



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**Evaluación de la calidad del agua por el impacto
del uso de aguas residuales en el acuífero de
Ajacuba, Hidalgo, México**

Tesis que presenta

Rodrigo Ventura Castillo Sánchez

Para obtener el grado de

Maestro(a) en Geociencias Aplicadas

Director (Codirectores) de la Tesis:

Dra. Janete Morán Ramírez

Dra. Lorena Elisa Sánchez Higuero

San Luis Potosí, S.L.P., Septiembre de 2024



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis **Evaluación del impacto del uso de aguas residuales no tratadas como aguas de riego en el acuífero de Ajacuba, Hidalgo, México** presentada para obtener el Grado de Maestro(a) en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Rodrigo Ventura Castillo Sánchez** y aprobada el **10 de octubre de 2024** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dra. Janete Morán Ramírez
Director/Codirectores de la tesis

Dra. Lorena Elisa Sánchez Higuero
Director/Codirectores de la tesis

Dr. Oscar Guadalupe Almanza Tovar
Miembro del Comité Tutorial

Dr. José Alfredo Ramos Leal
Miembro del Comité Tutorial

Dra. Briseida López Álvarez
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de (Nombre del Laboratorio) de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección de las doctoras Janete Morán Ramírez y Lorena Elisa Sánchez Higuero

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (1230241) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

ACTA DE EXAMEN

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), en donde se me brindó la oportunidad de realizar mi maestría y llevar a cabo este trabajo de investigación.

Al CONAHCYT, por todo el apoyo brindado a través de la beca, que sin duda no podría haber logrado sin su respaldo.

Agradezco infinitamente a mis directoras, la Dra. Janete Morán Ramírez y la Dra. Lorena Elisa Sánchez Higuero, por sus enseñanzas, su orientación y todo el apoyo que recibí durante esta gran experiencia. Siempre lo diré, son mis madres académicas y espero algún día devolverles un poco de lo mucho que me dieron. A los miembros de mi comité tutorial, el Dr. José Alfredo Ramos Leal, quien desde el principio de esta aventura me brindó su apoyo. Al Dr. Oscar Guadalupe Almanza Tovar, que con su paciencia y mentoría logramos este trabajo. A la Dra. Briseida López Álvarez, que con sus valiosos comentarios y observaciones enriquecieron de manera significativa el trabajo realizado.

A mi madre Maribel, que toda su vida se ha dedicado a apoyarme y amarme, todo lo que he logrado y lo que pueda hacer es gracias a ti, te amo.

A mis abuelos que en realidad han sido mis padres, no tengo la vida suficiente para poder agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A mi familia, mi hermano Jonathan, mi tía Patricia, mi tía Miriam, Ian, Ludwing y Brayan que con su aliento y cariño han sido siempre parte fundamental de mis logros.

A todos los académicos que tuve la fortuna de conocer en el instituto y que desempeñaron un papel importante en mi formación, en especial al Dr. Loera, master David y la Dra Mariana.

A mis amigos y compañeros a quienes admiro y estimo, en especial a Leslie, Yazmín, Berenice, Gorritas, Pavel, Kika, Betty, Daniel, cuya amistad y colaboración enriquecieron esta fabulosa experiencia.

Gracias totales.

Contenido

1. 1. Generalidades	16
1.1 Introducción.....	16
1.2 Pregunta de investigación.....	24
1.3 Justificación.....	24
1.4 Hipótesis.....	25
1.5 Objetivo General.....	25
1.6 Objetivos específicos.....	26
2. Metodología	27
2.1 Área de Estudio	27
2.1.1 Localización.....	27
2.1.2 Fisiografía.....	27
2.1.3 Clima.....	28
2.1.4 Flora y fauna.....	28
2.2.3 Piezometría.....	36
3. Metodología	37
La evaluación de la calidad del agua para riego tomando como base el IP se presenta en el Cuadro 4.....	42
3.3.6 Relación de Absorción de Sodio (RAS).....	43
3.4 Balance hidrológico.....	46
3.4.1 Forma general de la fórmula de balance hídrico.....	46
3.4.2 Precipitación.....	47
3.4.3 Evapotranspiración.....	47
3.4.4 Escurrimiento.....	48
3.4.5 Recarga inducida.....	50
3.4.6 Infiltración.....	51
3.5 Vulnerabilidad acuífera.....	51
3.5.1 D.R.A.S.T.I.C.....	51
3.5.1.1 D-Profundidad.....	53
3.5.1.2 R-Recarga neta.....	54
3.5.1.3 A-Medio acuífero.....	54
3.5.1.4 S-Suelos.....	55
3.5.1.5 T-Topografía.....	56
3.4.1.6 I-Impacto a la zona vadosa.....	57

3.5.1.7 C-Conductividad hidráulica.....	58
4. Resultados.....	58
4.1 Modelo hidrogeológico conceptual.....	58
4.2 Hidrogeoquímica	61
4.2.1 Diagrama de Piper	61
4.2.2 Diagrama de Scholler.....	62
4.2.3 Diagrama de Mifflin.....	64
4.2.4 Diagrama de Gibbs.....	66
4.2.4 Relación iónica $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ vs $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$	67
4.2.5 Diagrama de Pratt	68
4.2.6 Secciones hidrogeoquímicas	69
4.2.7 Miembros extremos	71
4.3 Calidad para consumo humano	73
4.3.1 NOM 127	73
4.3.2 ICA.....	75
4.4 Calidad del agua para uso de riego	79
4.4.1 Índices de riego.....	79
4.4.2 Wilcox	81
4.4.3 %Na Vs CE.....	82
4.5 Balance hidrológico	83
4.5.1 Estaciones meteorológicas.....	83
4.5.2 Pruebas de homogeneización.....	83
4.5.3 Precipitación	84
4.5.4 Evapotranspiración	85
4.5.5 Esgurrimiento	86
4.5.6 Recarga Inducida.....	87
4.5.7 Infiltración.....	88
4.6 DRASTIC.....	89
4.6.1D-Profundidad del nivel estático	89
4.6.2 R-Recarga neta.....	90
4.6.3 A-Medio acuífero	91
4.6.4S-Suelos.....	92
4.6.7 T- Topografía	93

4.6.8 I-Impacto a la zona vadosa.....	94
4.6.9 C-Conductividad hidráulica	95
4.7 DRASTIC.....	96
4.8 Correlación	99
5. Discusión	102
6. Conclusiones.....	104
7. Referencias.....	106

Lista de figuras

Figura 1	Localización regional y local de la zona de estudio. Se destacan las localidades, carreteras principales, canales de distribución de las aguas residuales y zonas urbanas.....	27
Figura 2	Mapa geológico de la zona de estudio. La geología predominante consta de rocas ígneas como andesita y basalto, el relleno del valle consta de depósitos vulcanosedimentarios de la formación Atotonilco el Grande.....	35
Figura 3	Piezometría de la zona de Ajacuba. Se observa un flujo subterráneo de los altos topográficos hacia el valle con una dirección hacia el predominante hacia el Este.....	36
Figura 4	Modelo conceptual de la zona de estudio. Se observan los niveles piezométricos respecto al nivel de mar y las 4 zonas de flujo determinadas en la zona así como la geología y el comportamiento de los flujos subterráneos.	60
Figura 5	Diagrama de Piper en donde se muestran las muestras que componen al flujo I (color azul), flujo II (color verde), flujo III (color naranja), flujo IV (color amarillo) y las muestras de los canales de riego (color rojo).	62
Figura 6	Diagrama de Scholler, se muestran los tipos de aguas en cada uno de los flujos y las muestras de los canales de riego.....	64
Figura 7	Diagrama de Miffilin en donde se observa el tipo de flujo de cada una de las muestras, la zona se ubica en un flujo intermedio a regional atribuido a la mezcla de agua de diferente calidad.	66
Figura 8	Diagrama de Gibbs que muestra los procesos de interacción agua-roca que influyen a cada una de las muestras.	67
Figura 9	Diagrama de relación iónica $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ vs $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ en donde se ubican las muestras de los cuatro flujos en la zona, y la interacción que influye en cada una de las muestras.	68
Figura 10	Diagrama de Pratt principales procesos de interacción de agua roca.	69
Figura 11	Ubicación de cada uno de los perfiles hidrogeoquímicos, se muestra las concentraciones y valores en cada uno de los flujos desde la zona de recarga a la zona de descarga.	71
Figura 12	Miembros extremos de la zona de estudio, el primer miembro corresponde a agua de reciente infiltración, el segundo a la muestra de agua residual utilizada para el riego y tercero agua hidrotermal.	73
Figura 13	Límites permisibles de acuerdo con la NOM127 de pH, STD, NO_3^{2-} , ALK, Na^+ y As en cada una de las muestras analizadas.	75
Figura 14	Mapa de la distribución de la calidad de agua para consumo humano de acuerdo con la metodología ICA.	76
Figura 15	Resultados de los índices de sodicidad y salinidad de cada una de las muestras.	80
Figura 16	Diagrama de Wilcox, muestra los niveles en cada una de las muestras de los cuatro flujos de salinidad y sodicidad.....	81
Figura 17	Diagrama de %Na vs CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$), muestra la calidad de cada una de las muestras de los cuatro flujos.	82

Figura 18	Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el balance hidrológico.....	83
Figura 19	Mapa de distribución de la precipitación en la zona, los valores van desde los 262 mm por año hasta los 375 mm.....	85
Figura 20	Mapa de distribución de la evapotranspiración en la zona de estudio obteniendo valores entre los 278 y los 350 mm.....	86
Figura 21	Distribución del escurrimiento en la zona de estudio, se muestran valores desde los 96 hasta los 327 mm.	87
Figura 22	Distribución de la recarga inducida en la zona de estudio por retorno de riego y fallas en el suministro de agua potable.	88
Figura 23	Distribución de la infiltración en la zona de estudio con valores desde las 10 hasta los 38.5 mm.....	89
Figura 24	D-Profundidad del nivel estático, siendo los valores de entre 0 a 7.5 metros los más vulnerables y los valores de 76 a 114.5 metros los menos vulnerables en la zona de estudio.....	90
Figura 25	R-Recarga neta, los valores de infiltración no superan los 50 mm por lo que su vulnerabilidad es de 1.....	91
Figura 26	Medio acuífero, la zona del valle al estar compuesta por depósitos vulcanosedimentarios de acuerdo con la metodología DRASTIC tiene una vulnerabilidad de 7y la zona con vulnerabilidad 2 se componen por rocas ígneas.	92
Figura 27	S-Suelos, las zonas con una vulnerabilidad de p9 se componen por suelos tipo rendzina o feozem y la zona con una vulnerabilidad 7 por vertisol pelico.....	93
Figura 28	T-Topografía, las zonas con pendientes mayores a 18% grados tienen una vulnerabilidad de 1 mientras que las pendientes entre 0 y 2% tiene una vulnerabilidad de 10.	94
Figura 29	. I-Impacto a la zona vadosa, el relleno vulcano sedimentario que compone al valle tiene una vulnerabilidad de 8 mientras que las rocas ígneas de los altos topográficos una vulnerabilidad de 3.....	95
Figura 30	C-Conductividad hidráulica, el relleno vulcano sedimentario que compone al valle tiene una vulnerabilidad de 8 mientras que las rocas ígneas de los altos topográficos una vulnerabilidad de 3.....	96
Figura 31	DRASTIC, se identifican las zonas de vulnerabilidad en el área de estudio.	97
Figura 32	DRASTIC normalizado.....	98
Figura 33	Correlación grafica entre el índice ICA y el DRASTIC normalizado.	100
Figura 34	Correlación utilizando un modelo lineal entre ICA/ DRASTIC normalizado.	101

Lista de tablas

Tabla 1	Cuadro 2. Características físicas de cada tipo de agua y su peso correspondiente (k).	40
Tabla 2	Clasificación del agua para su uso en el riego agrícola tomando como base su salinidad (Richards, 1954).	41
Tabla 3	Evaluación de la calidad del agua para riego agrícola tomando como base el Índice de Permeabilidad (Balsameda et al., 2006)	42
Tabla 4	Calidad del agua para riego agrícola tomando como base la Salinidad Efectiva (SE) y la Salinidad Potencial (SP); tomado de Tartabull y Bentancourt, (2016).....	43
Tabla 5	Calidad del agua para riego agrícola tomando como base la Relación de Absorción de Sodio (RAS). Tomado de Richards (1954).	44
Tabla 6	Calidad del agua para riego agrícola tomando como base el Porcentaje de Sodio (%Na, Todd and Mays (1980).	44
Tabla 7	Calidad de agua para riego agrícola tomando como base el Porcentaje de Sodio Soluble (PSS). Tomado de Todd and Mays (1980).....	45
Tabla 8	Calidad del agua para riego agrícola de acuerdo con el Carbonato de Sodio Residual (CSR, Richards, 1954).	46
Tabla 9	Peso de cada parámetro de acuerdo con sus características (Almanza Tovar, 2021).....	49
Tabla 10	Valor de k de acuerdo con el uso de suelo, pendiente y textura del suelo (Almanza Tovar, 2021)	50
Tabla 11	Peso de cada parámetro en la metodología DRASTIC. Aller et al. (1998) y la gama de colores utilizada se observa en la tabla 12.	52
Tabla 12	Código de colores de acuerdo al índice de DRASTIC propuesto por (Aller et al. 1998).	53
Tabla 13	Ponderación de la metodología DRASTIC a la profundidad del nivel estático. (Almanza, 2021).....	54
Tabla 14	Ponderación de la recarga neta de acuerdo con la metodología DRASTIC. (Almanza, 2021):	54
Tabla 15	Ponderación del material geológico que compone el acuífero de acuerdo con la metodología DRASTIC (Aller et al.1987 and Goya, 2011).....	55
Tabla 16	Ponderación de los distintos tipos de suelo de acuerdo con la metodología DRASTIC (Aller et al.1987 and Goya, 2011)	56
Tabla 17	Ponderación del porcentaje de pendiente del terreno de acuerdo con la metodología DRASTIC.	56
Tabla 18	Ponderación del impacto a la zona vadosa de cada material litológico de acuerdo con la metodología DRASTIC (Aller et al.1987 and Goya, 2011) 57	57
Tabla 19	Ponderación de la conductividad hidráulica de acuerdo con la metodología DRASTIC Aller et al. (1987):.....	58
Tabla 20	Muestras de cada uno de los flujos ubicados en la zona de estudio	59

Tabla 21	Evaluación de cada uno de los parámetros utilizados para la metodología ICA.....	78
Tabla 22	Resultados de las pruebas de homogeneización de cada una de las estaciones meteorológicas utilizadas en el balance hidrológico.....	84

Resumen

El aumento de población y el cambio climático ha ocasionado que, en un esfuerzo por gestionar de manera más eficiente el recurso hídrico, se utilicen las aguas residuales como aguas de riego. El presente trabajo de investigación tiene como objetivo determinar el impacto del uso de aguas residuales no tratadas como aguas de riego sobre el acuífero de Ajacuba, Hidalgo, México.

El acuífero de Ajacuba forma parte del Valle del Mezquital. Una zona que por más de 100 años ha sido irrigada con aguas residuales provenientes de la Ciudad de México. El área de Ajacuba en comparación con el resto del valle tiene sólo 20 años realizando esta práctica. Aunado a esto, existe una falta de información acerca de las implicaciones de su uso en la región, por lo que el trabajo trata de subsanar este problema. Para ello, se realizó una caracterización hidrogeoquímica (25 muestras en el área de estudio) que constó de pozos regulados por el municipio, pozos privados, norias y dos muestras de canales no revestidos que distribuyen el agua residual utilizada para el riego agrícola. Se midieron *in situ* parámetros fisicoquímicos de cada una de las muestras y posteriormente en el laboratorio se analizaron para obtener sus concentraciones iones mayoritarios y minoritarios.

Se utilizaron los diagramas de Piper, Scholler, Mifflin, Gibbs, relación iónica, Pratt, secciones hidrogeoquímicas, y miembros extremos para identificar los principales procesos que determinan su composición química, así como para determinar el estado actual del acuífero.

A partir de las concentraciones químicas y de los parámetros fisicoquímicos se compararon con los límites permisibles que establece la normatividad mexicana vigente (NOM-127-SSA1-2021) que determina la calidad para consumo humano y también se construyó el Índice de Calidad de Agua (empleado a nivel internacional para evaluaciones de agua superficial y subterránea e identificar las acciones que deben realizarse para su consumo) a fin de determinar las zonas con mejor calidad en el área de estudio. Debido a que dentro del área de estudio se encuentra el Distrito de Riego 112 Ajacuba, lo que implica uso del agua del acuífero para riego de las parcelas agrícolas. Por ello también se desarrollaron índices de riego para determinar problemas de sodicidad y salinidad en la zona.

El acuífero al ser una unidad de contención de agua se ha desarrollado bajo determinadas características geológicas, litológicas, ambientales, etc. Además, al ser aprovechado por el ser humano y estar dentro del área de diversas actividades humanas, se requiere del uso de metodologías como el DRASTIC a fin de ubicar las zonas del área de estudio que se encuentren con mayor vulnerabilidad a contaminarse debido a la correlación que existe entre el medio físico del acuífero y la calidad de agua presente en este.

Los componentes físicos y químicos en el medio tienen un papel fundamental en los resultados de la caracterización hidrogeoquímica, la calidad del agua para

consumo humano y para riego, por lo que se desarrolló la metodología DRASTIC para ubicar las zonas con mayor vulnerabilidad en el área de estudio y determinar la correlación entre la calidad y el medio físico que compone el área de estudio.

Key words:

Calidad, ICA, DRASTIC, Agua subterránea, Agua residual

Abstract

The increase in population and climate change has led to the use of wastewater for irrigation in an effort to manage more efficiently. This research aims to determine the impact of using wastewater for irrigation on the Ajacuba aquifer in Hidalgo, Mexico.

The Ajacuba aquifer is part of the Mezquital Valley. For over 100 years, this area has been irrigated with wastewater from Mexico City. In comparison to the rest of the valley, this practice has only been in place for 20 years in this area. Additionally, there is a lack of information on this topic in the area, so this study aims to address this gap.

A hydrogeochemical characterization was conducted on 25 samples in the study area, including wells regulated by the municipality, private wells, water wells, and two samples from canals distributing wastewater used for agricultural irrigation. Physicochemical parameters from each sample were analyzed to determine the concentrations of major and minor ions.

Various diagrams such as Piper, Scholler, Mifflin, Gibbs, ionic relationship, Pratt, hydrogeochemical sections, and extreme members were used to assess the current state of the aquifer and the main processes influencing its composition. Chemical concentrations and physicochemical parameters were compared to the permissible limits set by NOM 127 SSA1 to evaluate water quality for human consumption. An ICA index was also used to determine areas of higher quality in the study area.

In the study area lies irrigation district 112 Ajacuba, where water from the aquifer is sometimes used for agricultural irrigation. Therefore, irrigation indices were developed to identify issues of sodicity and salinity in the zone.

The abiotic environment plays a critical role in the results of the hydrogeochemical characterization, water quality for human consumption, and irrigation. The DRASTIC methodology was employed to identify areas of greater vulnerability in the study area and establish the correlation between water quality and the physical environment within the study area

1. 1. Generalidades

1.1 Introducción

De acuerdo con [UNESCO, \(2017\)](#), a nivel mundial se utilizan 3,928 km³ de agua al año. De este volumen se estima que el mayor usuario es la agricultura a través de la irrigación de cultivos (utiliza el 44% del volumen total anual, unos 1,716 km³). El resto del volumen anual es empleado en uso doméstico (% y volumen), industrial (% y volumen) y otros (% y volumen además de indicar qué son otros). Las aguas residuales son el resultado del desecho de las aguas utilizadas en los ámbitos doméstico, comercial e industrial. La mezcla de aguas negras (con contenido de heces fecales), aguas grises (aguas servidas de lavado), aguas de desecho de las distintas industrias que vierten sus aguas con o sin previo tratamiento y escorrentías de precipitación, son parte en la conformación de las aguas residuales ([UNESCO, 2017](#); [Hashem y Qi, 2021](#)). Del volumen de agua consumido anualmente en el planeta, se estima que se generan 2,212 km³ de aguas residuales, de las cuales se calcula que el 70% del volumen de agua residual, son aprovechadas con o sin tratamiento para el riego de 20 millones de hectáreas en 50 países, aunque mayoritariamente sin tratamiento.

Las características de las aguas residuales varían de acuerdo con la calidad de las aguas vertidas y origen, así como de la distancia recorrida. En general estas características pueden ser clasificadas en físicas (olor, color, sólidos suspendidos y temperatura), químicas (pH, aniones y cationes mayoritarios, metales pesados, alcalinidad), biológicas (bacterias, materia orgánica, protistas y/o virus) y contaminantes emergentes como productos farmacéuticos, aditivos industriales, hormonas, antisépticos, micro y nanoplasticos ([Muttamara, 1996](#); [Eriksoon et al., 2002](#); [Hashem y Qi, 2021](#)).

Alrededor de 50% de personas viven en zonas donde el consumo de agua supera los recursos hídricos renovables locales o bien en zonas con estrés hídrico afectando sobre todo a zonas áridas o semiáridas. Por lo que en un esfuerzo de gestionar los recursos hídricos se optó por el riego de cultivos con aguas residuales con y sin tratamiento previo (FAO, 2013).

China está rankeado como el país que genera más agua residual considerando su población (alrededor de 1,412 millones de habitantes), con un volumen de $108.16 \times 10^{12} \text{ m}^3$ anualmente. Otro ejemplo es India, en donde generan alrededor de $38,354 \times 10^6 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ (FAO, 2013; UNESCO, 2017; Khalid *et al.*, 2018). En ambos casos se trata de dos de los países más megapoblados actualmente.

En México, las aguas residuales se clasifican de acuerdo con su descarga en: municipales (que son generadas en las áreas urbanas y rurales y que son captadas en los sistemas de alcantarillado) y no municipales (aquellas generadas por otros usos, como puede ser la industria autoabastecida y que se descargan directamente a cuerpos de agua nacionales sin ser colectadas por sistemas de alcantarillado). En el año 2018, se descargaron a nivel nacional $7,430 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ (equivalentes a $235.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) de aguas residuales municipales y $6,860 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ($217.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) de aguas no municipales (CONAGUA, 2019).

