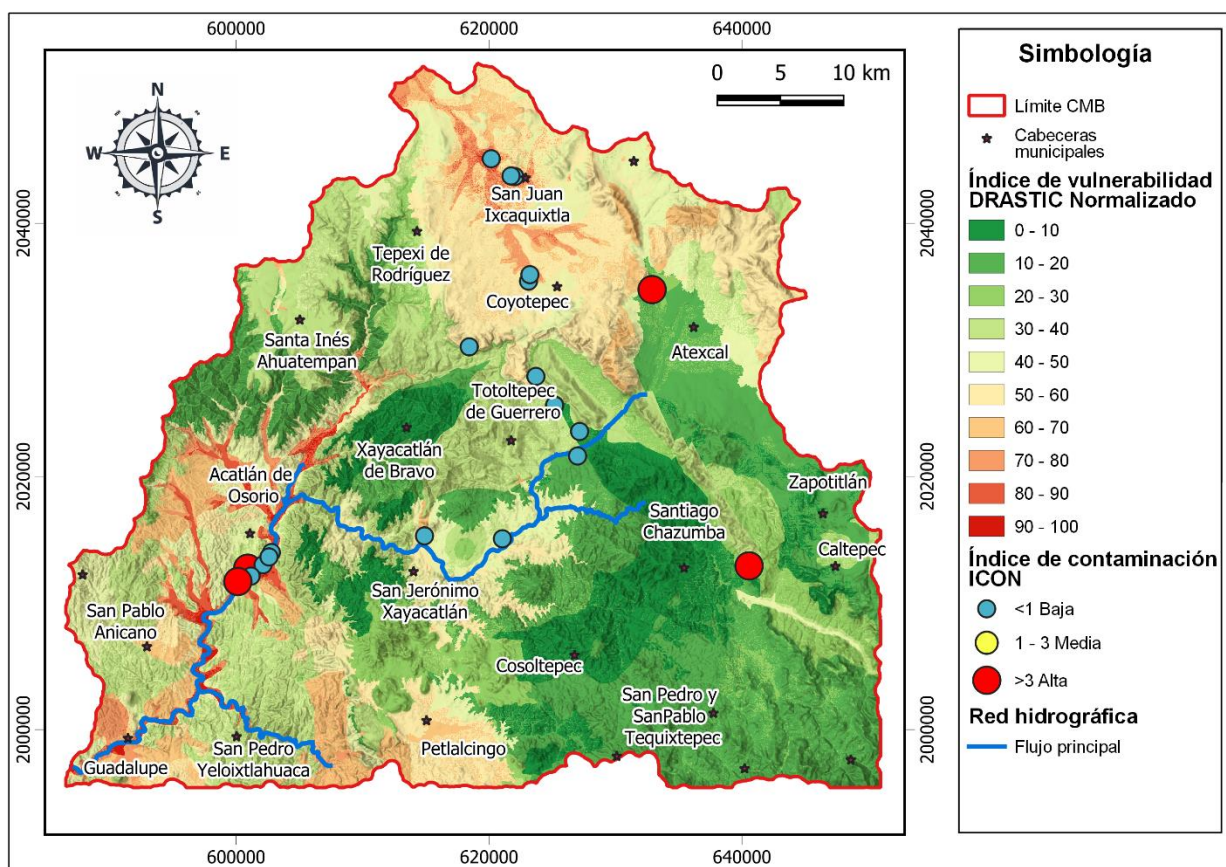


Figura 22. Correlación entre el índice de contaminación ICON y DRASTIC Normalizado.

6. Conclusiones

Con base a los resultados obtenidos y retomando la hipótesis planteada, la aplicación de la metodología DRASTIC modificada para adaptarse a las características de una zona semiárida, identificó áreas vulnerables a presentar contaminación del agua subterránea, siendo principalmente al norte, suroeste y otras pequeñas zonas del sur y centro, donde los valores son altos (50 - 95) cubriendo el 40% de la cuenca, mientras que el 60% restante presenta vulnerabilidad moderada a baja (0-50).

Los parámetros con mayor repercusión en la vulnerabilidad son el medio acuífero y el impacto a la zona vadosa con valores altos, principalmente al norte y suroeste de la cuenca. Esto se debe por la litología de tipo sedimentario y material no consolidado, que, por sus características en cuanto a porosidad, permeabilidad y la presencia de fallas, favorecen el paso de contaminantes al interior del sistema acuífero.