Dentro del territorio nacional, parte del agua residual generada es utilizada sin tratamiento para el riego de cultivos agrícolas en distintas zonas del país, empleando un volumen de $6,726 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$, (CONAGUA, 2019). Ejemplo de ello es el estado de Morelos con los municipios de Temixco, Xochitepec, Puente de Ixtla, Zacatepec y Jojutla. Otros estados del país donde se realiza la práctica son Colima, Puebla, Coahuila, Chihuahua, Tamaulipas y Sonora, en donde

predominan suelos áridos y semiáridos. Sin embargo, una de las zonas en donde históricamente se ha practicado este tipo de riego con agua residual en México, es el Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo. En esta región desde el Porfiriato se canalizaron las aguas residuales generadas en la Ciudad de México hacia el Valle del Mezquital ([García-García, 2001](#); [Pacheco- Vega, 2007](#); [Lugo-Morin, 2009](#)).

Hidalgo se encuentra altitudinalmente entre los 1700 y 2100 msnmm. El Valle del Mezquital corresponde a una de las diez regiones en las que se suele dividir el territorio estatal, conformada por 27 de los 84 municipios del Estado que comprende una superficie total de 642,653 ha y dentro de la que habitan 86,476 habitantes ([INEGI,2020](#)).

El territorio hidalguense fue habitado originalmente por los Otomíes, quienes colonizaron esta región ya que, por su poca productividad agrícola, era carente de valor para sus enemigos ([García-García, 2001](#); [Pacheco- Vega, 2007](#); [Lugo-Morin, 2009](#)). A principios del siglo XX, durante el Porfiriato, se concluyó la obra hidráulica el Gran Canal del Desagüe, con la que trataron de frenar las inundaciones de la Ciudad de México al enviar las aguas residuales producidas de la capital hacia el Valle del Mezquital. En 1957, con la construcción de la Presa Endhó y la estructura hidráulica Emisor Central, el Valle empezó a recibir aguas del corredor industrial Cuautitlán-Tepeji-San Juan del Río.

Las aguas residuales conducidas al Valle del Mezquital fueron una oportunidad para transformar una zona semiárida en una con potencial agrícola, creando así los distritos de riego 003 (Tula), 100 (Alfajayucan) y 112 (Ajacuba) ([García-Salazar, 2019](#)). Posteriormente se creó por Decreto Presidencial el Distrito de Riego 112 (Ajacuba) y fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de

septiembre de 1985. Este decreto le confirió una superficie total de 8,500 ha para riego, y reporta que, durante el periodo agrícola de 2018, fueron regadas 5,634 ha, con un volumen total de 47,425 m³ de agua residual, beneficiando a 3,014 usuarios. Además, también se indica que dentro del distrito se abastecen localidades de cuatro municipios Tlahuelilpan, Tlaxcoapan, Tetepango y Ajacuba (CONAGUA, 2019).

De acuerdo con CONAGUA (2019), la cosecha en el distrito de riego 112 de Ajacuba durante el año 2018 consistió en frijol (15 ton), maíz grano (35,484 ton), nabo (200 ton), alfalfa verde (188,890 ton), zacate verde (1,700 ton), calabacita (50 ton), chile verde (32 ton), coliflor (25 ton) y otros cultivos (200 ton). Este riego agrícola con agua residual principalmente no tratada ha favorecido convertir un área semiárida de baja productividad, en una de las principales regiones agrícolas del país y de la que dependen 8.8 millones de personas que se abastecen de alimentos de esta área. Sin embargo, el uso del agua residual para riego agrícola tiene efectos tanto positivos como negativos que a continuación se presentan.

A nivel del suelo, Halliwell *et al.*, (2001), abordan cómo el uso de aguas residuales en áreas de cultivo en Australia, han tenido un impacto en el incremento de la sodicidad y salinidad de algunos suelos, lo que provocó cambios en el pH, en las concentraciones de sales y sodio y en la permeabilidad del suelo, dando como resultado una disminución en la producción agrícola.

Para entender la relación del uso de aguas residuales en las plantas, Hassanpour *et al.* (2010), desarrollaron experimentos en distintos tipos de suelos en Irán regados con aguas residuales domésticas y con aguas primarias de drenaje. Dentro de los resultados encontraron que hubo un incremento en

materia orgánica, lo que sería un beneficio para las plantas, sin embargo, también aumentó la salinidad, la cual a determinadas concentraciones es tóxica para algunos cultivos. Por su parte [Gharaibeh et al., \(2016\)](#), aplicaron sobre superficies de cultivo y con suelos de diferentes texturas, riego con agua de diferente tipo: agua de lluvia (control del experimento), agua residual tratada y por un periodo de dos años y con agua residual tratada y por un periodo de cinco años. En este trabajo, los autores observaron una disminución en la conductividad hidráulica por el aumento de sodio en los suelos alterando su pososidad, lo que podría provocar erosión y pérdida en la capacidad de infiltración.

En el caso de las fuentes de agua como los acuíferos, el impacto puede variar de acuerdo con los factores geológicos de la zona de estudio, la calidad de las aguas vertidas y el tiempo en el que las zonas han sido irrigadas ([Hashem y Qi, 2021](#)). [Deshmukh et al. \(2015\)](#), encontraron en su estudio que, en la zona vadosa del acuífero de la parte periurbana de Nueva Delhi, en donde existen cultivos irrigados por el sistema efluente Keshopur desde 1979, existen una mayor concentración de Zn^{2+} , Cu^{2+} y Ni^{2+} , cuyas concentraciones disminuyen con la profundidad. Los autores hacen énfasis en que el factor de contaminación es moderado, sin embargo, éste ha ido incrementándose durante los últimos 20 años, por lo que es cuestión de tiempo hasta presentar problemas de contaminación mayores, especialmente a nivel del acuífero.

La presencia de contaminantes emergentes (residuos de fármacos, hormonas, plaguicidas, etc.), es otro impacto que tiene esa práctica de riego hacia los acuíferos. [Fries et al. \(2016\)](#), demostraron la presencia de sulfametoxazoles (antibióticos de amplio espectro y bajo costo) y carbamazepina (antiepiléptico

que ha servido como indicador de contaminación), cuyas concentraciones son altas en aguas subterráneas en la cuenca de Melianene, Túnez. Estos compuestos favorecen la resistencia de diversas bacterias además de alteraciones fisiológicas en los organismos que pueden detonar en la alteración de las cadenas tróficas. También detectaron la presencia de otros productos como compuestos conservadores de fármacos, resinas y biocidas.

[Wu et al. \(2017\)](#), monitorearon durante un año parámetros fisicoquímicos y abundancia relativa de aniones y cationes de un acuífero situado al sureste del desierto de Tengger en China. Como resultado, observaron una variabilidad mensual en los distintos iones que coincidían con las zonas regadas con aguas residuales. En estas áreas fue el Na^+ , el ion con mayor concentración ($336.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), derivado de las altas concentraciones del mismo ion en las aguas residuales utilizadas en el área ($421 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

En otro estudio de caso, es en Australia, en donde [Szabo et al. \(2018\)](#), demostraron la presencia de sustancias per y polifluoroalcalinas (conocidos como los químicos eternos y de alto impacto en la salud humana). Estas se utilizan en la protección de textiles, el recubrimiento de utensilios domésticos, espumas de revestimiento utilizadas en diversas industrias, entre otras, ello a pesar de haberse empleado agua residual para el riego de la zona de cultivo.

[Jampani et al. \(2020\)](#), demostraron en su trabajo realizado en el acuífero de la cuenca Krishna, India, con el análisis de aniones y cationes mayoritarios y nutrientes presentes en las muestras de aprovechamientos de aguas subterráneas, que el impacto del uso de aguas residuales en la zona de irrigación disminuye la calidad del agua del acuífero.

En México, la zona en donde se han realizado más estudios acerca del impacto sobre el agua subterránea a través del uso de aguas residuales en el riego de cultivos es el Valle del Mezquital debido a su historia desde el Porfiriato. [Pacheco-Vega \(2007\)](#), menciona que el estudio de las aguas ha tenido dos vertientes principales: por un lado, la epidemiológica, preocupada por los efectos negativos sobre la salud (incidencia de enfermedades gastrointestinales, enfermedades dermatológicas) y por el otro, la vertiente social (estigmatización de las poblaciones cercanas a estos espacios, rezago en las políticas de mejoramiento). Sin embargo, el impacto más notorio que tienen las aguas residuales no tratadas como aguas de riego en el acuífero del Valle del Mezquital, es la calidad del agua subterránea. [Downs et al. \(1999\)](#), realizaron una caracterización hidrogeoquímica que arrojó concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ cerca del límite de concentración para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994), sin embargo, detallan que la presencia de coliformes, bacterias *E. coli* y otras bacterias representan un riesgo a la población. Otros trabajos en como el de [Gallegos et al. \(1999\)](#), encontraron concentraciones de NO_3^- de hasta $18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y presencia de bacterias fecales por transporte hacia el acuífero. Estos valores exceden encontrados en acuíferos sin impacto además de la normatividad mexicana actual para agua de consumo humano. Más recientemente [Jiménez y Chávez \(2004\)](#) y [Lesser et al. \(2011\)](#), encontraron en el Valle que las concentraciones de los STD y del Na^+ ya sobrepasaban los límites permisibles por la entonces NOM-127-SSA1-1994, mientras que otros iones como SO_4^{2-} y el B^{3+} empezaron a presentar altas concentraciones. Además, [Pérez et al. \(2018\)](#), demostraron que existe una variación de las concentraciones de NO_3^- , B^{3+} y PO_4^{3-} de acuerdo con el punto en que se colecte en su recorrido

desde Ciudad de México hacia el Valle del Mezquital y que sobrepasaban los límites permisibles vigentes en el país. Con esta base, los autores concluyeron que las aguas no son recomendables para el uso de riego.

Finalmente, [Siemens et al. \(2008\)](#), estudiaron la presencia de contaminantes emergentes en las aguas residuales que se conducen del Valle de México hacia el Valle del Mezquital. Cinco de los once compuestos se detectaron, todos medicamentos: trimetoprima (antibiótico utilizado en infecciones de las vías urinarias), eritromicina (antibiótico utilizado en infecciones respiratorias), naproxeno (antiinflamatorio), ibuprofeno (antiinflamatorio) y diclofenaco (antiinflamatorio).

Las evaluaciones

En el caso del distrito de riego de Ajacuba, este se encuentra sobre el acuífero del mismo nombre. Se cuenta con información de un pequeño estudio de la [CONAGUA \(2020\)](#), así como de la derivada de estudios de acuíferos aledaños pero que no representa una visión real y actual del acuífero, particularmente de un distrito de riego con menos de 40 años de antigüedad y con menos tiempo en el uso del agua residual en comparación con el resto del Valle de Mezquital. Conocer la condición actual del acuífero y su relación con el riego con agua residual no tratada es base para el desarrollo del manejo y ordenamiento del territorio de Ajacuba y la región.

1.2 Pregunta de investigación

A partir de la información sobre el estado del agua subterránea de diferentes regiones del mundo sometidas al riego con agua residual tratada y no tratada, así como de los problemas identificados en el Valle de Mezquital y contrastando con el tiempo que llevan a cabo esta práctica en una región de características similares al área dónde se encuentra el acuífero de Ajacuba surge la siguiente pregunta de investigación: actualmente ¿cuál es el impacto en el acuífero de Ajacuba por el uso de aguas residuales no tratadas como aguas de riego agrícola?

1.3 Justificación

El uso de aguas residuales en el riego de cultivos ha sido ampliamente documentado, teniendo efectos directos en el ambiente y en las propias áreas agrícolas como son alteraciones negativas en las propiedades fisicoquímicas de suelos, contaminación de acuíferos y la reducción de la calidad del agua subterránea, enfermedades gastrointestinales, dermatológicas, disminución de productividad agrícola de los suelos, así como el estigma de poblaciones aledañas a zonas de riego con aguas residuales.

Si bien el Valle del Mezquital ha desarrollado el riego agrícola durante más de un siglo, la región en la que se encuentra el acuífero de Ajacuba y el distrito de riego del mismo nombre, cuentan con menos de cuatro décadas de desarrollar esta actividad. Ajacuba, al estar inmerso dentro del Valle, no ha contado con la misma cantidad de trabajos ni tampoco cuenta con una evaluación del distrito como tal. Aunado a lo anterior es importante que se realice una evaluación que considere no sólo la química del agua para su uso en el riego agrícola, sino que integre la naturaleza propia del acuífero y cómo influye e interacciona la

presencia del agua residual empleada en el riego agrícola, en los diversos usos del agua del acuífero de Ajacuba, de manera que pueda servir de base para tomadores de decisiones y para políticas públicas.

Con el presente trabajo se busca solventar esa falta de información y contar con una primera evaluación integral con diferentes herramientas para conocer la condición del acuífero de Ajacuba, dar pauta a otros estudios y proveer de información para los tomadores de decisiones y ciudadanía.

1.4 Hipótesis

Se ha demostrado que el uso de aguas residuales no tratadas y utilizadas como aguas de riego, han impactado acuíferos alrededor del mundo donde se realiza esta práctica. Al encontrarse un distrito de riego sobre el acuífero de Ajacuba, en donde el riego se da por gravedad utilizando aguas residuales no tratadas en canales revestidos y no revestidos, se puede esperar que a casi cuarenta años de iniciado este tipo de riego se cuenten con elevación de nutrientes e iones, incremento de salinidad, presencia de coliformes fecales, en las áreas más cercanas a los canales de riego, siendo las áreas con suelos más permeables, los más vulnerables a la contaminación del acuífero.

1.5 Objetivo General

Determinar el impacto en el acuífero de Ajacuba por el uso de aguas residuales no tratadas para riego agrícola a través de la implementación de una metodología integral que contemple la composición química del agua, la calidad de ésta, la interacción del agua residual empleada y las condiciones de vulnerabilidad propias del acuífero.

1.6 Objetivos específicos

- Caracterizar hidrogeoquímicamente el agua del acuífero de Ajacuba a fin de determinar su estado actual y los principales procesos hidrogeoquímicos que generan esas condiciones.
- Determinar la calidad del agua subterránea para consumo humano a través de la comparación de las concentraciones de diferentes parámetros con la NOM-127-SSA1-2021.
- Evaluar la calidad del agua para consumo humano a partir de los índices de Calidad de Agua (ICA) empleados internacionalmente y con ello determinar las zonas con agua de calidad y aquellas con requerimientos de tratamiento.
- Determinar la calidad del agua del acuífero de Ajacuba y si existe riesgo de salinidad o sodicidad por su empleo en el riego agrícola a partir de la implementación índices de riego agrícola.
- Evaluar la vulnerabilidad del acuífero de Ajacuba a partir de la metodología DRASTIC, con el fin de realizar una identificación de los factores de riesgo, así como las zonas más y menos vulnerables de éste.

2. Metodología

2.1 Área de Estudio

2.1.1 Localización

El área de estudio se encuentra al sur del estado de Hidalgo, abarcando en su mayoría el municipio de Ajacuba y Tetepango y parte de los municipios de San Agustín Tlaxiaca, Mixquiahuala, Tezontepec, Tlahuelilpan, Francisco I. Madero, Tolcayuca y Progreso de Obregón. En la Figura 1 se muestra su localización regional y local, se muestra también los límites del distrito de riego Ajacuba.

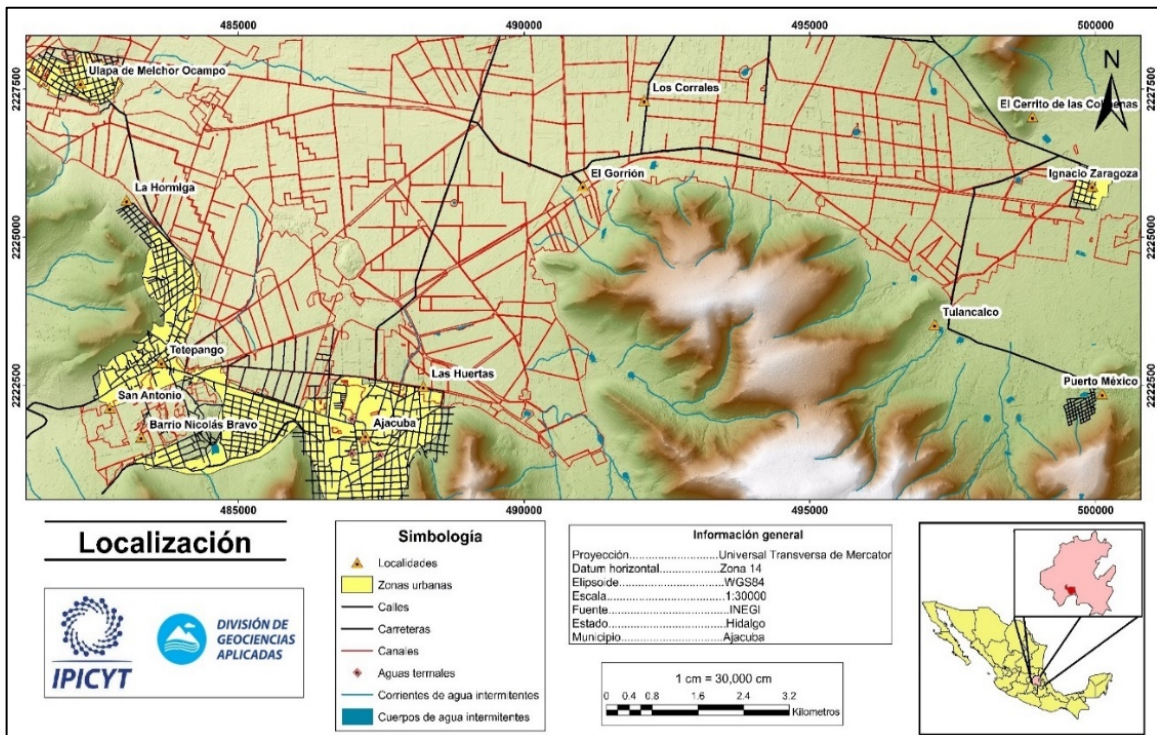


Figura 1 Localización regional y local de la zona de estudio. Se destacan las localidades, carreteras principales, canales de distribución de las aguas residuales y zonas urbanas.

2.1.2 Fisiografía

La zona se ubica en el eje volcánico transversal. Es un sistema montañoso no del todo continuo, que marca el extremo meridional de la Altiplanicie Mexicana y la separa de la Depresión del Balsas. Incluye las prominencias topográficas más altas de México, formadas por volcanes, como el Pico de Orizaba, el

Ppopocatépetl, el Ixtaccíhuatl, el Nevado de Toluca, la Malinche, el Nevado de Colima, etc. La mayor parte de los amplios valles se intercalan entre montañas que se sitúan a altitudes cercanas a 2,000 m. (Chaves *et al.* 1996)

2.1.3 Clima

La zona de estudio tiene un clima semiárido templado (Bs₁kw) y con régimen pluvial de verano entre los meses de junio a septiembre. La temperatura y precipitación media anual es de 14 a 16°C y de 500-1200 mm respectivamente (CONAGUA, 2020)

2.1.4 Flora y fauna

La vegetación se caracteriza por presencia de matorral espinoso, cactáceas (nopal), asparagaceas como el maguey y escasos bosques de encino. En la zona se pueden encontrar especies de fauna como conejos, topos, tlacuaches, ardillas, zorrillos, liebres, tejones, armadillos, variedad de aves como halcón, águilas, gavilán, zopilote, cuervos, diversas especies de víboras y lagartijas, así como insectos y arácnidos (CONAGUA, 2020).

2.1.5 Hidrografía

La zona de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrológica Administrativa de la CONAGUA (2020), No. 26 Río Pánuco, en la subregión del Alto Pánuco. La cuenca hidrológica a la que pertenece es el Río Moctezuma y la subcuenca el Río Tula. La mayor parte del flujo hidrográfico drena desde el sureste a través de arroyos intermitentes, de poca importancia, los cuales escurren con dirección general de sur a norte y hacia la planicie, sin reconocer alguna corriente principal dentro de la zona.

2.2.0 Marco hidrogeológico

2.2.1 Geología

El marco geológico de la región de estudio ha sufrido varios procesos geológicos de grandes magnitudes. Las rocas cretácicas son el resultado de los procesos de sedimentación marina en plataformas y cuencas representadas por las formaciones El Doctor, Soyatal y Mexcala, que ahora conforman grandes estructuras plegadas debido a la Orogenia Laramide ([Lesser, 2011](#)).

Por otra parte, el volcanismo asociado con la Faja Volcánica Transmexicana, se inicia en el Mioceno Superior y prevalece hasta el Reciente, lo que generó importantes edificios volcánicos. Los productos de esta actividad volcánica presentan espesores considerables y se encuentran cubriendo parcialmente a la secuencia sedimentaria. En la parte baja de los valles afloran depósitos aluviales conformados por depósitos de pie de monte, suelos residuales y abanicos aluviales constituidos por fragmentos del tamaño de cantos rodados a gravas del Cuaternario. Finalmente, la estratigrafía de la región de Ajacuba comprende del Cretácico Inferior al Reciente y se caracteriza por presentar tres secuencias litológicas principales, representadas por rocas carbonatadas del Cretácico, asociadas a procesos sedimentarios, andesitas y basaltos del Mioceno; así como, rocas piroclásticas y derrames volcánicos ([Lesser, 2007](#)).

Sistema Cretácico

i. Formación El Doctor

La Formación El Doctor, consiste en caliza de estratificación gruesa a masivas, con abundantes fragmentos de rudistas, caprínidos, monopleuridos, toucasia, ostrea y nódulos de pedernal negro, que corresponden a facies de talud. [Wilson et al., \(1955\)](#)

De acuerdo con [Wilson et al \(1955\)](#), la Formación El Doctor se puede describir en cuatro facies: *i*) Facie Cerro Ladrón (caliza de estratificación delgada-mediana de color gris oscuro a gris claro), que corresponde a ambiente de plataforma restringida. Esta unidad se sitúa a en el Albiano-Cenomaniano. *ii*) Facie Socavón con caliza clástica de color gris claro y conglomerado de estratificación gruesa, de ambiente pre-arrecifal. *iii*) Facie San Joaquín (Tamaulipas Superior con calizas de color gris oscuro en estratos gruesos con horizontes de pedernal negro y lutita), de ambiente de cuenca profunda y, *iv*) la Facie La Negra, que rodea a las demás facies. Esta facie consiste en láminas formadas de material clástico de grano fino y tienen intercalaciones de lutita roja. La Formación El Doctor menciona que presenta su mayor espesor hacia el oeste y suroeste del distrito El Doctor (porción oriental de los estados de Querétaro hasta los límites de Hidalgo), el máximo espesor de las facies, Cerro Ladrón, se aproxima a los 1500 m.

ii. Formación Soyatal

[Wilson y colaboradores \(1955\)](#), designan con este nombre, a una secuencia consistente de un conglomerado de clastos calcáreos, calizas y calizas arcillosas de color pardo claro y gris oscuro, intercaladas con lutitas calcáreas; la unidad es más arcillosa hacia la cima; con una edad correspondiente al Turoniano. Como localidad tipo, se reconoce al poblado Soyatal, Hgo., a 48 Km al noreste de Zimapán, Hidalgo.

[Carrillo y Suter, \(1982\)](#), denominan como Formación Soyatal, a toda la secuencia que sobreyace a las unidades calcáreas del Albiano Cenomaniano; incluyendo

dentro de la Soyatal, a las rocas arcillo-arenosas que también se denominaron como Formación Mexcala.

Los afloramientos se extienden en el sector septentrional entre el puerto El Colero y Zimapán; en las inmediaciones de los poblados La Vega, Rancho Nuevo, Xajhá, Bothiñá y San Antonio; también está expuesta en afloramientos aislados en el río Tula y en el arroyo las Tuzas. [Simons y Maples \(1957\)](#), midieron a la entrada de la Barranca de Tolimán, una sección sin plegar de aproximadamente 700 m. Sin embargo, su espesor puede ser menor, debido a que se encuentra plegada y erosionada.

Cenozoico

iii. Grupo San Juan

Este variado conjunto litológico está constituido por tobas, basaltos y riolitas aflorantes a 30 km al norte de la caldera Huichapan. Se reportaron edades de entre seis a siete millones de años. Su espesor es muy variable, pero no mayor a 400 m, observados en el Cerro el Gorrión. Las andesitas (TmA), se correlacionan a las erupciones del volcán Apartadero pertenecientes a este grupo [Milan \(1982\)](#),

iv. Toba Don Guinyó

[Segerstrom \(1961\)](#), definió inicialmente a esta unidad como tobas y brechas riolíticas y dacíticas bien endurecidas y con lentes horizontales de vidrio negro. Afloran en las inmediaciones de Tula y también en el flanco norte y sur de la Caldera Huichapan, localizada al poniente y fuera del área de estudio. Esta unidad geológica tiene aproximadamente un espesor de 170 m.

v. Volcanismo post-ignimbrítico

Esta unidad comprende la secuencia de andesitas y basaltos emitidos desde varios centros volcánicos, algunos de ellos emplazados en el borde de colapso de la caldera Huichapan. En términos generales, las rocas afaníticas, de color gris oscuro, estructura compacta y vesicular. Poseen fenocristales de andesina y augita en una mesostasis de plagioclasas y piroxenos. Estas rocas se presentan en flujos de enfriamiento de hasta 100 m de espesor ([Milan et al, 1993](#)).

vi. Formación Atotonilco El Grande

La Formación Atotonilco El grande, tiene un espesor de 165 m. Está compuesta por nueve unidades litoestratigráficas de intercalaciones vulcanosedimentarios descritos por [Arellano-Gil et al, \(2005\)](#):

Unidad 1 (0.0–30.0 m). Está compuesta por un conglomerado polimíctico basal con abundante matriz, con clastos redondeados y subredondeados de andesita, riolitas y tobas. Estos elementos varían en tamaño de cantos pequeños a bloques y se presentan en estratos tabulares de más de 1 m de espesor; otros estratos presentan estratificación cruzada o lenticular.

Unidad 2 (30.0–43.2 m). Está compuesta por grauwacas líticas de grano medio a grueso de baja esfericidad y subredondeados, de color gris, con clastos de rocas volcánicas, cuarzo, feldespatos, plagioclasa y vidrio esferulítico; hacia la parte media se presentan cuerpos lenticulares de conglomerado como rellenos de canal; en la parte superior disminuye el tamaño de grano, presentándose estratos delgados de limonitas. En este nivel se encuentran hojas fósiles y troncos.

Unidad 3 (43.2–53.2 m). Está compuesta por litarenitas cementadas por carbonato de calcio, con fragmentos de plagioclasa, andesita, cuarzo y piroxeno; la fábrica es isotrópica con empaque suelto y textura epiclástica de grano fino; los clastos son subangulosos con baja esfericidad. En la parte superior se presentan algunos cuerpos lenticulares de conglomerado y un horizonte de 4 m de lutita de color gris oscuro, con alto contenido de materia orgánica diseminada y hojas medianamente preservadas.

Unidad 4 (53.2–60.2 m). Está compuesta por grauwaca feldespática de color gris, con clastos de tamaño de arena fina, en estratos que varían en espesor de 20 a 30 cm, algunos con estratificación convoluta; en su parte media tiene un horizonte de 3 m de ceniza volcánica de composición silícica, el cual está cubierto por litarenita de grano medio, en la que predominan fragmentos subredondeados de andesita, cuarzo y feldespato; es notable la presencia de pequeños cuerpos lenticulares de arenisca conglomerática compuesta por clastos de andesita y piroclastos retrabajados. En las limolitas, se observa un horizonte con diatomeas y fragmentos de hojas.

Unidad 5 (60.2–97.4 m). Está compuesta por limolitas laminadas de color gris oscuro, en estratos de 1.0 a 2.5 m de espesor, en las que se presentan escasos ejemplares de ostrácodos, diatomeas y hojas; en la parte inferior de esta unidad aparecen intercalados dos horizontes de tobas líticas de color blanco, con abundantes fragmentos de pómez, de 2.0 y 4.0 m de espesor; también se presentan intercalados cuerpos lenticulares de conglomerado y arenisca conglomerática, los cuales son más abundantes hacia la parte superior de la unidad, donde los horizontes lenticulares son más grandes y de granulometría más gruesa.

Unidad 6 (97.4–114.4 m). Está compuesta por areniscas de grano fino de color gris claro, con clastos de origen volcánico (fragmentos de andesita, plagioclasa, mica y cuarzo) de baja esfericidad y subangulosos; las areniscas cambian en la parte superior de la unidad a areniscas conglomeráticas con clastos volcánicos subredondeados. En este intervalo se presentan lentes conglomeráticos aislados.

Unidad 7 (114.4–121.4 m). Está compuesta por limolitas y grauwas líticas de grano fino, poco compactas, formadas por fragmentos subangulosos de rocas volcánicas andesíticas y en menor proporción feldespatos, en estratos de 10 a 30 cm de espesor. Aparecen de manera aislada, cuerpos lenticulares de conglomerado polimíctico poco compacto.

Unidad 8 (121.4–133.4 m). Está compuesta por limolitas calcáreas de color gris, en estratos de 30 a 60 cm de espesor, en las cuales, hacia la parte superior, disminuye el contenido de carbonato de calcio y aumenta el tamaño de grano, primero a limolitas arenosas y después a areniscas conglomeráticas.

Unidad 9 (133.4–151.4 m). Está compuesta por litarenitas de grano medio de color gris claro, con partículas subredondeadas de andesita y feldespato, en estratos de 30 a 70 cm de espesor; en la parte inferior aparecen abundantes lentes de arenisca conglomerática que disminuyen hacia la parte alta, donde la secuencia termina con un horizonte de 1.5 m de espesor de tobas líticas, de color blanco.

Cuaternario

vii. Derrames de lava y conos cineríticos

Los derrames basálticos de lava y conos cineríticos fueron definidos por [Segerstrom. \(1961\)](#), como Basalto del Pleistocen. Posteriormente fueron

referidos como Derrames de Lava y Conos Cineríticos de edad cuaternaria [Fries](#). (1962), separándolos de las rocas volcánicas máficas, definidas como Basaltos Grupo San Juan, ya que parecen tener menor antigüedad geológica.

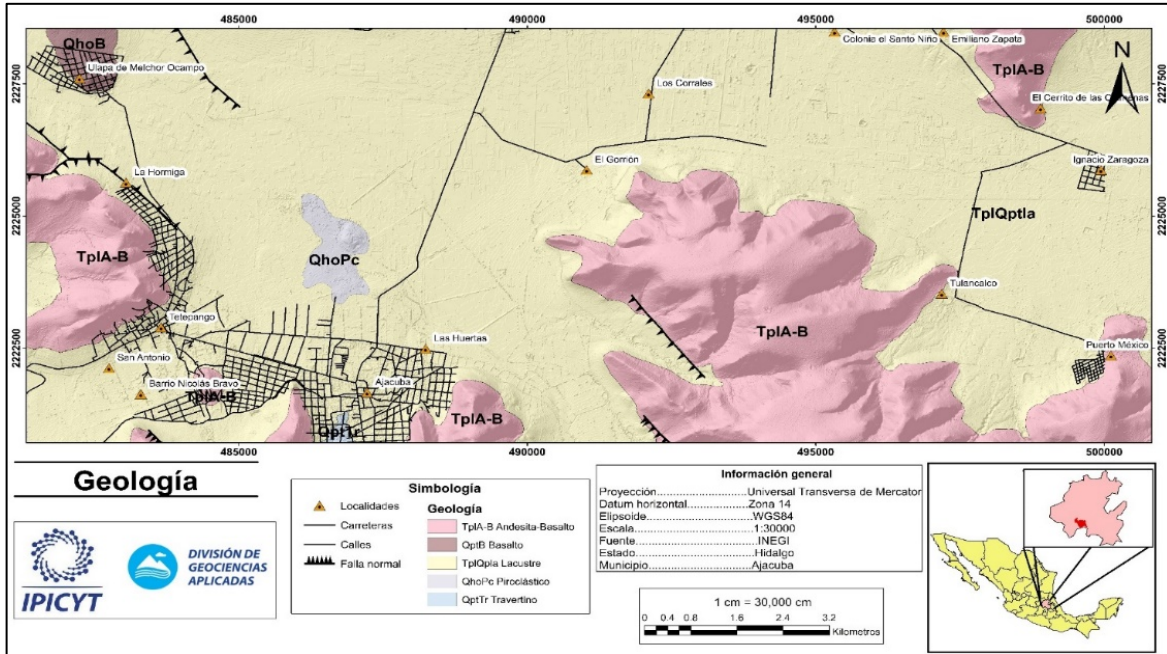


Figura 2 Mapa geológico de la zona de estudio. La geología predominante consta de rocas ígneas como andesita y basalto, el relleno del valle consta de depósitos vulcanosedimentarios de la formación Atotonilco el Grande.

2.2.3 Piezometría

La piezometría de la zona se comporta de forma normal, de las zonas altas hacia el valle. Se observa un flujo de Este a Oeste y se ubican cuatro conos de abatimiento, dos en el centro del valle, uno en la zona urbana de Ajacuba y otro en la zona urbana de Tetepango (Figura 3).

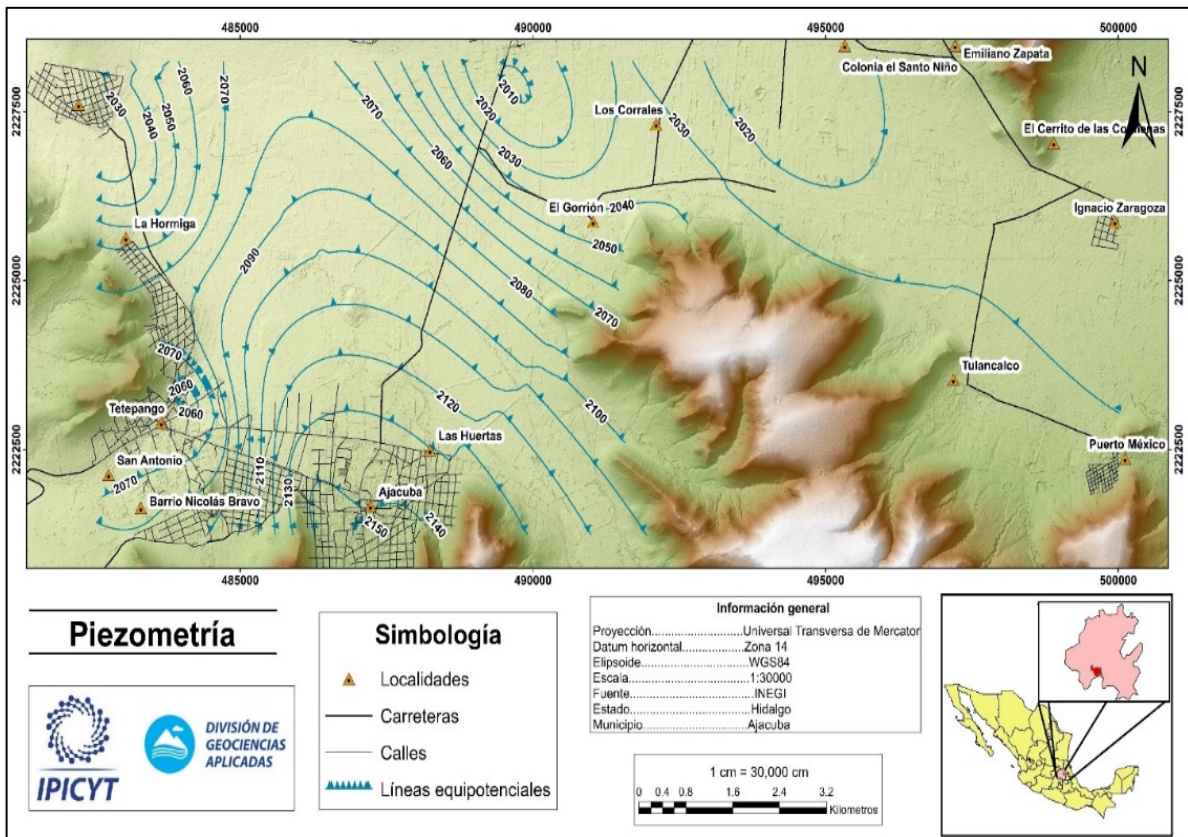


Figura 3 Piezometría de la zona de Ajacuba. Se observa un flujo subterráneo de los altos topográficos hacia el valle con una dirección hacia el predominante hacia el Este.

3. Metodología

3.1 Hidrogeoquímica

3.1.1 Muestreo

Para la caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea del acuífero de Ajacuba se analizaron parámetros fisicoquímicos y concentración iones mayores, menores y elementos traza en las muestras de agua. Para ello se realizó una campaña de muestreo de aprovechamientos: pozos de uso municipal, pozos privados y norias. Un total de 25 muestras de agua fueron recolectadas en botellas de 60 mL de polietileno (HDLP). Las botellas utilizadas para aniones, previamente se lavaron y enjuagaron siete veces con agua desionizada, mientras que para cationes y elementos traza se lavaron con HCl al 10% y enjuagadas siete veces con agua desionizada. Una vez tomada la muestra para cationes y elementos traza, se acidificaron con HNO_3^- concentrado para llevarlo a un $\text{pH} < 2$; las muestras de aniones no fueron acidificadas. La preservación del total de las muestras se realizó a una temperatura menor a 4°C para su transportación al laboratorio.

Para cada muestra se midió *in situ* los parámetros pH, conductividad eléctrica, alcalinidad por titulación, Potencial de Óxido-Reducción (ORP), Oxígeno disuelto (OD), Sólidos Totales Disueltos (STD), temperatura con ayuda de un multiparámetro Hanna® HI9829-00041.

Los iones mayores y elementos traza fueron enviados al Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, los cuales fueron determinados por espectrometría de plasma de acoplamiento inductivo óptico Modelo Termo ICAP 6500 Duo y los

aniones (SO_4^{2-} , NO_3 y Cl^-) por colorimetría en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.

3.1.2 Diagramas hidrogeoquímicos

A fin de verificar la precisión de los datos, se realizó un balance iónico para cada una de las muestras de las cuales, empleándose únicamente aquellas muestras con un error $\leq 10\%$ en la construcción de los diagramas hidrogeoquímicos.

A fin de identificar las facies químicas o familias de agua en las muestras, se elaboró el diagrama de Piper (1953). El diagrama de Scholler (1975), se construyó para representar las concentraciones de los diferentes iones presentes en el agua al poder compararse entre ellos por estar visualizados en escala semilogarítmica. El diagrama de Mifflin (1988), se desarrolló para determinar el sistema de flujo Tóthiano en cada una de las muestras. Para determinar los procesos hidrogeoquímicos dominantes se empleó el diagrama de Gibbs (1970). El diagrama de relación iónica $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ vs. $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ se empleó para determinar con qué tipo de rocas interactúa cada una de las muestras. Para determinar si las aguas son salinas, de reciente infiltración, si están influenciadas por la mezcla o por el intercambio iónico se usó el diagrama de Pratt (2003). Por su parte, los índices cloro-alcalinos (Schoeller, 1977) fueron empleados para determinar qué tipo de intercambio iónico se encuentra en cada una de las muestras. Finalmente el diagrama de miembros extremos se realizó para determinar tres diferentes tipos de agua y ver cómo interactúan o si tienen influencia entre ellas.

Con la identificación de los flujos presentes en el área de estudio, se procedió a elaborar secciones hidrogeoquímicas. Estas sirven para observar el

comportamiento de las concentraciones de los iones mayoritarios y algunos parámetros fisicoquímicos en los flujos identificados.

3.2 Calidad de agua

3.2.1 Calidad de Agua para consumo humano

3.2.1.1 NOM-127-SSA1-2021

Con el fin de poder identificar la presencia de algún contaminante en el agua de las muestras que estuvieran fuera de los límites permitidos en la normatividad mexicana vigente, se procedió a realizar una comparación entre los límites máximos permisibles en Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano: Límites permisibles de la calidad del agua” y las concentraciones en las muestras del área de estudio.

3.2.1.2 Índice de Calidad del Agua (ICA)

Para evaluar la calidad del agua cruda de los aprovechamientos muestreados a fin de determinar si es apta para consumo humano y el tratamiento que pudiera requerirse, se realizó la estimación del ICA-NSF (Índice de Calidad de Agua de la National Sanitation Foundation) que ha sido utilizado y validado por diversos estudios internacionales ([Torres et al., 2010](#)).

El desarrollo e implementación del ICA de manera formal y demostrada lo hicieron [Brown et al. \(1970\)](#) con el apoyo de la NSF, basándose en la estructura del índice de Horton y en el método Delphi para definir los parámetros, pesos ponderados, subíndices y clasificación a ser empleados en el cálculo. La clasificación considera las características que debe presentar la fuente de captación para consumo humano.

El índice de calidad de agua [Brown et al. \(1970\)](#), se calcula de la siguiente manera:

$$ICA = k \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

Donde:

K: Es la constante asignada a las características físicas de la muestra de agua (Cuadro 2)

C_i: Valor porcentual asignado al parámetro (por sus características fisicoquímicas)

P_i: Peso asignado al parámetro. (Asignado de acuerdo al riesgo)

Tabla 1 Características físicas de cada tipo de agua y su peso correspondiente (k).

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

Los pesos asignados se asignan los parámetros que se tengan, y se les asigna un peso en el intervalo de 1 a 4 de acuerdo con su importancia, es decir, entre más cercano al valor 1, más peso tiene el parámetro.

3.3.1 Índices de Calidad de Agua para uso de riego agrícola

El concepto de calidad de agua para el riego se refiere a las características del agua que puedan afectar a los recursos del suelo y cultivo en su uso a largo plazo [Done LD, 1964](#); [Almeida C, Quintanar S, González P, Mallea M, 2008](#); [Aher KR, Deshpande SM, 2011](#). Para evaluarla se toman tres criterios de salinidad, sodicidad y toxicidad, las dos primeras evaluadas directamente en el agua de riego y la última dependiente del cultivo del que se trate ([Tartabull y Bentancourt,](#)

2016). Para conocer el criterio de salinidad se evaluó la Conductividad Eléctrica (Richards, 1954), el Índice de Salinidad, Índice de Permeabilidad IP, (Balsameda *et al.*, 2006), Salinidad Efectiva SE, (Barrios Castillo, 2014) y Salinidad Potencial (SP, Barrios Castillo, 2014). En el caso del criterio de sodicidad, su evaluación se realizó a través de la Relación de Absorción del Sodio (RAS, Gapon, 1933), el Porcentaje de Sodio (%Na, Wilcox, 1955), Porcentaje de Sodio Soluble (PSS, Tartabull y Bentancourt, 2016) y Carbonato de Sodio Residual (CSR, Richards, 1954).

3.3.2 Conductividad Eléctrica (CE)

Se empleó un multiparamétrico marca Hanna modelo HI988194. Cada una de las muestras se midió la CE *in situ* y se registró en bitácora. Las muestras de agua se clasificaron de acuerdo con Richards (1954), Tabla 2.

Tabla 2 Clasificación del agua para su uso en el riego agrícola tomando como base su salinidad (Richards, 1954).

Clasificación	Valores de CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Criterio sobre la salinidad	Criterio sobre la calidad del agua
C1	<250	Baja	Excelente
C2	250-750	Media	Buena
C3	750-2250	Alta	Aceptable
C4	>2250	Muy alta	Dudosa/No aceptable

3.3.3 índice de Permeabilidad (IP)

Evalúa las concentraciones en meq L⁻¹ de iones que afectan la permeabilidad del suelo como el Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y HCO₃⁻. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$IP = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100$$

La evaluación de la calidad del agua para riego tomando como base el IP se presenta en la tabla 3.