Por otro lado, la profundidad del nivel estático también es uno de los parámetros con mayor peso en los resultados de la vulnerabilidad final, con valores moderados a altos, debido a que alrededor del 95% de los pozos ubicados en la zona son superficiales a poco profundos.

Los sistemas de información geográfica (SIG) en el balance hídrico permitieron la integración y visualización de la distribución espacial de los componentes que afectan el equilibrio entre las entradas y salidas del agua al sistema, identificando un déficit del 90% en el área, donde el clima semiárido limita casi por completo la recarga en la cuenca.

La tendencia que presentan al alza en la tasa de susceptibilidad a los contaminantes en zonas comunes de los parámetros evaluados, están relacionados al uso de suelo como la agricultura al sur y norte (San Juan Ixcaquixtla, Coyotepec y Petlancingo), zonas urbanas importantes (Acatlán de Osorio) y zonas de elevación baja al suroeste, donde recorre el cauce principal del río Acatlán.

La adaptación en la metodología original en el empleo de datos de uso de suelo y vegetación en lugar de la edafología, es por la falta de información detallada y actualizada de los tipos de suelo, sin embargo, esto no afecta el enfoque de estimar las características del suelo en cuanto a la infiltración de los contaminantes.

Los sondeos TEM permitieron conocer la litología en el subsuelo, identificando cambios de material y espesores, así como localizar zonas potenciales de extracción de agua subterránea para comunidades con escaso abastecimiento. Además, los resultados complementan la evaluación de la vulnerabilidad acuífera en los parámetros que involucran rasgos geológicos como lo son el medio acuífero, el impacto a la zona vadosa y la conductividad hidráulica.

Respecto con las muestras de agua tomadas en la región, el análisis de calidad (ICA) mostró que el 34% de ellas están de excelente a aceptable calidad, el 62% de ligera a contaminada y solo el 5% no es apta para consumo. Por otra parte, para ICON, el 81% presento valores negativos con una baja o nula contaminación y el resto se encuentra contaminada.

7. Recomendaciones

En base a lo mencionado en el desarrollo de la investigación y los resultados, se hacen las siguientes recomendaciones:

Poner en práctica medidas de protección para la preservación del agua subterránea en zonas detectadas con alta vulnerabilidad, además de un sistema de control de purificación adecuado para garantizar su consumo salubre a la población.

La limitada cobertura de estaciones meteorológicas en zonas semiáridas en México dificulta el cálculo del balance hídrico y por consiguiente a la evaluación de la Recarga neta, por lo que se recomienda el uso de imágenes satelitales CHIRPS (Grupo de Riesgos Climáticos, Precipitación Infrarroja con Datos de Estación) como complemento para obtener datos climáticos en áreas donde la información es escasa o inexistente.

Llevar acabo un monitoreo y actualización de la información piezométrica donde se incluya pruebas de bombeo para realizar un reajuste en los resultados de la conductividad hidráulica analizada de manera general por la información geológica y aprovechamiento de aguas subterráneas, además de las profundidades del nivel estático para detectar zonas en riesgo e implementar medidas adecuadas para su conservación.

Extensión de la exploración geofísica para caracterizar las demás litologías presentes en el área, lo que puede ayudar a detectar posibles zonas de interés para la extracción del agua subterránea en zonas urbanas.

Referencias bibliográficas

Aller L., Bennett T., Lehr J.H., Petty R.J. & Hackett G. (1987). Drastic: A Standardized System For Evaluating Ground Water Pollution Potencial Using Hydrogeologic Settings. Ada, Oklahoma: U.S. Environmental Protection Agency.

Almanza O.G. (2015). Índices de calidad del agua y vulnerabilidad acuífera de un Sistema hidrogeológico: caso valle de San Luis. (Tesis de maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí.

Auge M. (2004). Vulnerabilidad de acuíferos, conceptos y métodos. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires.

Backman, B., Bodiš, D., Lahermo, P., Rapant, S., y Tarvainen, T. (1998). Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. Environmental Geology, 36 (1-2), 55-64. DOI <https://doi.org/10.1007/s002540050320>

BCN. (2016). Calidad del Agua. Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones. Recuperado de <https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/23747/2/Calidad%20del%20Agua%20Final.pdf>

Belmonte S., Campos J.O. Y Herrera J. (2003). Determinación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Etla, Oaxaca, México. Revista Geofísica, 59, 19-32.

Cabrera Y.G. (2023). Evaluación de la intrusión salina utilizando el método electromagnético transitorio (TEM) y análisis de iones mayores e isótopos estables del agua en el acuífero La Misión, B.C., México. (Tesis de maestría). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, Baja California.

Campos-Aranda D.F. (1998). Procesos del ciclo Hidrológico. (3 Ed.). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, San Luis Potosí, México.

Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED. (2009). Atlas de Riesgo del estado de Puebla. Cobertura de Atlas estatales. Recuperado de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-estatales.html>

Chow V.T., Maidment D.R. y Mays L.W. (1996). Hidrología Aplicada. Bogotá, Colombia. McGraw Hill.

Christensen N.B. y Soren M.T. (1998). Surface and borehole electric and electromagnetic methods for hydrogeological investigations. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol. 3, 75-90.

Collazo M.P., Montaña J. (2012). Manual de Agua Subterránea. Montevideo, Uruguay, (1 Ed.). Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (M.G.A.P.).

CONAGUA. (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ixcaquixtla (2106), Estado de Puebla, México. Reporte técnico. Recuperado de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/puebla/DR_2106.pdf

Conesa F. (1993). Guía metodológica para la evaluación del Impacto Ambiental. Ediciones Mundi Prensa.

Constable S.C., Parker K.L. y Constable C.G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. Geophysys. Vol. 52, 289-300. DOI <https://doi.org/10.1190/1.1442303>

Dinius, S. H. (1987). Design of an Index of Water Quality. Water Resources Bulletin, Vol. 23, No. 11, 833-843. DOI <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1987.tb02959.x>

DOF. (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 Agua para el uso y consumo humano, límites permisibles de calidad de agua. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0

Douglas S.H., Dixon B., Griffin D. (2018). Assessing the abilities of intrinsic and specific vulnerability to groups of similar pesticides: a comparative study. Physical Geography, 39 (6), 487-505. DOI <https://doi.org/10.1080/02723646.2017.1406300>

Fitterman D.V. y Steward M.T. (1986). Transient Electromagnetic Sounding for Groundwater. Geology Faculty Publications, Geophysics, Vol. 5, 995-1005. DOI <https://doi.org/10.1190/1.1442158>

Flores-López H.E., Ramírez-Vega H., Byerly-Murphy K.F., Ruiz-Corral J.A., Martínez-Sifuentes J.A., Díaz-Mederos P. y Alemán-Martínez V. (2003). Estimación de

escurrimiento superficial en la Cuenca el Jihuete, México. *Tierra Latinoamericana*, Vol. 21 (3), 389-400.

French R. (2002). *Time-Domain Electromagnetic Explotation*. Northwest Geophysical Associates, Geophysical Services.

García L.A. (2023). *Apuntes de Hidrogeoquímica*. Universidad Nacional Autónoma de México. 1 Ed. Recuperado de <https://www.ingenieria.unam.mx/publicaciones/libros/index.php>

Gencat. (s.f). *Métodos numéricos*. Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña. Recuperado de <https://www.icgc.cat/es/Ambitos-tematicos/Geofisica-aplicada/Tecnicas/Metodos-numericos>

Gogu y Dessarges. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Enviromental Earth Sciencies*, Vol. 39 (6), 549-559. DOI <https://doi.org/10.1007/s002540050466>

González A. (2011). *Determinación de los sistemas de flujo del agua subterránea y caracterización de sus componentes en regiones desérticas: el caso de Loreto, Baja California Sur*. (Tesis de Doctorado). Centro de Investigaciones Biológicas del noroeste S.C., La Paz, Baja California Sur.

González C. (1974). *Phylloceras del Cretácico inferior de San Juan Raya-Zapotitlán, Estado de Puebla*. Méx. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, XXV, 29-37.

Gutiérrez H.P. y De La Vara R. (2008). *Análisis y Diseño de experimentos*. McGraw-Gill, 2 Ed., México.

Hernández E. (2018). *Elaboración de una excursión geológica-turística para el museo comunitario de Los Reyes Metzontla en la Reserva de la Biosfera Tehuacán- Cuicatlán, estado de Puebla*. (Tesina de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Hernández J. y Morales F. (2002). *Geología metamórfica del Complejo Acatlán y su cobertura Paleozoica, del área de San Miguel Las Minas-Patlanoaya-Ahuatlan, estado de Puebla*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

INEGI. (1983a). Conjunto de datos vectoriales de la carta de aguas subterráneas. Escala 1:250 000. Serie I. Cuernavaca. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825681364>

INEGI. (1983b). Conjunto de datos vectoriales de la carta de aguas subterráneas. Escala 1:250 000. Serie I. Orizaba. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825681371>

INEGI. (2000). Síntesis geográfica del estado de Puebla. Aguascalientes, México.