Tabla 3 Evaluación de la calidad del agua para riego agrícola tomando como base el Índice de Permeabilidad ([Balsameda et al., 2006](#))

IP	Clasificación sobre la calidad del agua	
>75	Clase 1	Excelente
25-75	Clase 2	Buena
<25	Clase 3	No recomendable

3.3.4 Salinidad Efectiva (SE)

Índice creado para sustraer de la salinidad total los carbonatos y sulfatos de calcio que precipitan fácilmente cuando el agua de riego pasa a formar parte de la solución del suelo, por lo que deja de participar en la elevación de la presión osmótica. Se calcula con las siguientes ecuaciones ([Barrios Castillo, 2014](#)) y su clasificación se presenta en el Cuadro 5:

- a) Si el $Ca^{2+} > CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}$ entonces:

$$SE = (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+) - (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$$

- b) Si el $Ca^{2+} < CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}$ pero $Ca^{2+} > CO_3^{2-} + HCO_3^-$ entonces:

$$SE = (Mg^{2+} + Na^+ + K^+)$$

- c) Si el $Ca^{2+} < CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}$ pero $Ca^{2+} + Mg^{2+} > CO_3^{2-} + HCO_3^-$ entonces:

$$SE = (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+) - (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$$

- d) Si el $Ca^{2+} < CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}$ entonces:

$$SE = (Na^+ + K^+)$$

3.3.5 Salinidad Potencial (SP)

De acuerdo con [Barrios Castillo \(2014\)](#), este índice determina la cantidad de Cl^- y SO_4^{2-} que pueden afectar los cultivos según la permeabilidad del suelo. Estas sales son las últimas que permanecen en la solución del suelo cuando la humedad aprovechable disminuye a menos del 50%, es por lo que se debe estimar el efecto que causan sobre la presión osmótica.

Su cálculo se realiza con la siguiente ecuación y su clasificación junto con la SE se presenta en la tabla 4:

$$SP = Cl^- + \frac{SO_4^{2-}}{2}$$

Tabla 4 Calidad del agua para riego agrícola tomando como base la Salinidad Efectiva (SE) y la Salinidad Potencial (SP); tomado de [Tartabull y Bentancourt, \(2016\)](#)

Valor de SE y SP	Criterio de calidad
<3	Buena
3-15	Condicionada
>15	No recomendada

3.3.6 Relación de Absorción de Sodio (RAS)

La porosidad del suelo y la conectividad entre los poros (entrada y circulación del agua y gases) puede ser alterada por la presencia del sodio que por sus características de baja carga, elevada capa de hidratación y baja polaridad, es fácilmente retenido por arcillas y materia orgánica ([Tartabull y Bentancourt,](#)

2016). El cálculo del RAS se realiza siguiendo la ecuación de Gapon, (1933) y se presenta su clasificación en la tabla 5.

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Tabla 5 Calidad del agua para riego agrícola tomando como base la Relación de Absorción de Sodio (RAS). Tomado de Richards (1954).

RAS	Criterio de calidad
<10	Excelente
10-18	Buena
18-26	Dudosa
>26	No recomendable

3.3.7 Porcentaje de Sodio (%Na)

También llamado riesgo de sodio determina la cantidad de Na⁺ que puede estar creando enlaces químicos en el suelo y restringiendo el paso del agua. Se calcula a partir de la siguiente fórmula (Todd and Mays (1980) y se presenta su clasificación en la tabla 6.

$$\%Na = \frac{Na^+ + K^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \times 100$$

Tabla 6 Calidad del agua para riego agrícola tomando como base el Porcentaje de Sodio (%Na, Todd and Mays (1980).

% Na	Criterio de calidad
<20	Excelente

20-40	Buena
40-60	Permisible
60-80	Dudosa
>80	Inadecuada

3.3.8 Porcentaje de Sodio Soluble (PSS)

Determina la cantidad de sodio intercambiable que genera alteración de las partículas de arcilla (hinchazón y dispersión), lo que facilita la formación de costras en el suelo y reducción de la infiltración del agua, además de la toxicidad específica en las plantas por sodio (Tartabull y Bentancourt, 2016). Se determina a partir de la siguiente ecuación (Todd and Mays 1980) y la clasificación del agua para riego se presenta en la tabla 7.

$$PSS = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100$$

Tabla 7 Calidad de agua para riego agrícola tomando como base el Porcentaje de Sodio Soluble (PSS). Tomado de Todd and Mays (1980).

PSS	Criterio de calidad
<20	Excelente
20-40	Buena
40-60	Permisible
60-80	Dudosa
>80	No aceptable

3.3.9 Carbonato de Sodio Residual (CSR)

El CSR indica el peligro del sodio una vez que hayan reaccionado los cationes de calcio y magnesio con los aniones de carbonato y bicarbonato. Por ello es empleado para predecir la tendencia del calcio y magnesio a precipitar en el

suelo cuando se riega con aguas altamente carbonatadas. Al ocurrir esto, se incrementará la proporción relativa del sodio que esté presente en el suelo, es decir, aumentará la RAS y con ello, el riesgo de sodificación a pesar de que no hay como tal, un incremento en el sodio. Su cálculo se realiza con la siguiente ecuación y su clasificación se presenta en la tabla 8 (Tartabull y Bentancourt, 2016).

$$CSR = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

Tabla 8 Calidad del agua para riego agrícola de acuerdo con el Carbonato de Sodio Residual (CSR, Richards, 1954).

CSR	Criterio de calidad
<1.25	Buena
1.25-2.5	Condicionada
>2.5	No recomendable

3.4 Balance hidrológico

3.4.1 Forma general de la fórmula de balance hídrico

El estudio del balance hídrico se basa en la aplicación del principio de conservación de masas. Este establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier periodo de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada (Socolov y Chapman, 1974).

La ecuación general del balance hídrico aplicado en un acuífero se establece de la siguiente forma (Lesser *et al.* 2011):

$$P + Ri - ETR - Es - I = 0$$

P=Precipitación

Ri=Recarga inducida

ETR=Evapotranspiración

Es=Esguerrimiento

I=Infiltración

3.4.2 Precipitación

De acuerdo con la [NOM-011-CONAGUA-2015](#), los datos utilizados para un balance hídrico deben de obtenerse de registros hidrométricos de al menos 20 años consecutivos. Para ello se seleccionaron las estaciones meteorológicas que se encuentran a menos 25 km de la zona de estudio con un periodo histórico correspondiente de 1997 a 2007. Con el fin de cubrir los datos faltantes se utilizó el método del [U.S National Weather Service \(1996\)](#), para obtener los datos faltantes en el registro de algunas estaciones. Por otra parte, la mejor comprensión de la distribución de la precipitación en la zona de estudio, los datos se ubicaron con el método de Kriging, IDW y polígonos de Thiessen. Siendo el Kriging el más cercano a la realidad tomando en cuenta el tamaño y topografía de la zona de estudio ([Campos Aranda, 1998](#)).

3.4.3 Evapotranspiración

La ETR se puede estimar a partir de fórmulas empíricas que están en función de características climáticas de fácil obtención, siendo tres los parámetros que influyen de manera especial: la temperatura, la precipitación y la radiación incidente.

a) Ecuación de T de Turc:

A partir de observaciones realizadas en 254 cuencas, distribuidas por todos los climas del mundo (cálido, templado, frío), Turc obtuvo la siguiente expresión ([Pereira et al. 2009](#)):

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

Siendo P la precipitación media anual en mm, T es la temperatura media anual en °C y L se obtiene a partir de:

$$L=300+25T+0.05T^3$$

La limitación teórica de esta fórmula es que para $P < 0.31L$ daría una ETR mayor que la precipitación, por lo tanto, en tales casos, habrá que considerar a $ETR = P$ (1-116) ([Campos–Aranda, 1998](#)).

A partir de los datos de precipitación y temperatura, se utilizaron las ecuaciones de T de Turc para determinar un valor de evapotranspiración. La distribución de la evapotranspiración se realizó a través del álgebra de mapas. Se aplicó una corrección altitudinal para los datos de temperatura y así obtener una capa más cercana a la realidad. Se obtuvo un modelo lineal a partir de la gráfica de la temperatura media anual de cada estación contra su altitud. Finalmente, mediante un Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía ([INEGI, 2012](#)) se determinó la corrección altitudinal a partir del modelo lineal con la siguiente ecuación:

$$y=-0.0077x+35.033$$

3.4.4 Escurrimiento

El escurrimiento se calculó a partir de la metodología de [Chow *et al.* \(1994\)](#) y modificado por Almanza [Tovar, \(2021\)](#) mediante la siguiente ecuación:

$$Es = P * k$$

Donde P es la precipitación y k el coeficiente de escurrimiento.

a) **Coeficiente de escurrimiento.**

Para poder realizar el cálculo del escurrimiento superficial es necesario obtener el coeficiente de escurrimiento (k), ello a partir de la identificación del uso de suelo, textura y pendiente. A cada uno de los parámetros se les asignó un valor entre 1 y 4 de acuerdo con su impacto en la escorrentía y siguiendo lo estipulado por [Chow et al. \(1994\)](#) y [Castelán \(2011\)](#):

Tabla 9 Peso de cada parámetro de acuerdo con sus características (Almanza Tovar, 2021)

Valor	Parámetro		
	Uso de suelo (Us)	Textura del suelo (Ts)	Pendiente (P)
1	Bosque	Gruesa	0-5%
2	Pastizales	Media	6-10%
3	Terrenos cultivados	Fina	11-30%
4	Zona urbana		

Para determinar la capa de escurrimiento se utilizaron los coeficientes de escorrentía superficial (k) desarrollados a partir del análisis de las capas de usos de suelo y vegetación, pendiente y textura del suelo. La delimitación de las zonas de uso de suelo y vegetación se realizó a partir del Continuo Nacional de Uso de Suelo de la Serie VII de [INEGI \(2021\)](#).

Utilizando el conjunto de datos vectoriales edafológicos escala 1:250,000 de la serie II del ([INEGI, 2014](#)), se obtuvo la distribución de la granulometría del suelo y se clasificó en gruesa, media y fina.

La pendiente en la zona de estudio se desarrolló a partir del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) (INEGI, 2012) con una resolución de 30 m.

Tabla 10 Valor de k de acuerdo con el uso de suelo, pendiente y textura del suelo (Almanza Tovar, 2021)

Uso del suelo y pendiente del terreno	Textura Gruesa	Textura Media	Textura Fina
Bosque			
Plano (0-5% pendiente)	0.1	0.3	0.4
Ondulado (6-10% pendiente)	0.25	0.35	0.5
Escarpado (11-30% pendiente)	0.3	0.5	0.6
Pastizales			
Plano (0-5% pendiente)	0.1	0.3	0.4
Ondulado (6-10% pendiente)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (11-30% pendiente)	0.22	0.42	0.6
Terrenos cultivados			
Plano (0-5% pendiente)	0.3	0.5	0.6
Ondulado (6-10% pendiente)	0.4	0.6	0.7
Escarpado (11-30% pendiente)	0.52	0.72	0.82
Zona urbana			
Plano (0-5% pendiente)	0.7	0.81	0.9
Ondulado (6-10% pendiente)	0.76	0.8	0.92

3.4.5 Recarga inducida

A partir de la información proporcionada por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP; 2011), la información de las zonas cultivadas de Hidalgo de la Serie IV de Frontera Agrícola se obtuvo el área de las zonas en donde se implementa el riego es de (116,904,634.01 m²). El retorno de riego que CONAGUA (2020), reporta es de 17.7 hm³ que corresponden a 17,700,000 mm.

Realizando la división del retorno de riego sobre el área., se obtuvo un valor de infiltración de 151.4 mm (CONAGUA, 2020).

Se obtuvo el área de la zona urbana a partir del Continuo Nacional de Uso de Suelo de la Serie VII de INEGI (2021), con una extensión de 24,811,513.3 m². De acuerdo con los datos de INEGI (2021), la recarga por el sistema de abastecimiento es de 1.4 hm³ (1,400,000 mm), para el caso de las zonas urbanas se obtuvo un valor de infiltración de 56.42 mm.

3.4.6 Infiltración

Es el proceso, por el cual el agua penetra en el suelo, a través de la superficie de la tierra y queda retenida por él o alcanza un nivel acuífero incrementando el volumen acumulado anteriormente (Custodio-Llamas, 1983).

La infiltración se deduce a partir de la ecuación del balance hidrológico (Lesser *et al.* 2011):

$$I = P + Ri - ETR - Es$$

3.5 Vulnerabilidad acuífera

El concepto de vulnerabilidad de un acuífero está fundado en la hipótesis de que el medio físico en el que se encuentra el acuífero le proporciona cierta protección de los agentes externos, por ello existen zonas con mayor propensión que otras a ser contaminadas (Goya Sánchez, 2011).

3.5.1 D.R.A.S.T.I.C

Es una metodología desarrollada por Aller *et al.* (1987) que evalúa el potencial de contaminación de las aguas subterráneas. Sus siglas conforman cada uno de

los parámetros hidrogeológicos que son considerados con un mayor impacto en el potencial de contaminación de una zona.

Sus siglas en inglés corresponden a:

- D:** Depth (profundidad a la lámina de agua freática,
- R:** Recharge (recarga neta),
- A:** Aquifer (litología del acuífero),
- S:** Soil (tipo de suelo),
- T:** Topography (topografía),
- I:** Impact (naturaleza de la zona no saturada) y
- C:** Hydraulic conductivity (conductividad hidráulica del acuífero).



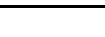
Cada uno de los parámetros tiene un valor y un peso dependiendo de la importancia que tiene en la evaluación del área. A cada valor se le asigna un valor entre 1 y 10. Cada valor de cada parámetro es multiplicado por un factor de importancia que va de 1 a 5, estos factores evaluados son sumados para obtener el índice en la siguiente ecuación y cuyas ponderaciones se presenta en la tabla 11.

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

Tabla 11 Peso de cada parámetro en la metodología DRASTIC. [Aller et al. \(1998\)](#) y la gama de colores utilizada se observa en la tabla 12.

Sigla	Parámetro	Peso (w)
D _w	Profundidad del nivel freático	5
R _w	Recarga neta	4
A _w	Material del acuífero	3
S _w	Tipo de suelos	2
T _w	Topografía	1
I _w	Impacto de la zona vadosa	5
C _w	Conductividad hidráulica	3

Tabla 12 Código de colores de acuerdo al índice de DRASTIC propuesto por (Aller et al. 1998).

	Color	Índice DRASTIC	CMYK	RGB
	Violeta	<79	40,90,0,0	187,41,187
	Índigo	80-99	100,72,0,0	51,51,153
	Azul	100-119	100,98,0,0	0,20,157
	Verde oscuro	120-139	100,0,54,40	0,153,70
	Verde claro	140-159	46,0,90,0	151,215,0
	Amarillo	160-179	0,9,100,2	249,226,0
	Naranja	180-199	0,60,100,0	255,130,0
	Rojo	>200	0,81,87,15	218,41,18

Los valores obtenidos se normalizaron de acuerdo con la siguiente ecuación (Almanza, 2021):

$$Vi_n = 100 * \frac{Vi_x - Vi_{min}}{Vi_{max} - Vi_{min}}$$

Donde: Vi_n = índice de vulnerabilidad normalizado, Vi_{min} = índice de vulnerabilidad mínimo, Vi_{max} = índice de vulnerabilidad máximo, Vi_x = índice de vulnerabilidad.

3.5.1.1 D-Profundidad

Se desarrolló el nivel piezométrico a partir de datos del nivel estático de 2007, proporcionados por la Comisión Estatal del Agua y Alcantarillado del estado de Hidalgo (CEAA, 2007). Se ponderaron las profundidades a partir de criterios utilizados en (Ramos Leal, 2002; Almanza, 2021), los cuales se establecen en la siguiente tabla:

Tabla 13 Ponderación de la metodología DRASTIC a la profundidad del nivel estático. (Almanza, 2021)

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

3.5.1.2 R-Recarga neta

El parámetro de recarga se obtuvo a partir del resultado de infiltración del balance hidrológico. De acuerdo con los milímetros de recarga se reclasificaron los resultados a partir de la siguiente tabla (Almanza, 2021):

Tabla 14 Ponderación de la recarga neta de acuerdo con la metodología DRASTIC. (Almanza, 2021):

Rango (mm)	Ponderación
<50	1
50-100	3
100-178	6
178-254	8
>254	9

3.5.1.3 A-Medio acuífero

Se determinó el medio acuífero a partir de la geología de la zona. Al no haber obtenido información de corte de pozos se utilizó la información de la Carta Geológica de Mixquiahuala (SGM, 2019) teniendo en cuenta lo mencionado por Arellano *et al.* (2005) sobre los depósitos vulcano-sedimentarios para poder modelar el medio acuífero y reclasificarlo como indica en la tabla 15.

Tabla 15 Ponderación del material geológico que compone el acuífero de acuerdo con la metodología DRASTIC (Aller *et al.* 1987 and Goya, 2011)

Material del acuífero			
Material original (Aller <i>et al.</i> 1987)	Clase	Material en área de estudio (Goya, 2011)	Clase
Lutita masiva	1-3	Arcilla	1
Ígnea/metamórfica	2-5	Andesita	2
Ígnea/ metamórfica alterada	3-5	Margas	2
Till Glacial	4-6	Arcilla/Limo	3
Arenisca estratificada, caliza, lutitas	5-9	Ceniza volcánica	3
Arenisca masiva	4-9	Arcilla/Arena	4
Caliza masiva	4-9	Caliza	4
Arena y grava	4-9	Conglomerado	4
Basaltos	2-10	Toba	4
Caliza cárstica	9-10	Aglomerado	5
		Arena	5
		Basalto	5
		Basalto/Escoria	6
		Arena/grava	7
		Escoria	7
		Escoria/Piroclasto	7
		Grava	9
		Riolita	6

3.5.1.4 S-Suelos

A partir de la información obtenida del conjunto de datos vectoriales edafológicos, escala 1:250000 de la Serie II. Continuo Nacional (INEGI, 2014), se ubicaron los

distintos tipos de suelo y se clasificaron (Tabla 16) de acuerdo con [Aller et al. \(1987\)](#) y [Goya, \(2011\)](#).

Tabla 16 Ponderación de los distintos tipos de suelo de acuerdo con la metodología DRASTIC ([Aller et al.1987 and Goya, 2011](#))

Tipo de suelo			
Material original (Aller et al. 1987)	Clase	Material en el área de estudio (Goya, 2011)	Clase
Arcillas no agregadas y material no compacto	1	Andosol	1
Arcilla margosa	3	Luvisol	1
Limo margoso	4	Solonchak	1
Marga	5	Gleysol	1
Arenisca margosa	6	Histosol	1
Agregado arcilloso o comprimido	7	Vertisol	7
Arena	9	Phaeozem	9
Fino o ausente	10	Fluvisol	9
Grava	10	Cambisol	10
		Litosol	10
		Regosol	10

3.5.1.5 T-Topografía

A partir del modelo digital de elevación obtenido de [INEGI, \(2012\)](#) se obtuvo un mapa de las pendientes en porcentaje, las cuales se evaluaron siguiendo la clasificación de [Almanza, \(2021\)](#) y presentes en la tabla 17:

Tabla 17 Ponderación del porcentaje de pendiente del terreno de acuerdo con la metodología DRASTIC.

Pendiente (%)	Clase
0-2	10

2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

3.4.1.6 I-Impacto a la zona vadosa

Tomando como base la información de la Carta Geológica de Mixquiahuala (SGM, 2019), se determinaron las distintas litologías en la zona y se les asignó una clase (Tabla 18) de acuerdo con lo propuesto por [Aller et al. \(1987\)](#) y [Goya, \(2011\)](#):

Tabla 18 Ponderación del impacto a la zona vadosa de cada material litológico de acuerdo con la metodología DRASTIC ([Aller et al.1987](#) and [Goya, 2011](#))

Material de la zona vadosa			
Material original (Aller et al.1987)	Clase	Material área de estudio (Goya, 2011)	Clase
Capa confinante	1	Arcilla	2
Limo/arcilla	2-6	Arcilla/Limo	3
Lutita	2-5	Ceniza volcánica	3
Caliza	2-7	Margas	3
Arenisca	4-8	Andesita	4
Caliza estratificada, arenisca, lutita	4-8	Arcilla/Arena	4
Arena, grava con limo, arcilla	4-8	Caliza	5
Ígnea/metamórfica	2-8	Toba	5
Arena y grava	6-9	Arena	6
Basalto	2-10	Basalto	6
Caliza cárstica	8-10	Conglomerado	6
		Basalto/Escoria	7
		Aglomerado	8

	Arena/Grava	8
	Escoria	8
	Escoria/Piroclasto	8
	Grava	9

3.5.1.7 C-Conductividad hidráulica

Para la obtención de las conductividades hidráulicas de las distintas litologías se tomó como base la información de [CONAGUA, \(2021\)](#) y [Garfias Quezada \(2015\)](#).

A partir de esta información se les asignó una clase (Tabla 19) de acuerdo con [Aller et al. \(1987\)](#):

Tabla 19 Ponderación de la conductividad hidráulica de acuerdo con la metodología DRASTIC [Aller et al. \(1987\)](#):

Conductividad hidráulica (m·d ⁻¹)	
Intervalo	Clase
0.040746-4.0746	1
4.0746-12.2238	2
12.2238-28.522	4
28.522-40.746	6
40.746-81.492	8
>81.492	10

4. Resultados

4.1 Modelo hidrogeológico conceptual

El modelo hidrológico conceptual nos permitió definir el sistema acuífero de Ajacuba, revelando cuatro sistemas de flujo subterráneo. Basando en la teoría de los flujos gravitacionales de Tóth, se pueden identificar estas cuatro zonas de evolución del agua subterránea (Figura 4). La primera comienza en el centro de

la zona urbana de Ajacuba y se dirige hacia el norte, atravesando el valle (Azul). La segunda se encuentra al oeste del área de estudio, extendiéndose desde la localidad de Presa Nueva hasta la Colonia El Santo Niño (Verde). La tercera está ubicada en el centro de la zona urbana de Tetepango (Naranja), y la cuarta atraviesa el área de Tetepango en dirección a Carrillo Puerto (Amarillo).