INEGI. (2001). Conjunto de datos vectoriales. Continuo Nacional. Serie I. Sistema de topoformas. Escala 1:1 000 000. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267582>

INEGI. (2004). Síntesis geográfica del estado de Oaxaca. Aguascalientes, México.

INEGI. (2006). Red Hidrográfica digital de México. Escala 1:250 000. Edición 1. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598428>

INEGI. (2008). Conjunto de datos vectoriales. Escala 1:1 000 000. Unidades climáticas. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>

INEGI. (2021a). Diccionario de datos de climas. Aguascalientes, México.

INEGI. (2021b). División política municipal. Escala 1:250 000. CONABIO. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

INEGI. (2021c). Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Continuo Nacional. CONABIO. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP). (2001). Edafología. Escala 1:1 000 000. CONABIO. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Kirsch R. (Ed). (2006). Groundwater Geophysics a tool for Hydrogeology. Berlín, (2 Ed.). Springer.

Martínez de Bascaran, G. (1979). Establecimiento de una metodología para conocer la calidad del agua, Boletín Informativo del Medio Ambiente, 9: 30-51.

Martínez-Bastida, J. J., Arauzo M. y Valladolid M. (2010). Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. *Hydrogeology Journal*, 18 (3), 681-698. DOI <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-009-0549-5>

Menke W. (2018). *Geophysical Data Analysis, Discrete Inverse Theory*. Academic Press. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=OG89DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=menke+w.+2018&ots=92bGsOeSED&sig=dzqBRHqq3sgvbJSpcs6x165a4qA#v=onepage&q=menke%20w.%202018&f=false>

Morales Yáñez A. (2014). *Estudio Paleoambiental de la Formación Magdalena en Chazumba, Oaxaca. (Tesis de Licenciatura)*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Nabighian M.N., Macnae J.C. (1991). Time domain electromagnetic prospecting methods. En: Nabighian M.N. (Ed.). *Electromagnetic Methods Applied to Geophysics*. Vol. 2, pp. 453-458. Recuperado de <https://books.google.com.mx/books?id=Ec3eYTppHikC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Ocampo-Fletes I. & Villarreal-Manzo L.A. (2014). Recursos hídricos, movilidad social territorial para su aprovechamiento y derecho humano al agua en comunidades de la mixteca baja de Puebla, México. *Ambiente y Desarrollo*, Vol. 18 (35), 55-69. DOI <https://doi.org/10.11144/Javeriana.AyD18-35.rhms>

Orozco M.G., Martínez J.O., Figueroa A. y Davydova V. (2020). Environmental Health Diagnosis in a Park as a Sustainability Initiative in Cities. *Sustainability*, 12 (16), 6436. DOI <https://doi.org/10.3390/su12166436>

Padilla-Reyes D., Nuñez-Peña E., Escalona-Alcázar F. y Bluhm-Gutiérrez J. (2012). Calidad del agua del acuífero Guadalupe-Bañuelos, Estado de Zacatecas, México. *Geos*, Vol. 32 (2).

Patel P., Mehta D. y Sharma N. (2022). A review on the application of the DRASTIC method in the assessment of groundwater vulnerability. *Water Supply*, Vol. 22 (5), 5190-5205. DOI <https://doi.org/10.2166/ws.2022.126>

Pedraza A.C. (2018). Vulnerabilidad del agua subterránea al Poniente de la Ciudad de Morelia, Michoacán. (Tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia.

Ramos-Leal J.A. (1989). Estratigrafía y evolución paleoambiental del área de San Juan Ixcaquixtla, edo. de Puebla. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Ramos-Leal J.A. (2002). Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e Impacto Ambiental: caso Río Turbio, Guanajuato. (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Ramos-Leal J.A. (2005). Curso de vulnerabilidad acuífera e índices de calidad de agua, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), San Luis Potosí.

Rubio H., Ortiz R.C., Quintana R.M., Saucedo R.A., Ochoa J.M. y Rey N.I. (2014) Índice de calidad del agua (ICA) en la Presa la Boquilla en Chihuahua, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 1(2), 139-150.

Ruiz D. (2010). Estudio Geofísico para la evaluación hidrogeológica de una zona del acuífero Alfajayucan-Chapatongo. (Tesis Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

Sánchez J.L. (2008). Estratigrafía, sedimentología y análisis de procedencia de la Formación Tecamate y su papel en la evolución del Complejo Acatlán, Sur de México, (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Schwab G. (1990). Ingeniería de conservación de suelos y aguas. Limusa.

SEMARNAT. (2013). Indicadores de calidad del agua, Compendio de Estadísticas Ambientales. Recuperado de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2013/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html

Sendrós A., Cabrera M. de C. y Casas-Ponsatí A. (2025). Application of Geophysical Methods for Hydrogeology. Water, Vol. 17(1), 98. DOI <https://doi.org/10.3390/w17010098>

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2024). Estaciones meteorológicas. CONAGUA. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

SGM. (1998). Carta geológico-minera Acatlán de Osorio E14-B83. Escala 1:50 000.

SGM. (2009). Carta geológico-minera Huajuapán de León E14-D14. Escala 1:50 000.

SGM. (2012). Carta geológico-minera Atzumba E14-B85. Escala 1:50 000.

SGM. (2017). Carta geológico-minera Petlalcingo E14-B84. Escala 1:50 000.

SGM. (2018a). Carta geológico-minera San Juan Ixcaquixtla E14-B74. Escala 1:50 000.

SGM. (2018b). Carta geológico-minera Tehuitzingo E14-B73. Escala 1:50 000.

SGM. (2023). Carta geológico-minera Tehuacán E14-B75. Escala 1:50 000.

SGM. (s.f.a). Unidad Chazumba. Léxico Estratigráfico de México. Recuperado de https://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/#

SGM. (s.f.b). Unidad Coatzingo. Léxico Estratigráfico de México. Recuperado de https://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/#

SGM. (s.f.c). Unidad Huajuapán. Léxico Estratigráfico de México. Recuperado de https://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/#

SGM. (s.f.d). Unidad Xayacatlán. Léxico Estratigráfico de México. Recuperado de https://www.sgm.gob.mx/Lexico_Es/#

Thiessen A.H. (1911). Precipitation averages for large areas. Monthly Weather Review, 39 (7), 1082-1089. DOI [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1911\)39%3C1082b:PAFLA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1911)39%3C1082b:PAFLA%3E2.0.CO;2)

Tóth J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes and manifestations. Hydrogeology Journal, Vol. 7(1), 1-14. DOI <https://doi.org/10.1007/s100400050176>

Turc L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. Ann. Agron, Vol. 12 (1), pp. 13-49.

Vargas-Quintero M.C. (2010). Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá, Colombia.

Vélez M.V. y Vásquez M.L. (2004). Métodos para determinar la recarga de acuíferos. Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7964>

Ward S.H. y Hohmann G.W. (1988). Electromagnetic theory for geophysical applications. En: Nabighian M.N. (Ed.). Electromagnetic Methods Applied to Geophysics, Capítulo 4, pp. 132-138.

Wenner J. (1996). Introducción a la Hidrogeología. (1 Ed.). Universidad Autónoma de Nuevo León.