Tabla 20 Muestras de cada uno de los flujos ubicados en la zona de estudio

Zona	Muestras involucradas
I (azul)	10,9,21,8,20,18,19,12,13,5, 4
II (Verde)	1,2,3
III (Naranja)	22,14, 15
IV(Amarillo)	16,23

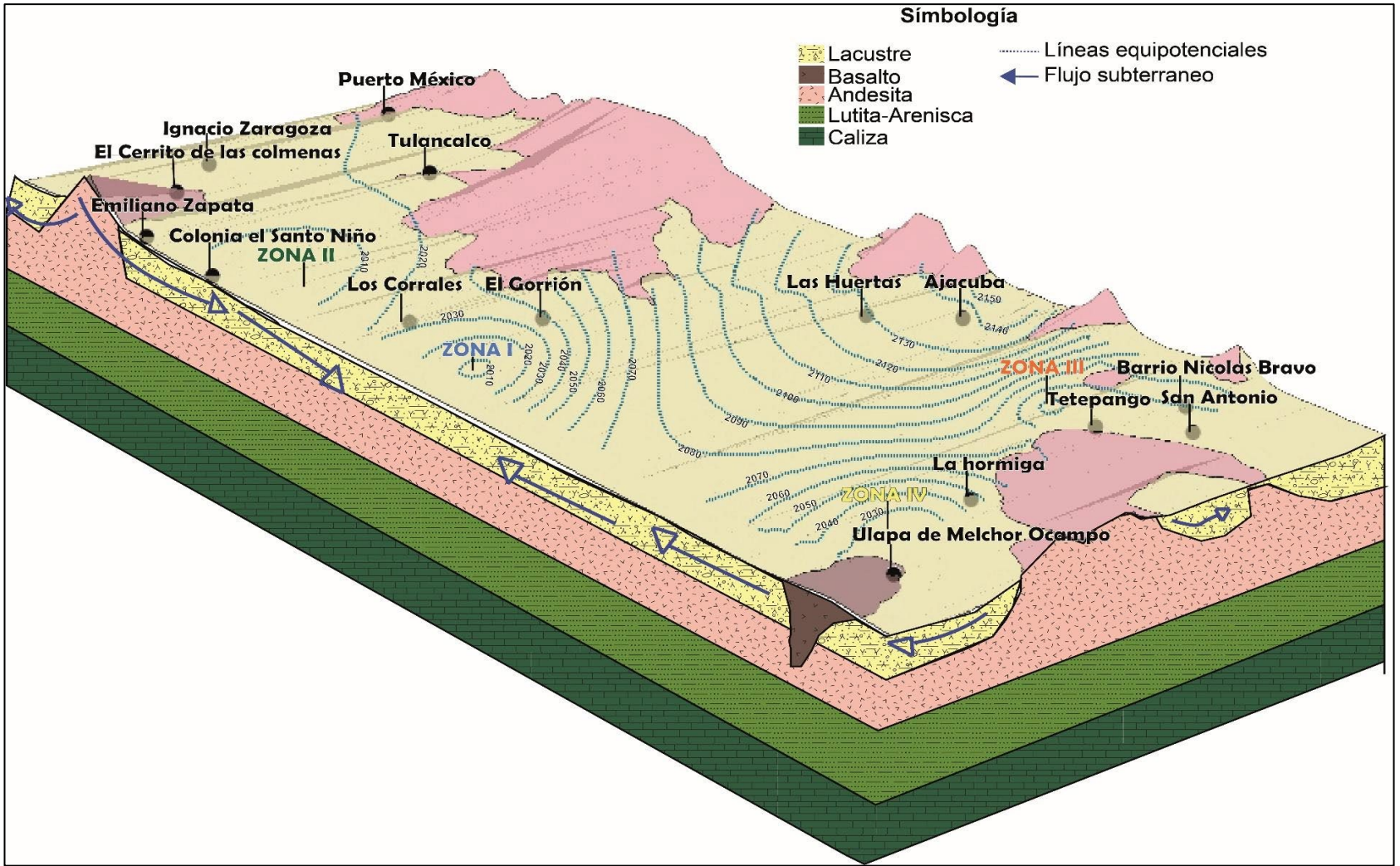


Figura 4 Modelo conceptual de la zona de estudio. Se observan los niveles piezométricos respecto al nivel de mar y las 4 zonas de flujo determinadas en la zona así como la geología y el comportamiento de los flujos subterráneos.

4.2 Hidrogeoquímica

4.2.1 Diagrama de Piper

En el diagrama de Piper identificamos las muestras que componen el flujo I (color azul), en estas existen tres principales familias de agua bicarbonatada cálcica que corresponde a las muestras que se ubican en la zona de recarga (10, 21, 20, 9 y 8), bicarbonatada cálcica magnésica corresponde al flujo intermedio de la zona y bicarbonatada sódica donde ubicamos la zona de descarga o de mayor evolución (4 y 5). Los principales procesos evolutivo que se observa son la mezcla de agua ubicadas en el centro del diamante indicando que no tienen un ion dominante (flecha verde) e intercambio iónico el cambio entre las familias bicarbonatada cálcica a bicarbonatada sódica (flecha roja).

Las muestras que componen el flujo II (color verde) pertenecen principalmente a la familia bicarbonatada cálcica magnésica. La zona de recarga está representada por la muestra 1 y los aprovechamientos ubicados en el área de descarga son las muestras 2 y 3.

En el caso del flujo III las muestras 22 y 14 se ubican en el área de recarga y pertenecen a la familia bicarbonatada cálcica magnésica. A pesar de que ambas muestras se encuentran en la zona de recarga, se observa una diferencia en el predominio de cationes: en la muestra 22 el calcio es el catión dominante, mientras que en la muestra 14 es indeterminado, lo que representa el proceso de mezcla en este flujo.

Las muestras del flujo IV (color amarillo) pertenecen a la familia bicarbonatada cálcica magnésica en la zona de menor evolución (16), y la muestra 23 pertenece a la familia bicarbonatada sódica.

Las muestras de los canales de riego (color rojo) son de la familia bicarbonatada sódica y en el diagrama se ubican en la zona de mezcla, lo que marca la influencia que tienen dicha agua en el acuífero.

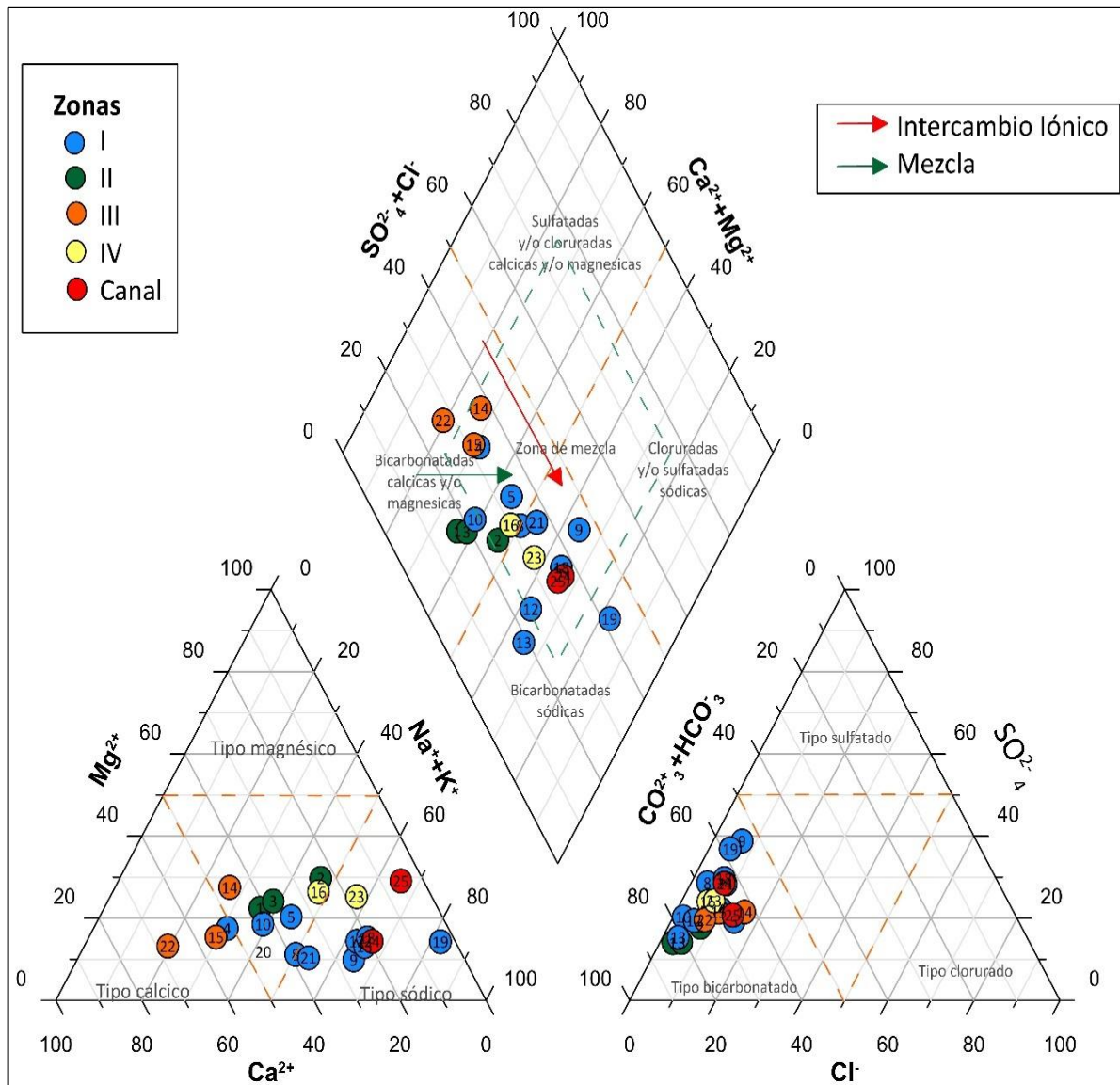


Figura 5 Diagrama de Piper en donde se muestran las muestras que componen al flujo I (color azul), flujo II (color verde), flujo III (color naranja), flujo IV (color amarillo) y las muestras de los canales de riego (color rojo).

4.2.2 Diagrama de Scholler

Con el diagrama de Scholler clasificamos las de agua.

En las muestras de la zona I, en específico la 5, 8, 9, 12, 13, 18 y 21, son de tipo $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, las muestras 4, 10 y 20, son de tipo $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ y la muestra 19, es de tipo $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$. Las muestras de la zona II, son de tipo $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ de acuerdo con las concentraciones de los cationes, las muestras 1 y 3, son de tipo $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ y la muestra 2, es de tipo $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$. Las muestras de la zona III, son de tipo $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, respecto a los cationes las muestras 15 y 22, son de tipo $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ y la muestra 14, es de tipo $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. Las muestras de la zona IV, son de tipo $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ y $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$. La muestra 24, que pertenece al canal de distribución de las aguas de riego es de tipo $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ y la muestra 25 es de tipo $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$.

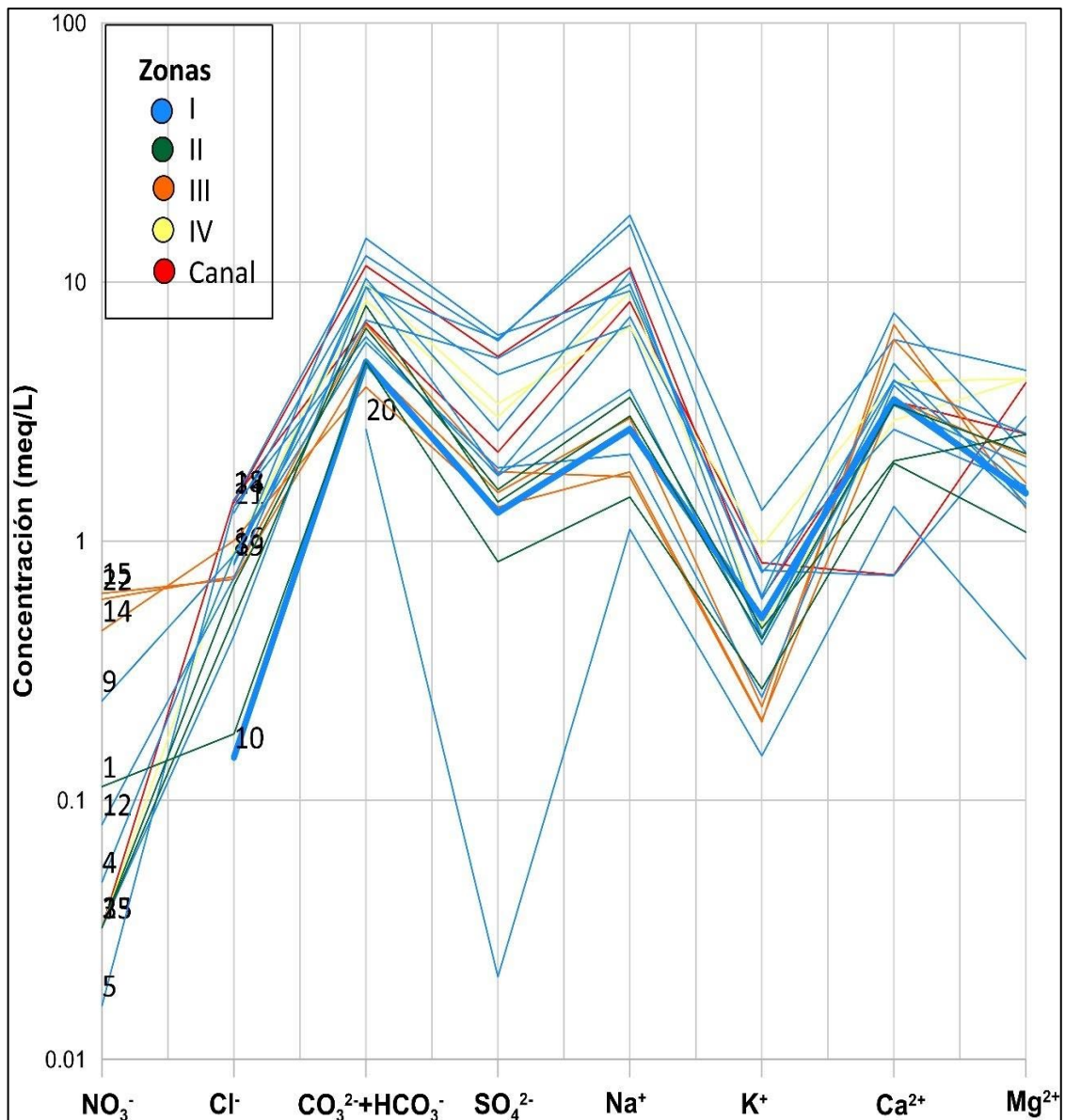


Figura 6 Diagrama de Scholler, se muestran los tipos de aguas en cada uno de los flujos y las muestras de los canales de riego.

4.2.3 Diagrama de Mifflin

Este diagrama nos proporciona la evolución del agua de acuerdo con su hidrogeoquímica (Figura 7). En una evolución normal se esperaría un aumento de los iones, lo que representa el tipo de flujo. Sin embargo, en nuestro caso, esta evolución normal no se respeta debido a la influencia de aguas de diferente

calidad. Es decir, el proceso de mezcla tiene una gran influencia y modifica estas tendencias.

En el diagrama, las muestras de la zona I, se ubican entre un flujo intermedio y regional. La zona II, se encuentra en un flujo intermedio. En la zona III, ubicamos un flujo que va de intermedio a regional, mientras que la zona IV se sitúa en el flujo regional. Finalmente, el agua de los canales se ubica en un flujo regional (Figura 7).

De acuerdo con el diagrama de Piper, la familia de agua que corresponde a bicarbonatada cálcica y los aprovechamientos que se ubican en la zona de recarga debería corresponder al flujo local. Atribuimos este desfase de flujo a la mezcla de agua del canal, la cual tiene una menor calidad y un aumento de los iones.

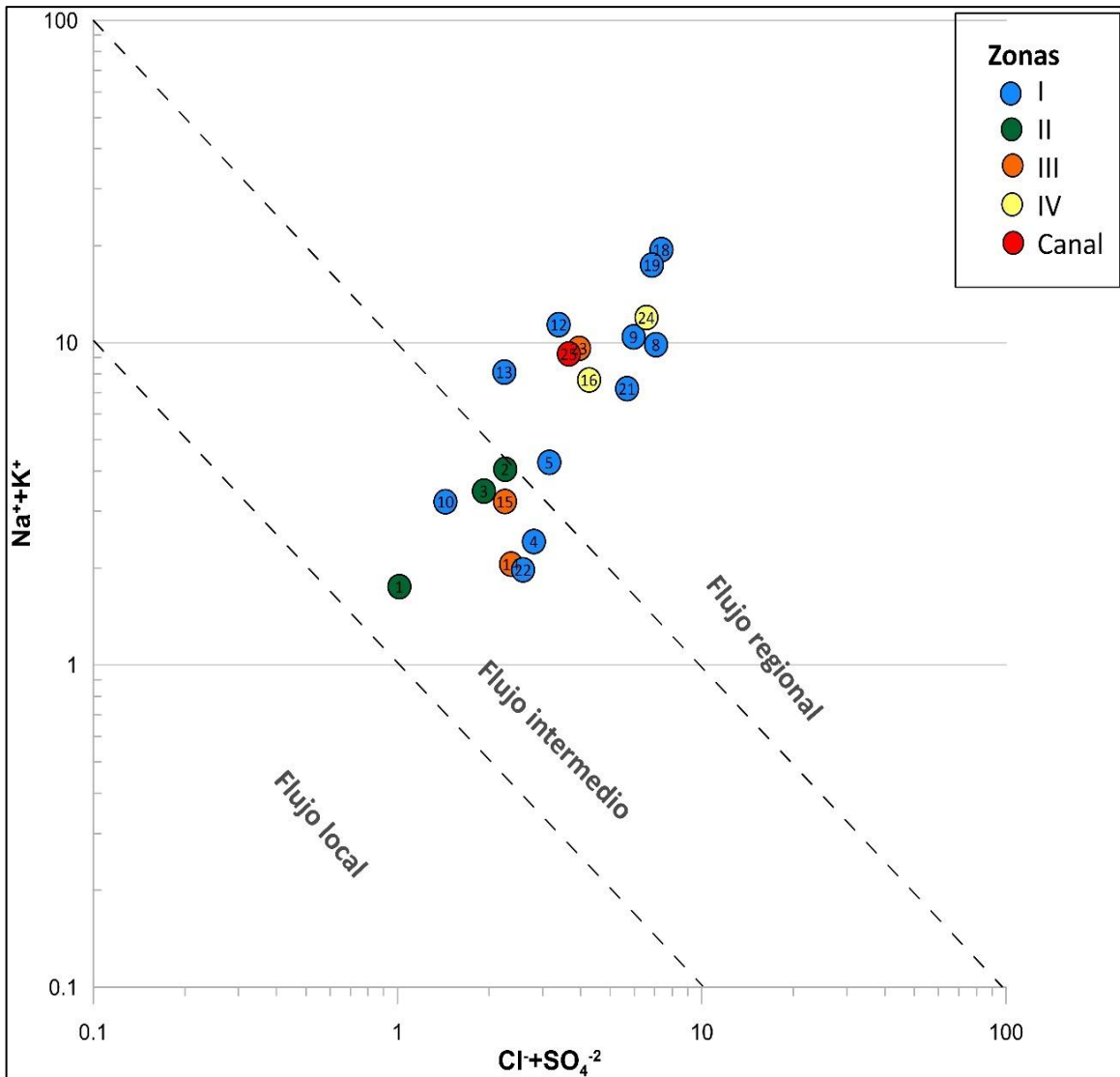


Figura 7 Diagrama de Mifflin en donde se observa el tipo de flujo de cada una de las muestras, la zona se ubica en un flujo intermedio a regional atribuido a la mezcla de agua de diferente calidad.

4.2.4 Diagrama de Gibbs

En el diagrama de Gibbs deducimos procesos hidrogequímicos en el agua del acuífero, las muestras de la zona I, se ven influenciadas por el proceso de evaporación-cristalización, interacción agua-roca y precipitación meteórica, en esta se observa la evolución del agua subterránea en su recorrido. La zona II, por los procesos de interacción agua-roca y evaporación-cristalización. En la zona III, se ve la influencia de los procesos de interacción agua-roca y en la zona IV, por los procesos de interacción agua-roca; así como, de la evaporación-

cristalización. Las muestras del canal se sitúan en el área de evaporación, se presentan como las muestras de mayor evolución.