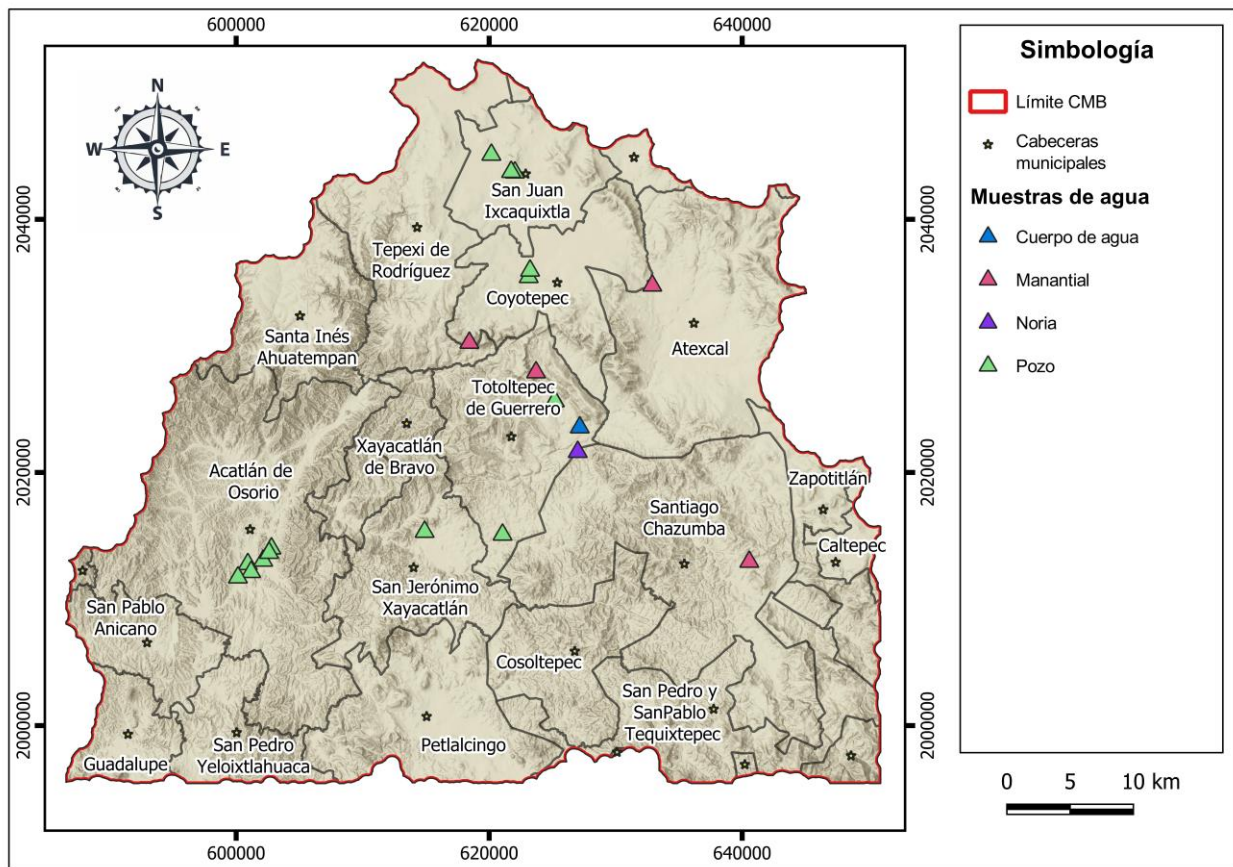
Yañez R.A. (2017). Análisis interpretativo del recurso hídrico utilizando el método transiente electromagnético en el dominio del tiempo en la cuenca del Río Limarí, IV Región de Coquimbo, Chile. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Concepción.

Anexos

Anexo A. Coordenadas de los sondeos electromagnéticos en UTM zona 14N.

No.	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)	No.	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m)
TEM01	613527	2052643	2005	TEM14	620970	2037548	1897
TEM02	625362	2023273	1528	TEM15	623484	2031240	1936
TEM03	623537	2021640	1491	TEM16	624978	2027417	1680
TEM04	624188	2033629	1934	TEM17	627165	2023545	1562
TEM05	628702	2036483	1937	TEM18	625284	2021115	1514
TEM06	632916	2034688	1804	TEM19	625152	2025655	1595
TEM07	638737	2033790	1932	TEM20	623994	2028268	1741
TEM08	633102	2027528	1704	TEM21	614956	2034110	1839
TEM09	630388	2024698	1634	TEM22	633939	2035245	1834
TEM10	617239	2049406	1829	TEM23	633782	2032848	1779
TEM11	620518	2044927	1852	TEM24	632435	2026463	1664
TEM12	624537	2042757	1888	TEM25	634464	2030512	1766
TEM13	618527	2037954	1918				

Anexo B. Ubicación de las muestras de agua



Anexo C. Resultados del Balance Hídrico.

Tabla 15. Resultados de precipitación de las estaciones meteorológicas (1980-2022) mediante los polígonos de Thiessen y Evapotranspiración real en la CMB.

No.	Estación	X UTM	Y UTM	Precipitación [mm/año]	Temperatura [°C]	ETR-T [mm/año]	Área [m²]	Precipitación Thiessen [m]
1	20248	634020	2006136	570.4	20.5	540.9	9850613.54	2.0
2	20285	639568	2011554	551.6	20.1	524.3	112232337	22.4
3	20305	645310	2001790	555.5	19.7	524.2	152150602	30.5
4	20311	642373	2018458	506.8	19.0	482.2	123959470	22.7
5	20355	626979	2005325	574.9	20.8	547.0	123482810	25.6
6	20362	653531	1992634	583.4	19.2	540.8	163763672	34.5
7	21002	650344	2015972	463.7	16.3	432.4	413567227	69.2
8	21003	600402	2023638	627.4	23.7	608.5	114224990	25.9
9	21004	599812	2023270	610.2	23.7	594.3	60715209.7	13.4
10	21087	612892	2056474	729.1	18.5	626.6	167707980	44.1
11	21165	603852	2036415	591.0	18.7	541.6	166766140	35.6
12	21169	582405	2015409	614.3	23.6	597.2	145673598	32.3
13	21175	621859	1996617	515.9	21.1	501.4	408566916	76.1
14	21176	617762	2012582	448.2	20.9	443.0	145855440	23.6
15	21178	604079	1994146	562.9	22.3	547.2	288563124	58.6
16	21199	589000	1999881	550.6	23.3	541.9	43407355.3	8.6
17	21216	639588	2033533	482.5	18.5	460.3	129369543	22.5