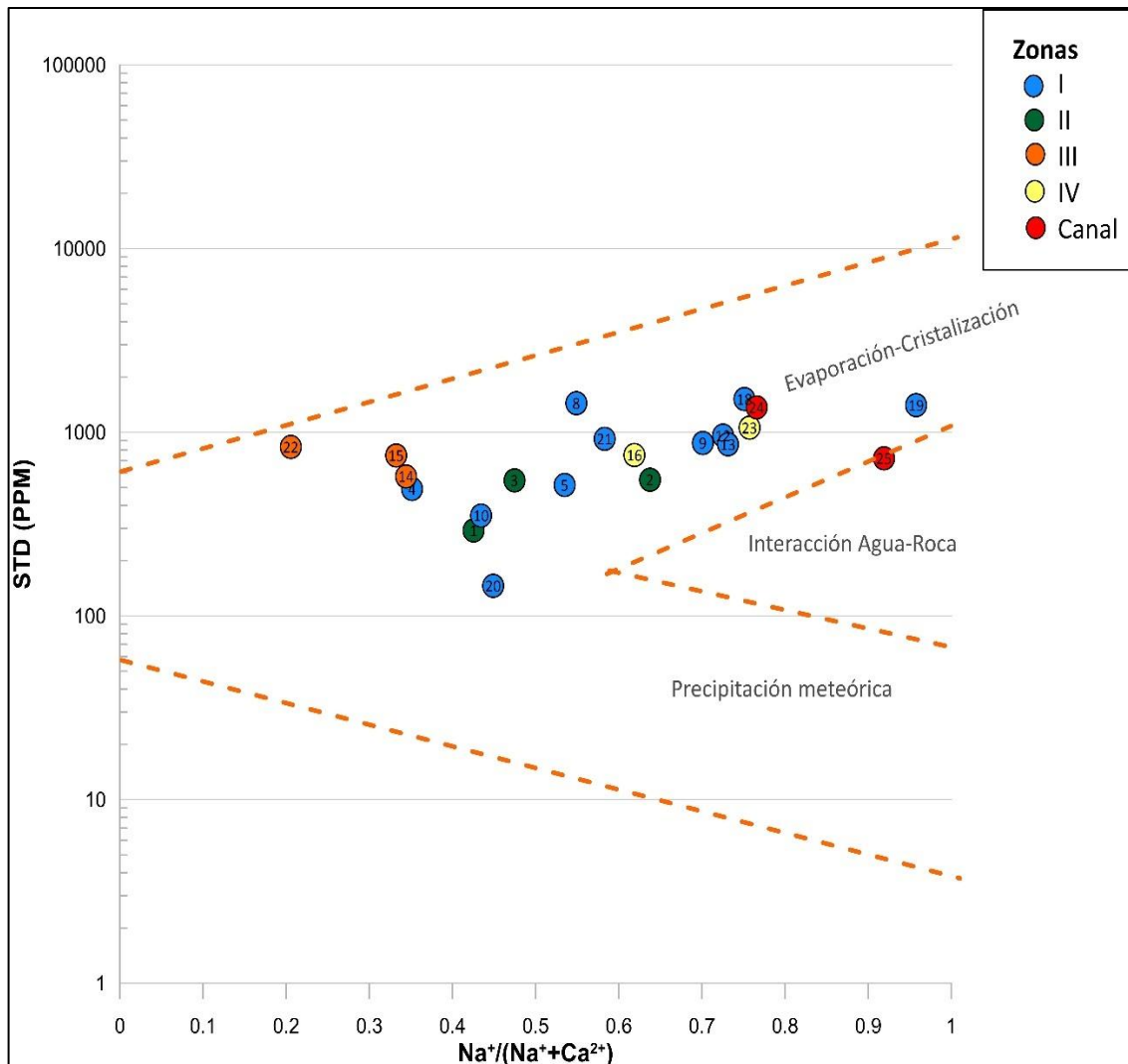


Figura 8 Diagrama de Gibbs que muestra los procesos de interacción agua-roca que influyen a cada una de las muestras.

4.2.4 Relación iónica HCO_3^-/Na^+ vs Ca^{2+}/Na^+

Este diagrama nos permite deducir la interacción agua-roca en las muestras analizadas. En la zona I están influenciadas por aguas de reciente infiltración, y se sitúa sobre el proceso de meteorización de silicatos. En la zona II, las muestras presentan influencia de agua de reciente infiltración y con tendencia a la alteración de silicatos. Las muestras de la zona III, corresponden a aguas de

reciente infiltración, mientras que en la zona IV, también se tienen aguas de reciente infiltración, pero con tendencia hacia la meteorización de silicatos. Mientras que en las muestras tomadas de los canales se deduce una tendencia a evaporación, alteración de silicatos.

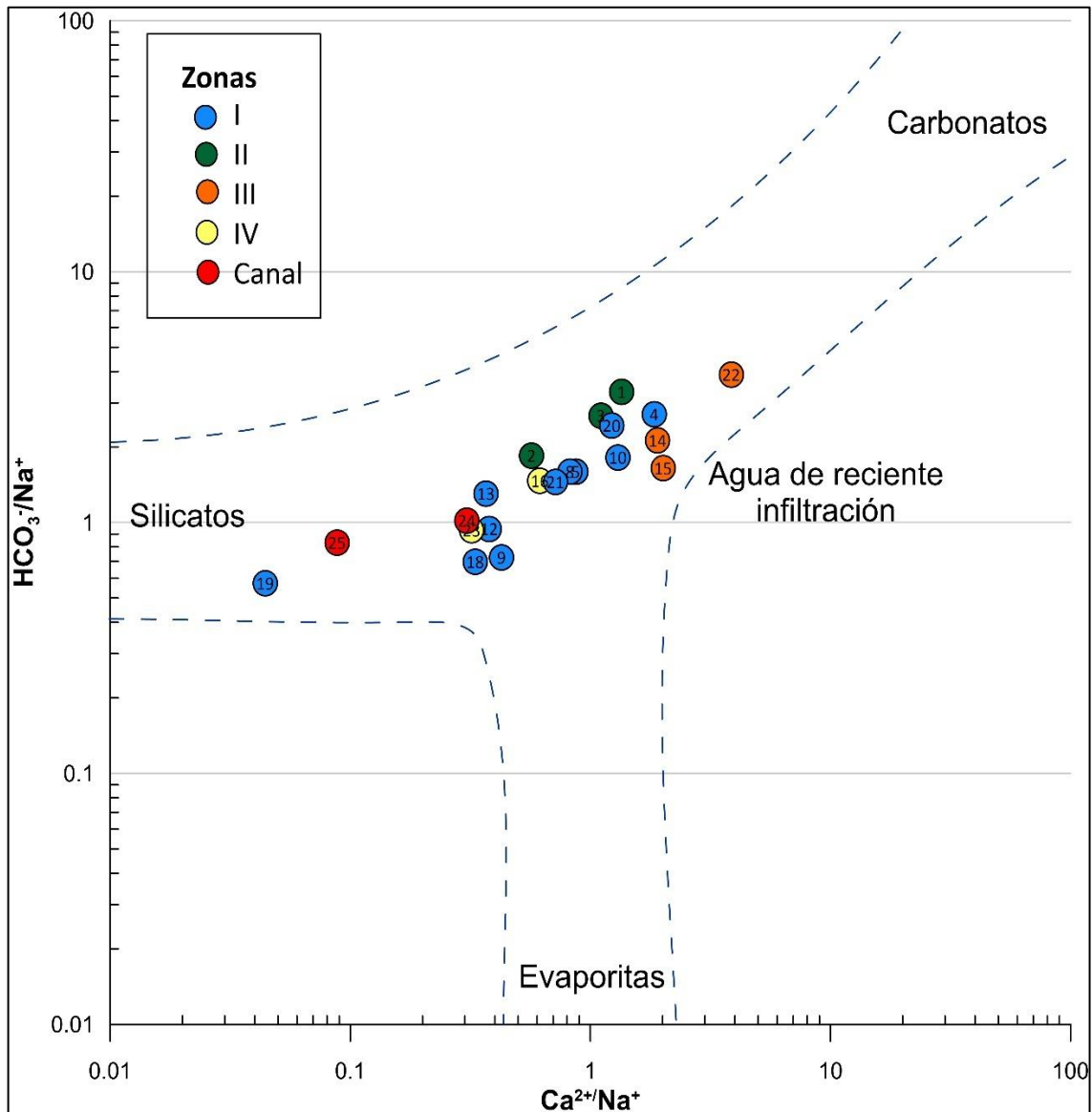


Figura 9 Diagrama de relación iónica $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ vs $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ en donde se ubican las muestras de los cuatro flujos en la zona, y la interacción que influye en cada una de las muestras.

4.2.5 Diagrama de Pratt

Las muestras de la zona I, de acuerdo con el diagrama de Pratt, se encuentran la mayoría influenciadas por el intercambio iónico, solo la muestra cuatro se

encuentra en medio de agua de reciente infiltración e intercambio iónico. Las muestras de la zona II, recaen en intercambio iónico. Las muestras de la zona III, se muestran en el diagrama influenciadas por el agua de reciente infiltración y la mezcla. Las muestras de la zona IV, se ubican en intercambio iónico mientras que las muestras tomadas de los canales de riego se encuentran en intercambio iónico y con frontera a agua salina.

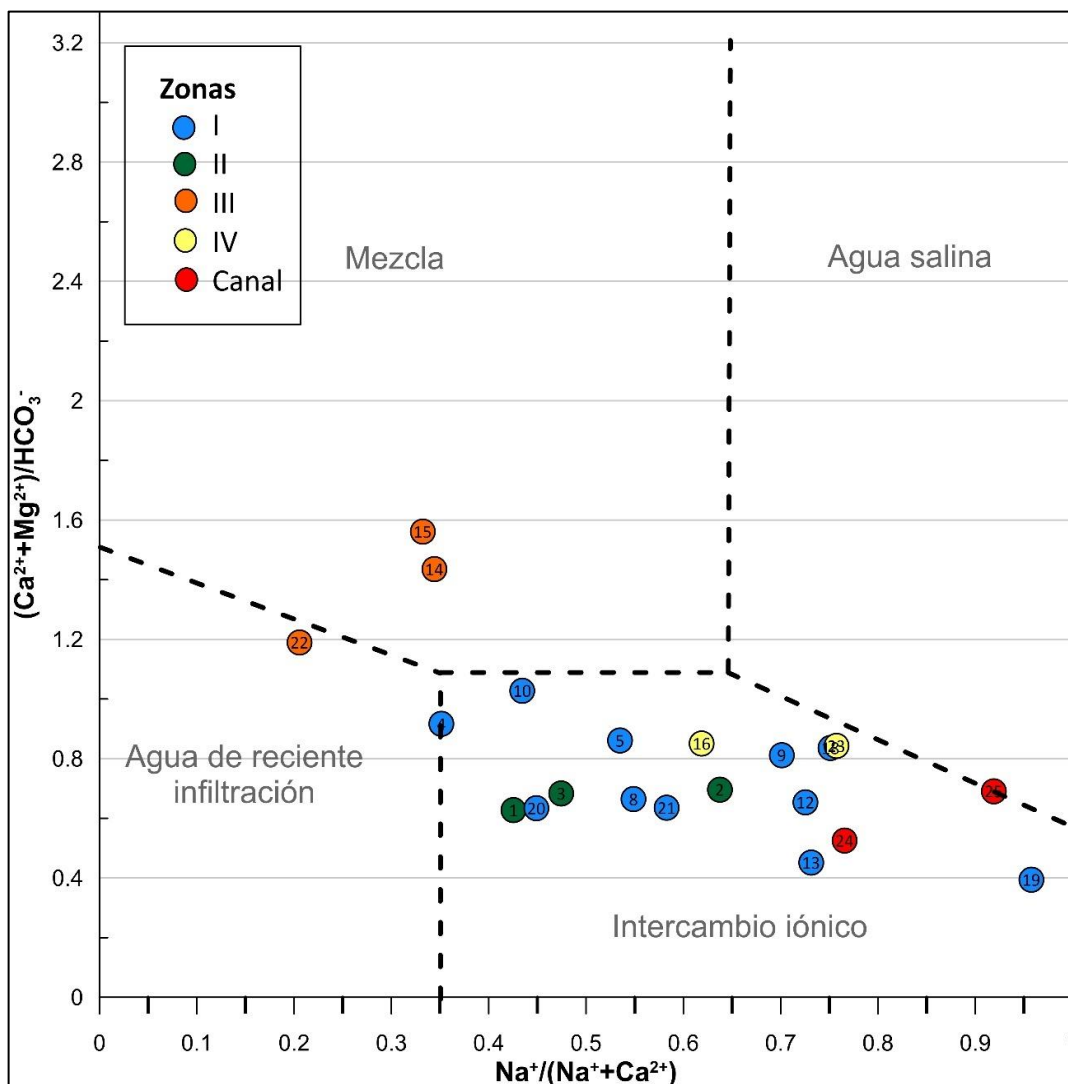


Figura 10 Diagrama de Pratt principales procesos de interacción de agua roca.

4.2.6 Secciones hidrogeoquímicas

En el perfil hidroquímico del flujo I, se observa una variabilidad en el pH en la zona intermedia, la zona de recarga y descarga se comportan de forma similar. La conductividad eléctrica es baja en la zona de recarga. El un máximo $3023 \mu\text{S cm}^{-1}$ se encuentra en la zona intermedia y un descenso en la zona de descarga. Los sólidos totales disueltos se comportan de forma similar a la conductividad eléctrica teniendo un máximo de 1516 ppm. Dentro de los cationes mayoritarios se nota un comportamiento de incremento de Na^+ y K^+ hacia la zona intermedia y un claro decremento hacia la zona de descarga. Los HCO_3^- son el anión que muestra una variabilidad en la concentración en la zona intermedia del flujo.

La sección hidrogeoquímica del flujo II, inicia con la muestra uno que tiene un pH de 8.07 y conforme se acerca a la zona de descarga se observa un pH muy cercano a 7. La conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos se comportan de forma similar aumentando conforme se acercan a la zona de descarga. Se observa una concentración de los cationes conforme el flujo se desarrolla teniendo en la zona de descarga un aumento en especial del Na^+ . Los aniones se comportan de forma similar observando un incremento considerable de HCO_3^- en comparación a los SO_4^{2-} y Cl^- en la zona de descarga.

El pH en el diagrama hidrogeoquímico que involucra a la zona III y IV, en la zona de recarga, es de 7.38 y conforme sigue hacia la zona de descarga se observa un ligero incremento hasta llegar a 7.67. La conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos se comportan de forma similar, teniendo un incremento hacia la zona de descarga. Se observa una concentración de los cationes conforme el flujo se desarrolla, teniendo en la zona de descarga un aumento en especial del Na^+ . Los aniones se comportan de forma similar observando un incremento considerable de HCO_3^- en comparación a los SO_4^{2-} y Cl^- en la zona de descarga.

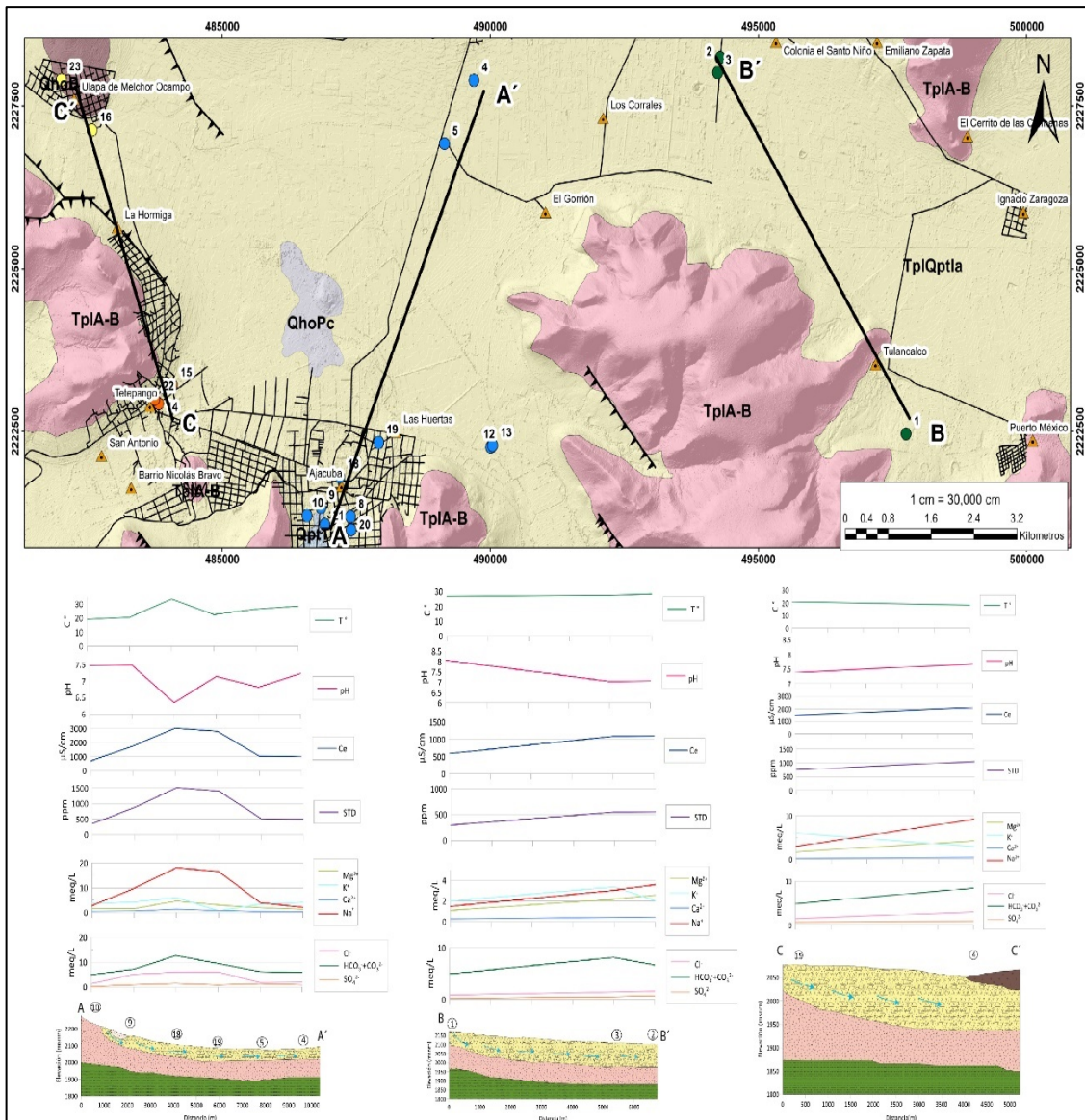


Figura 11 Ubicación de cada uno de los perfiles hidrogeoquímicos, se muestra las concentraciones y valores en cada uno de los flujos desde la zona de recarga a la zona de descarga.

4.2.7 Miembros extremos

Estos miembros extremos se determinaron a partir de elementos conservativos con las concentraciones de Cl^- y Li^{3+} en cada una de las muestras, por ser elementos conservativos los cuales no reaccionan químicamente durante la evolución de las aguas subterráneas (Moran Ramírez, 2016). El primer miembro extremo (ME), recae en la muestra 1, que se encuentra en la zona de recarga

del flujo II, con un pH de 8.07, una temperatura de 26.8 °C, una concentración de STD de 292 ppm, una Ce de 287 $\mu\text{S cm}^{-1}$, una concentración de Cl^- de 0.1129 meq L^{-1} , una concentración de Li^{3+} de 0.0005 meq L^{-1} y una alcalinidad de 4.9180 meq L^{-1} . La muestra 25 se consideró como el segundo ME, esta muestra se recolectó de uno de los canales de riego con un pH de 8.05, una temperatura de 21.7 °C, una concentración de STD de 721 ppm, una Ce de 1441 $\mu\text{S cm}^{-1}$, una concentración de Cl^- de 1.4478 meq L^{-1} , una concentración de Li^{3+} de 0.0223 meq L^{-1} y una alcalinidad de 6.9836 meq L^{-1} . El tercer ME es la muestra 18, ubicada dentro de la zona urbana de Ajacuba, se considera que es un agua de origen o con un aporte significativo de aguas termales, con un pH de 6.34, una temperatura de 33.47 °C, una concentración de STD de 1516 ppm, una Ce de 3023 $\mu\text{S cm}^{-1}$, una concentración de Cl^- de 1.42.81 meq L^{-1} , una concentración de Li^{3+} de 0.1268 meq L^{-1} y una alcalinidad de 12.6393 meq L^{-1} .

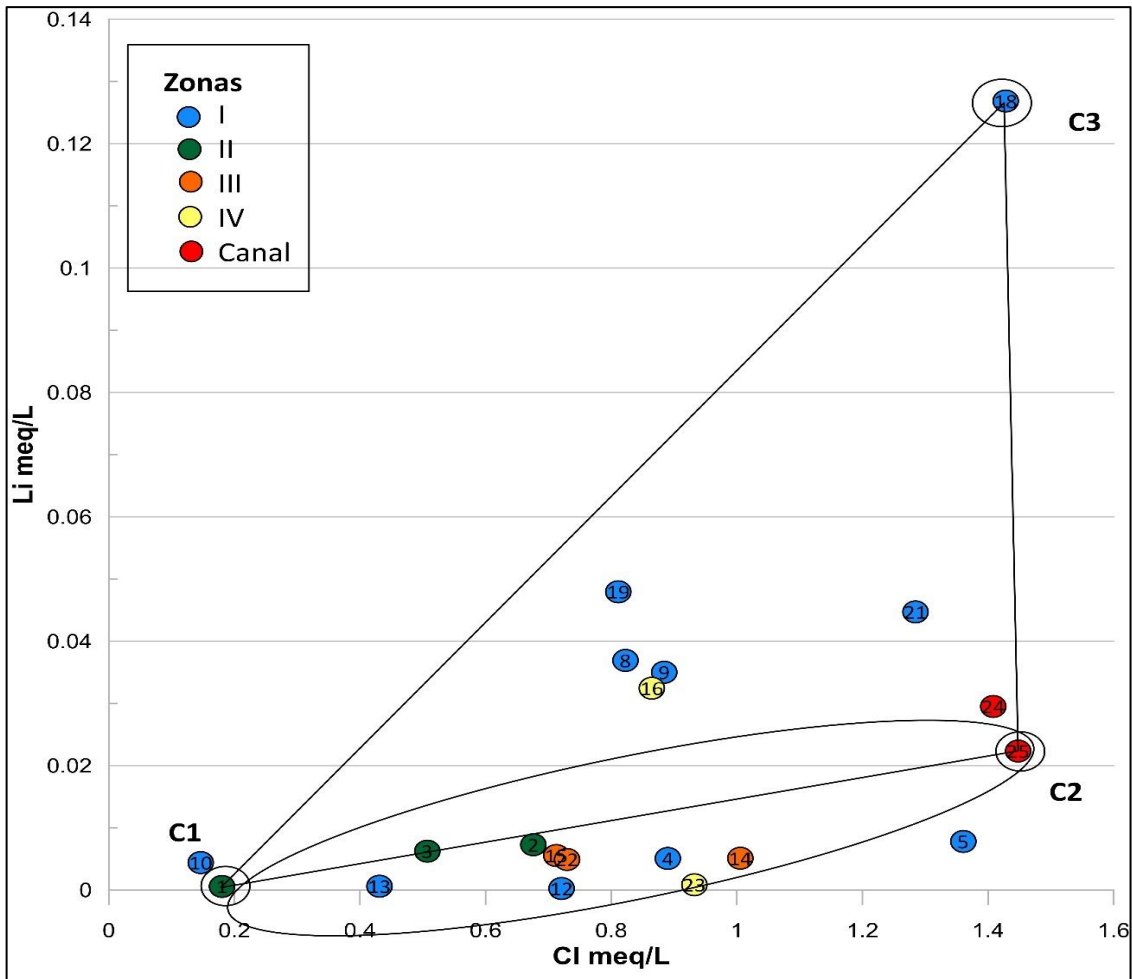


Figura 12 Miembros extremos de la zona de estudio, el primer miembro corresponde a agua de reciente infiltración, el segundo a la muestra de agua residual utilizada para el riego y tercero agua hidrotermal.