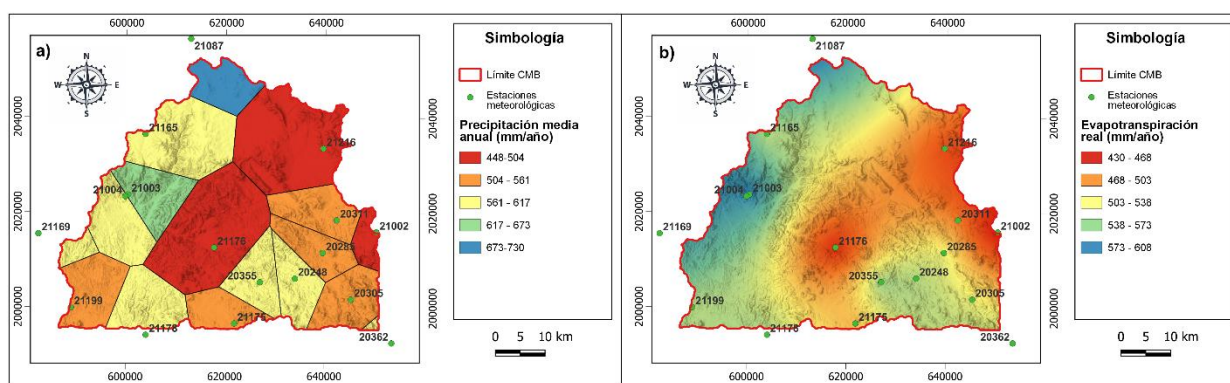


Figura 23. a) Distribución de la precipitación media anual de la CMB por polígonos de Thiessen; b) Distribución de la Evapotranspiración real en la CMB.

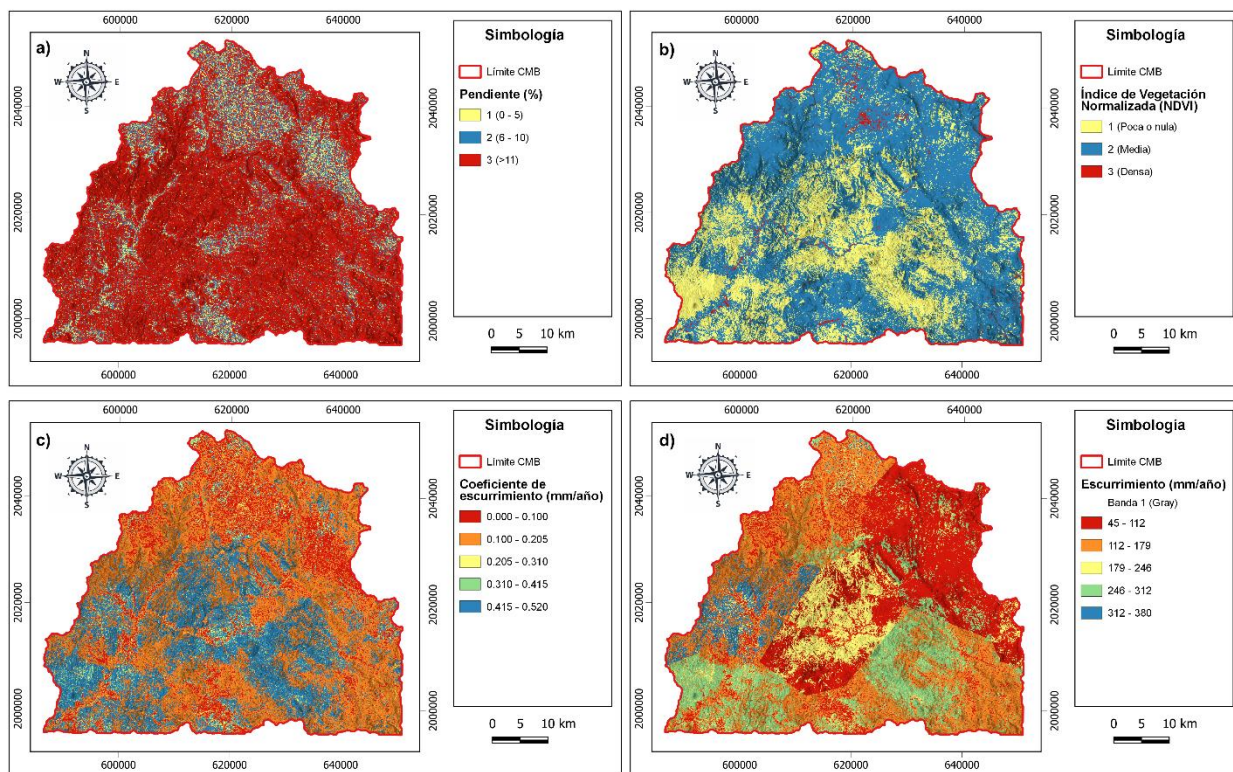


Figura 24. Mapas utilizados para la obtención del escurrimiento, a) Porcentaje de pendiente; b) Índice de Vegetación Normalizada (NDVI); c) Coeficiente de escurrimiento; d) Mapa de escurrimiento (mm/año).

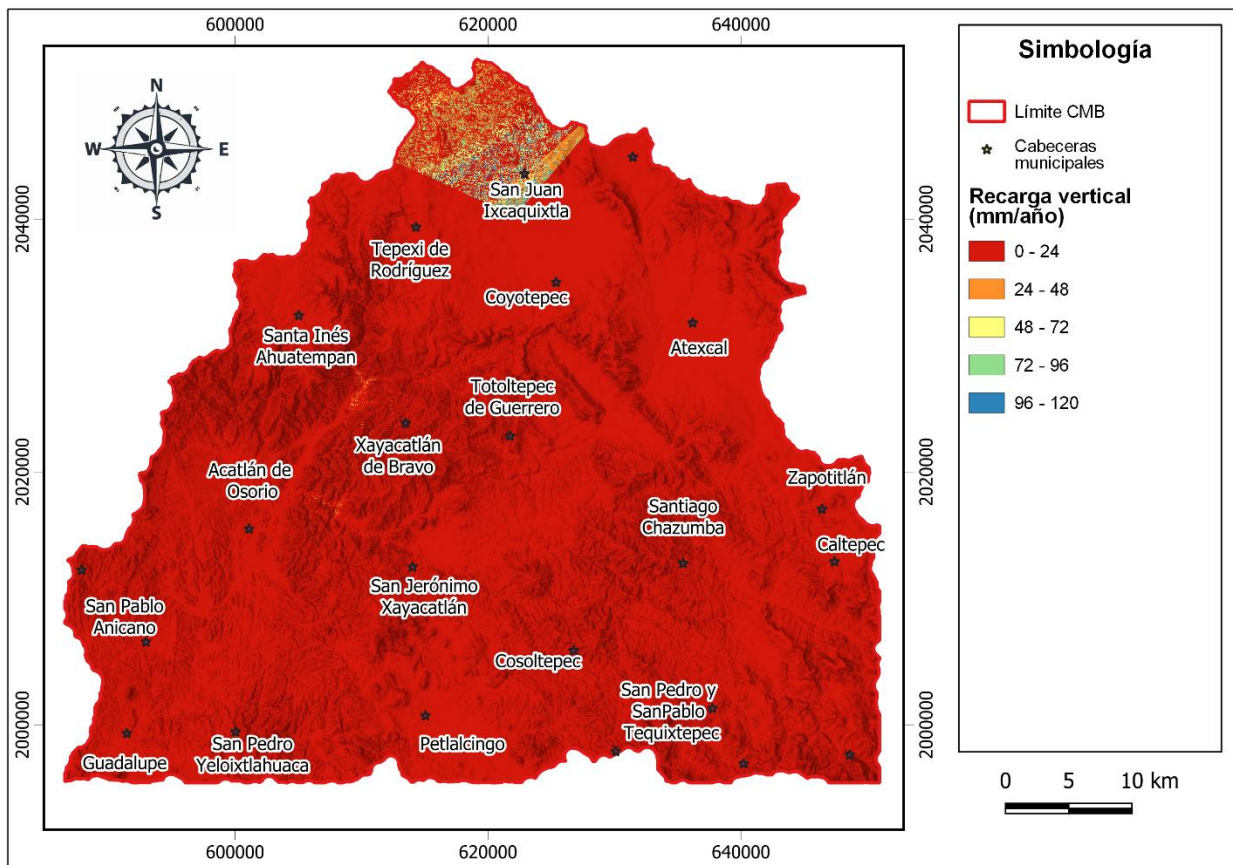


Figura 25. Recarga vertical (mm/año) de la CMB. Los colores rojo y naranja indican recarga baja a nula, mientras que verde y azul muestran valores altos.