4.3 Calidad para consumo humano

4.3.1 NOM 127

Comparando los parámetros fisicoquímicos Figura 13, encontramos que el pH de las muestras, con el límite establecido por la NOM-127-SSA1-2021, se observa que la muestra 18, es la única que no se encuentra dentro del intervalo establecido por la NOM-127. Los sólidos totales disueltos, superan el límite permisible en las muestras 8,18,19,23 y 24. Se observa que en las muestras 9,14,15 y 22, los niveles de NO_3^{2-} superan el límite permisible. Respecto a la alcalinidad en las muestras 8,12,13,16,18,19,21,23 y 24, no se encuentran dentro de lo permitido por la norma. En el caso del Na^+ , se tienen siete muestras

en la que su concentración supera el límite permisible 8,9,12,18,19,23 y 24. Solo en la muestra 18, se encuentra el As fuera de lo establecido por la norma (Figura 13).

El problema de las altas concentraciones de algunos iones o los valores altos en determinados parámetros químicos de las muestras que, superan los límites permisibles de la norma, es probablemente debido a la mezcla, con el agua del acuífero, con el agua utilizada en el riego o del agua de origen hidrotermal; así como, del tipo de aprovechamiento y sus características.

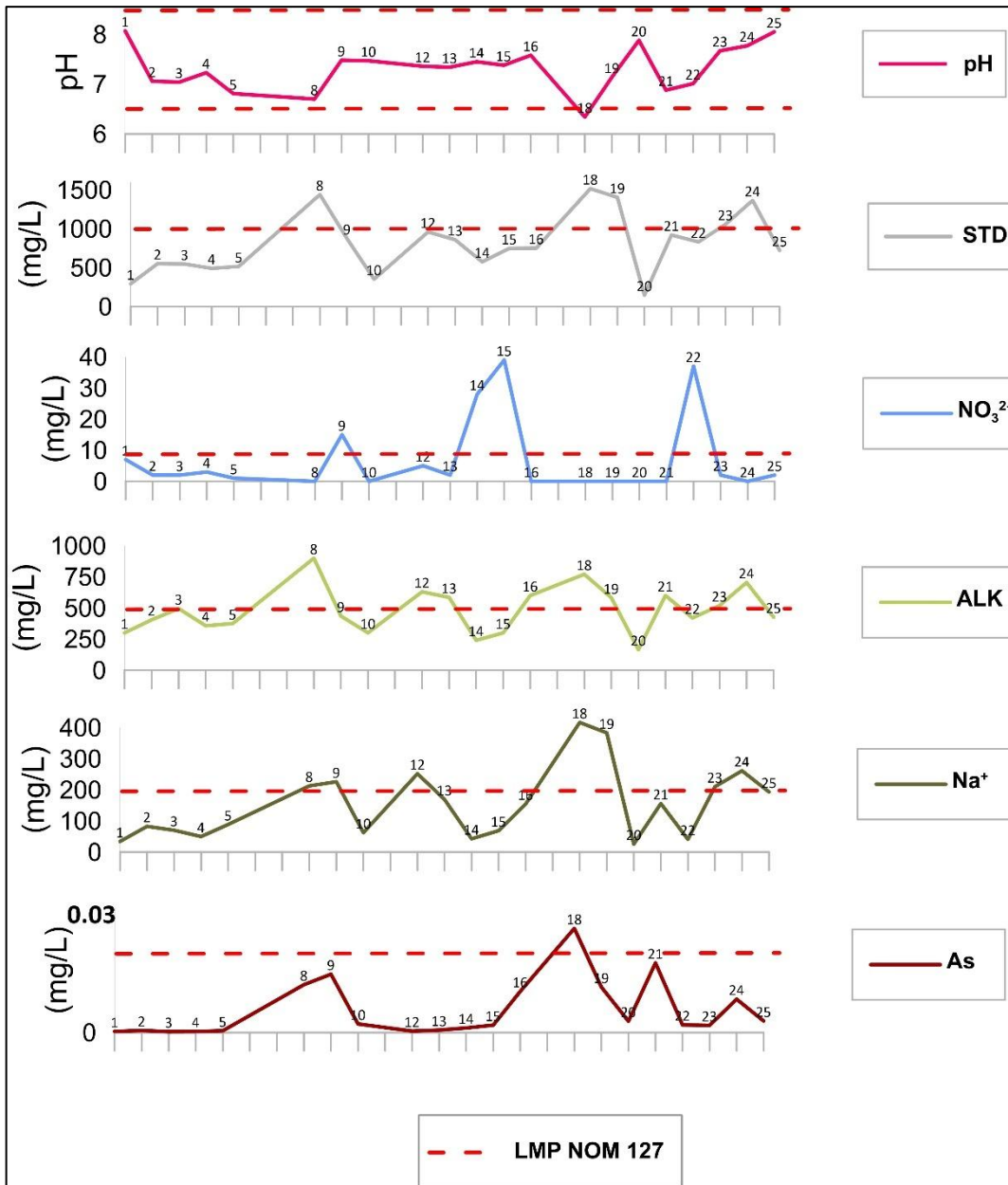


Figura 13 Límites permisibles de acuerdo con la NOM127 de pH, STD, NO₃²⁻, ALK, Na⁺ y As en cada una de las muestras analizadas.

4.3.2 ICA

La muestra que arrojó una clasificación de excelente es la muestra 20 ubicada en la zona de recarga del flujo 1, en este sentido la muestra 10 ubicada en la misma zona obtuvo una clasificación de aceptable, las muestras 8,9 y 21 se encuentran en una clasificación de contaminada. Dentro del flujo I la muestra 18 es la que cuenta con una clasificación de altamente contaminada, el interés de

estas muestras radica en que son aprovechamientos dentro de la zona urbanizada de Ajacuba, su uso se emplea en labores domésticos, consumo de animales y en algunos casos para el consumo humano. En el caso de la zona urbanizada de Tetepango las muestras 14, 15 y 22, se encuentran en la zona de recarga del flujo III, las muestras 14, es fuente de abastecimiento de agua al municipio y tuvo una clasificación de poco contaminada, la muestra 15 en este flujo muestra una clasificación de contaminada (Figura 14).

En general la zona se encuentra en una clasificación entre poco contaminada a contaminada por fortuna los pozos de abastecimiento del municipio de Ajacuba se encuentran en una clasificación de aceptable esto debido probablemente al tipo de aprovechamiento, son pozos equipados y con profundidades de más de 50 metros.

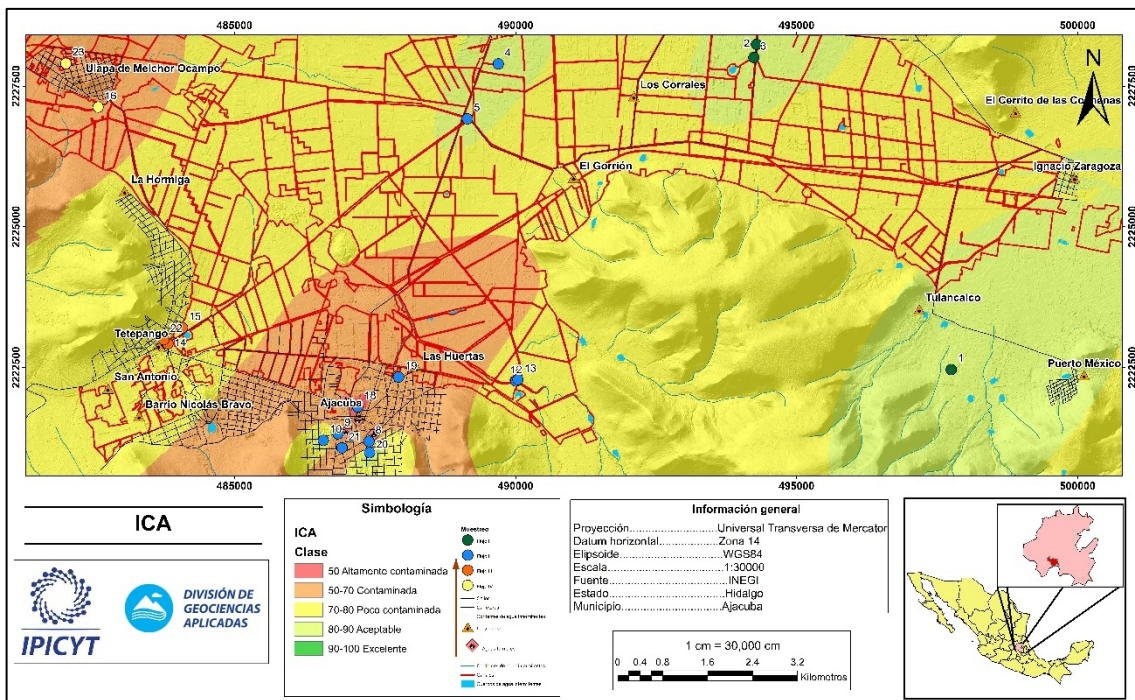


Figura 14 Mapa de la distribución de la calidad de agua para consumo humano de acuerdo con la metodología ICA.

Para el desarrollo del índice ICA se tomaron en cuenta los resultados obtenidos del análisis químico de los parámetros de temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, dureza, nitratos, sodio, calcio, magnesio, cloruros y arsénico, los cuales fueron redondeados evaluados de acuerdo con la tabla 21.

Tabla 21 Evaluación de cada uno de los parámetros utilizados para la metodología ICA

Evaluados/ Muestra	pH	CE	STD	T muestra	Alk	NO3	Cl	Na	Ca	Mg	As
1	90	100	90	70	60	50	100	80	70	90	100
2	100	90	80	60	50	80	90	60	70	80	100
3	100	90	80	60	40	80	90	60	70	80	100
4	100	90	80	60	60	70	90	70	70	90	100
5	100	90	80	70	50	80	80	50	70	80	100
6	60	50	50	70	80	100	80	100	100	100	100
7	90	100	90	90	60	100	100	100	100	100	100
8	60	40	50	80	20	100	90	30	60	80	50
9	90	60	60	100	50	30	90	30	70	80	40
10	90	100	80	100	60	100	100	70	70	80	90
11	100	50	50	90	20	70	80	100	100	100	100
12	90	60	60	100	30	60	90	20	70	80	100
13	90	70	60	100	30	80	90	30	70	80	100
14	90	80	80	80	70	20	90	70	70	80	100
15	90	70	70	100	60	10	90	60	60	80	90
16	90	70	70	80	30	100	90	40	70	70	60
17	90	80	80	70	50	70	80	50	70	70	100
18	60	40	50	40	80	100	80	0	60	70	0
19	100	40	50	90	30	100	90	10	90	80	60
20	90	100	100	90	80	100	100	80	80	100	90
21	100	60	60	100	30	100	80	40	60	90	30
22	100	70	70	90	50	10	90	70	60	90	90
23	90	60	60	100	40	80	90	30	70	70	90
24	90	30	50	100	30	100	80	20	70	80	70
25	90	50	70	90	50	80	80	30	90	70	90
Peso	1	4	2	1	1	2	1	2	1	1	4

4.4 Calidad del agua para uso de riego

4.4.1 Índices de riego

En el caso de los índices utilizados para la calidad del agua para uso de riego la relación de absorción de sodio (RAS) la mayoría de las muestras obtuvo una clasificación de excelente a excepción de la muestra 19, que obtuvo una clasificación de buena (Figura 15). En el caso del índice de permeabilidad (IP) las muestras 1, 9, 12, 13, 19, 20, 24 y 25, se encuentran en una clasificación de no recomendable y el resto de las muestras en una clasificación de buena. En el caso del porcentaje de sodio (%Na), se observa un comportamiento variado en las clasificaciones la muestra 22, se encuentra como excelente, las muestras 1, 3, 4, 10, 14 y 15, en un estado de buena, las muestras 2, 5, 8, 16, 21 y 23 permisible, las muestras 9, 12, 13, 18, 24 y 25 en dudosa, mientras que la muestra 19 en inadecuada (Figura 15).

Para el porcentaje de sodio soluble (PSS), la muestra 22 tiene una clasificación de excelente, la muestra 19 una clasificación de permisible, las muestras 24 y 25, tienen una clasificación de dudosa, el resto de las muestras obtuvieron una calificación de buena (Figura 15).

En el caso del criterio de carbonato de sodio residual (CSR), las muestras 14, 15, 22, obtuvieron un estatus de buena, las muestras 3, 8, 12, 13, 19, 21 y 24, una clasificación de no recomendable y el resto de las muestras tienen un estatus de condicionada. Respecto a la sanidad efectiva (SE) las muestras 1 y 20, se encuentran en un estado de buena, las muestras 18 y 19, en un estatus de no recomendable y el resto de las muestras en condicionada. Para la salinidad potencia (SP) las muestras 5, 8, 9, 18, 19, 21, 23 y 24, se encuentran en una clasificación de condicionada y el resto en buena (Figura 15).

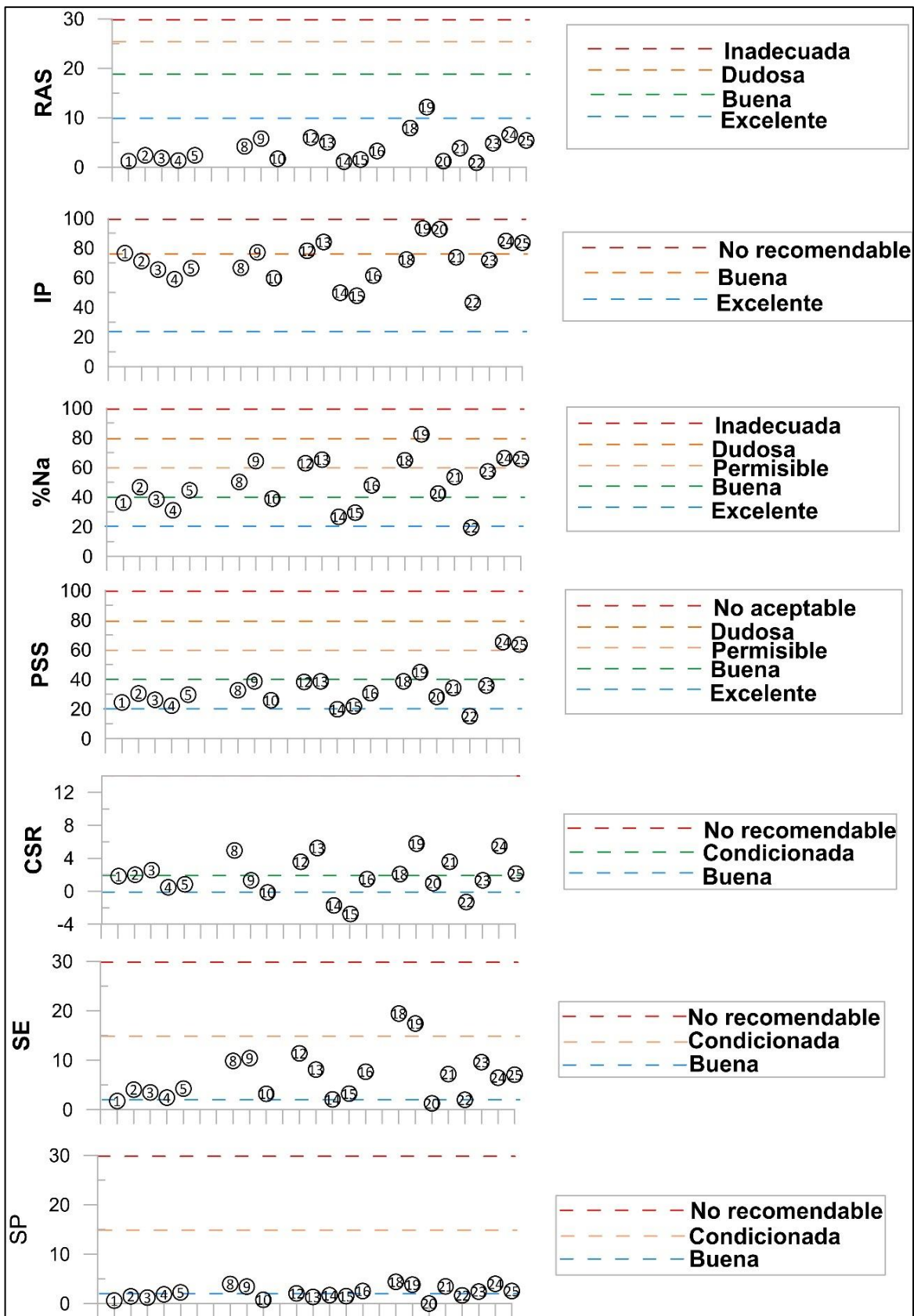


Figura 15 Resultados de los índices de sodicidad y salinidad de cada una de las muestras.

4.4.2 Wilcox

En el diagrama Figura 16, se observa una variabilidad en las distintas muestras respecto a la clasificación propuesta por Wilcox (1955), las muestras 20, 1 y 10, muestran una sodicidad baja (S1) y una salinidad (C2) media. Las muestras 4, 5, 2, 3, 15, 16, 25, 22, 13, 9, 21, 12 y 23, tienen una sodicidad (S1) baja y una salinidad (C3) alta, las muestras 8, 18 y 24, muestran una salinidad (S2) media y una salinidad (C4) muy alta, mientras que la muestra 19, tiene una sodicidad (S3) alta y una salinidad (C4) muy alta (Figura 16).

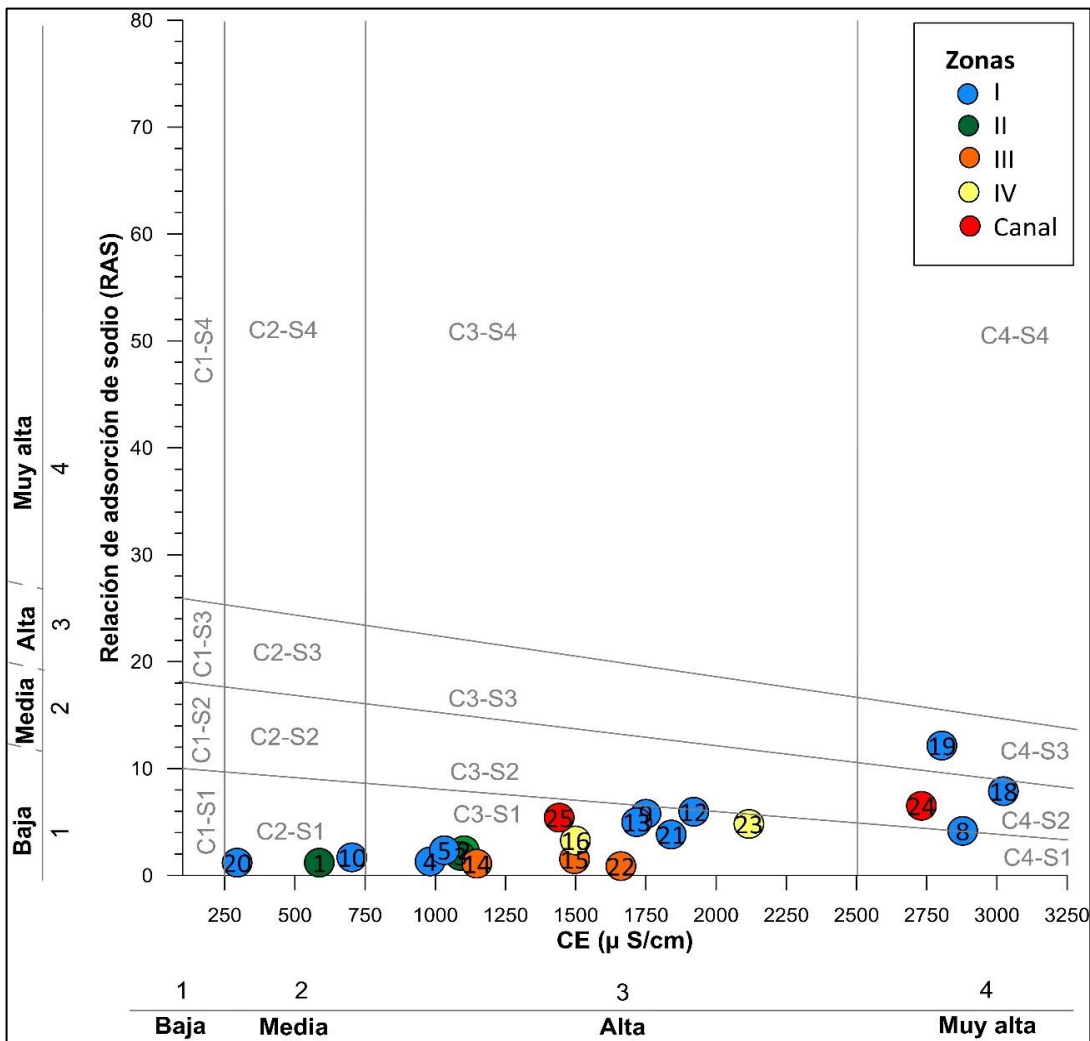


Figura 16 Diagrama de Wilcox, muestra los niveles en cada una de las muestras de los cuatro flujos de salinidad y sodicidad.

4.4.3 %Na Vs CE

De acuerdo con el diagrama Figura 17 %Na vs CE, las muestras 20, 1 y 10, tienen una calidad de excelente a buena, las muestras 2, 3, 4, 5, 14, 15, 16, 21, y 22, tienen una calidad de buena a permisible, las muestras 9, 12, 13 y 25, una calidad de permisible a dudosa, las muestras 8, 19, 23 y 24, tienen una calidad de dudosa a no válida y la muestra 18 tiene una calidad de no válida (Figura 17).

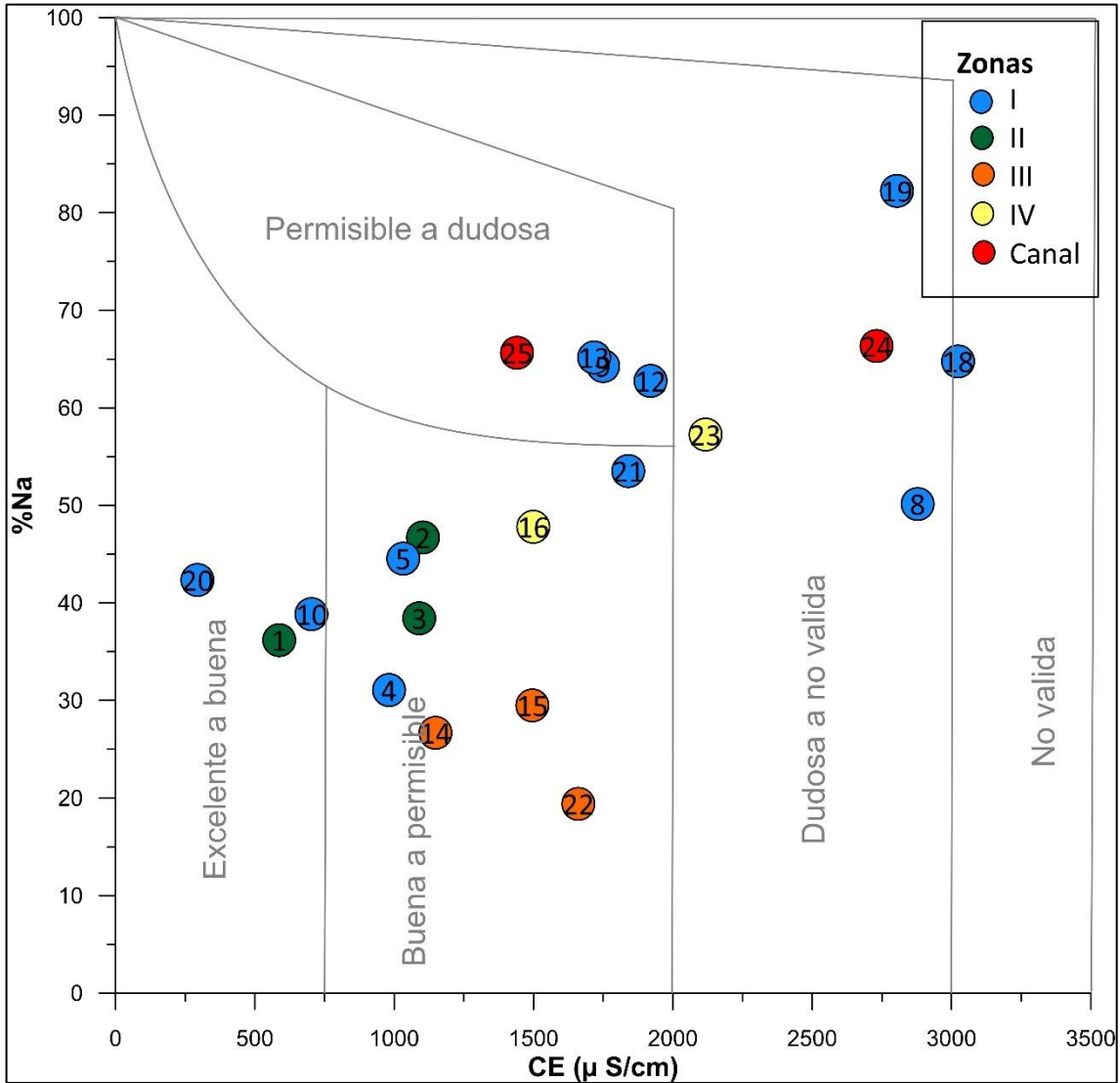


Figura 17 Diagrama de %Na vs CE ($\mu\text{S/cm}$), muestra la calidad de cada una de las muestras de los cuatro flujos.

4.5 Balance hidrológico

4.5.1 Estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas seleccionadas para realizar el balance hidrológico se encuentran a no más de 25 km de la zona de estudio y los datos seleccionados fueron desde el año 1997 hasta el 2007 (Figura 18).

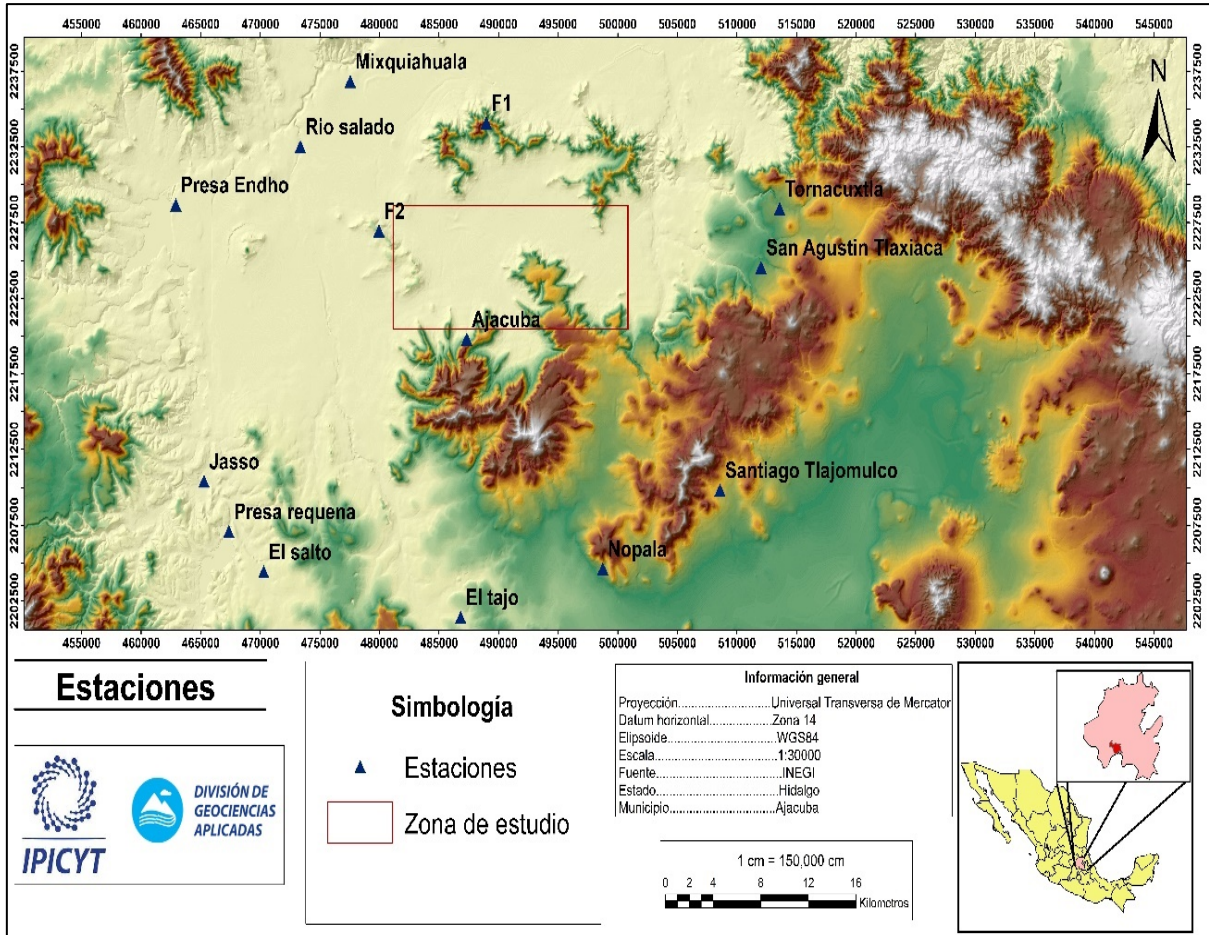


Figura 18 Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el balance hidrológico.

4.5.2 Pruebas de homogeneización.

Se aplicaron en los registros las pruebas de Helmert, prueba estadística de las secuencias, t de Student y Cramer para validar la consistencia de los datos.

Tabla 22 Resultados de las pruebas de homogeneización de cada una de las estaciones meteorológicas utilizadas en el balance hidrológico.

ID	t de Student	Cramer
13111	Hay homogeneidad	Hay homogeneidad
13018	Hay homogeneidad	Hay homogeneidad
13090	Hay homogeneidad	Hay homogeneidad
13075	Hay homogeneidad	Hay homogeneidad
13084	Hay homogeneidad	Hay homogeneidad
13068	Hay homogeneidad	Hay homogeneidad
15028	Hay homogeneidad	Hay homogeneidad
15274	Hay homogeneidad	Hay homogeneidad
13131	Hay homogeneidad	Hay homogeneidad
13128	Hay homogeneidad	Hay homogeneidad
13160	Hay homogeneidad	Hay homogeneidad

4.5.3 Precipitación

La precipitación en la zona va de 282.17 mm a 375 mm. Las menores precipitaciones se observan al oeste de la zona en el área urbana de Tetepango y siguiendo la cadena montañosa del cerro del águila. Hacia el sur de la zona en el área urbana de Ajacuba, se presentan precipitaciones entre los 300 y 350 mm siguiendo hacia el noroeste hasta Ulapa de Melchor Ocampo. En la cadena montañosa del Gorrión, las precipitaciones tienen un intervalo entre 325 a 350 mm y se extiende hacia el noroeste. Hacia el noreste de la zona de estudio, se presentan las mayores precipitaciones con un intervalo entre 350 a 375 mm (Figura 19).

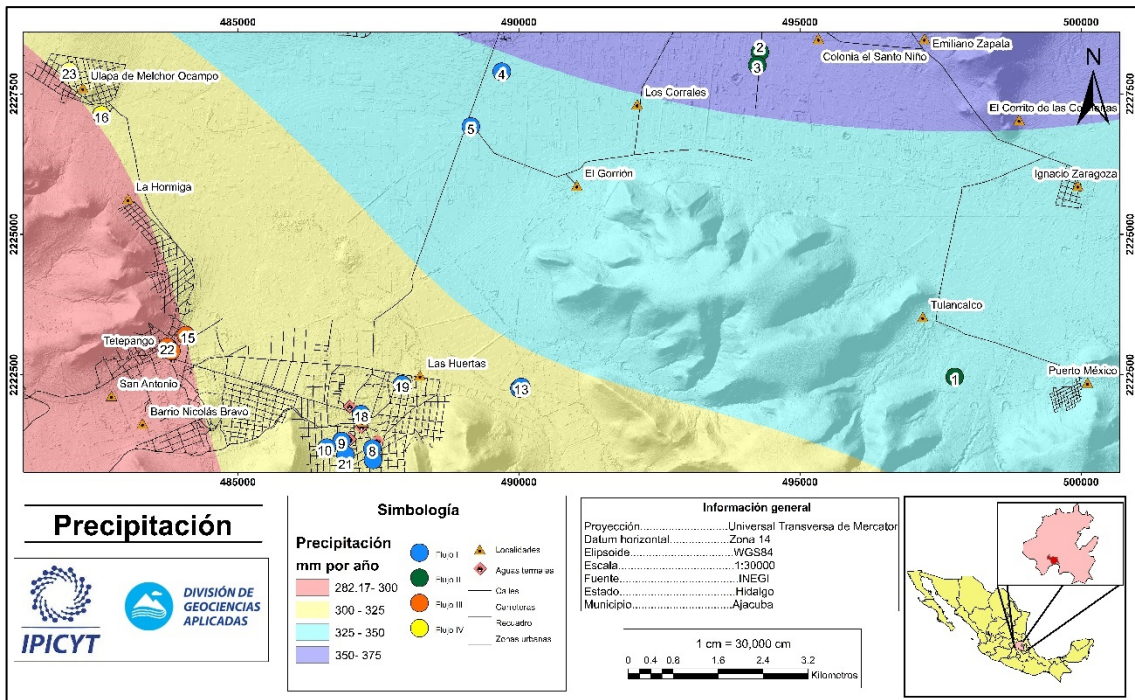


Figura 19 Mapa de distribución de la precipitación en la zona, los valores van desde los 262 mm por año hasta los 375 mm.

4.5.4 Evapotranspiración

En el área de estudio se presenta una evapotranspiración entre los 278.14 a los 350 mm. En el área urbana de Tetepango y hacia la cadena montañosa del águila la evapotranspiración es de un intervalo entre 278.14 y 300 mm. En el área urbana de Ajacuba, parte del valle y hacia la cadena montañosa del Gorrión la evaporación es de 300 a 325 mm. Al norte de la zona de estudio se presenta la mayor evaporación que va de 325 a 350 mm (Figura 20).

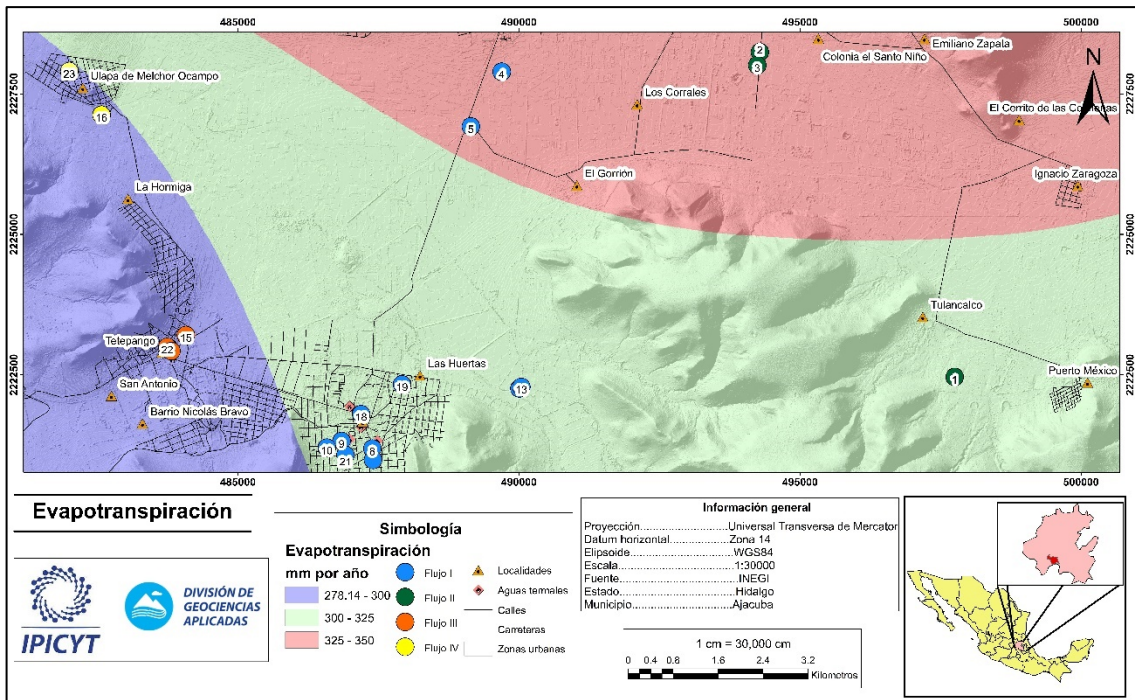


Figura 20 Mapa de distribución de la evapotranspiración en la zona de estudio obteniendo valores entre los 278 y los 350 mm.

4.5.5 Escurrimiento

El escurrimiento en la zona tiene un intervalo entre 96 a 327 mm. En las áreas urbanas de Tetepango y Ajacuba; así como, en donde se encuentran asentamientos humanos es donde el escurrimiento es de 300-327 mm, otros puntos donde se observa este escurrimiento es donde se encuentran los canales de riego que cuentan con una pendiente significativa y están recubiertos. En general en las cadenas montañosas del Águila y del Gorrión el escurrimiento es de 150 a 300 mm. En el centro del valle y hacia el noroeste es donde el escurrimiento es menor entre 96 y 100 mm (Figura 21).

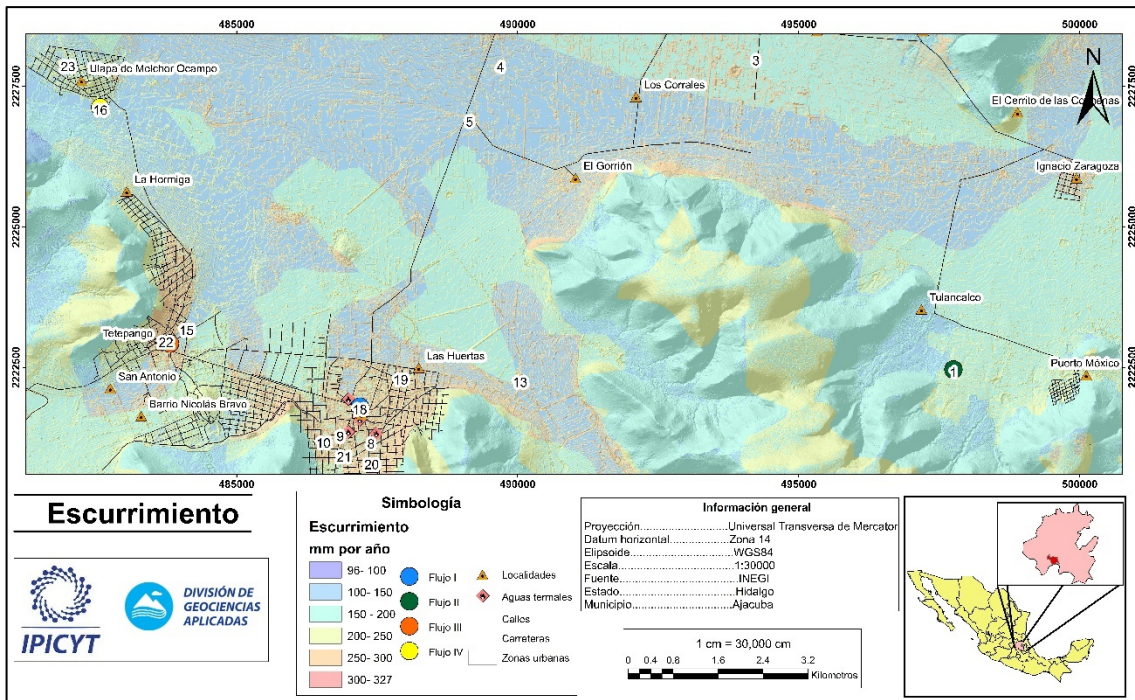


Figura 21 Distribución del escurrimiento en la zona de estudio, se muestran valores desde los 96 hasta los 327 mm.

4.5.6 Recarga Inducida

Los valores de recarga inducida en las zonas urbanas por fugas y fallos en la red de distribución de agua potable son de 56.41 mm, cubriendo Ajacuba Tetepango y las comunidades de Ignacio Zaragoza y Ulapa de Melchor Ocampo. La mayoría de la zona está cubierta por parcelas de riego, las cuales presentan una recarga inducida de 151.39 mm (Figura 22).

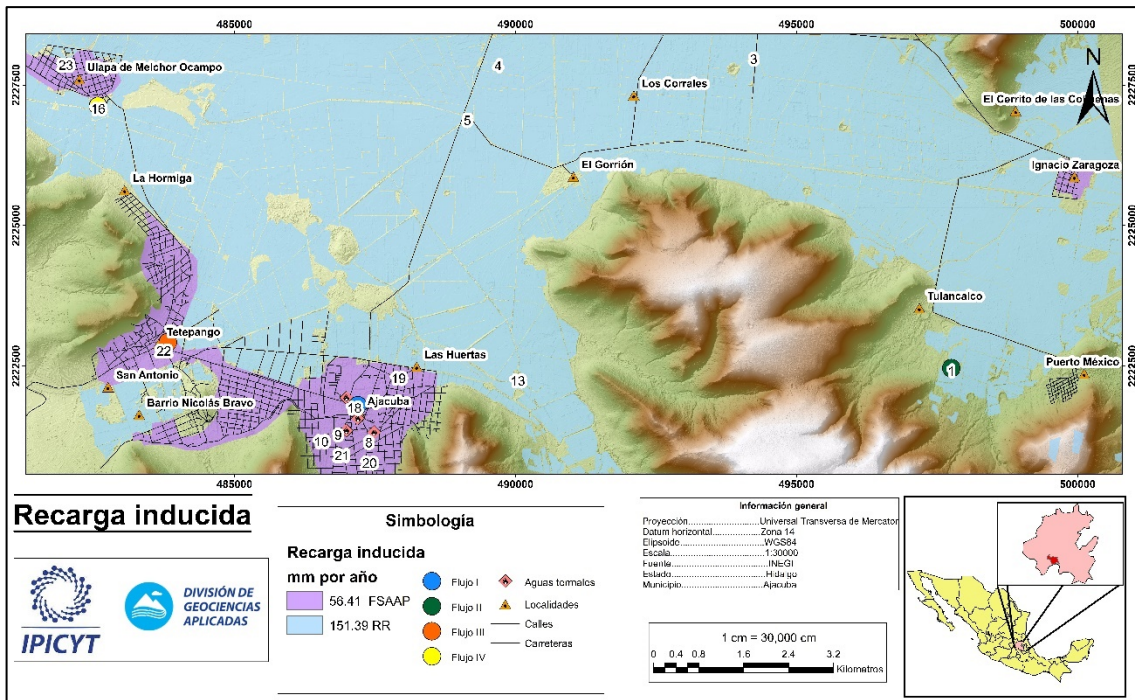


Figura 22 Distribución de la recarga inducida en la zona de estudio por retorno de riego y fallas en el suministro de agua potable.

4.5.7 Infiltración

Como resultado del álgebra de mapas para obtener la infiltración, en la zona va entre 0 y 38.5 mm. Las zonas urbanas, las cadenas montañosas, algunos altos topográficos y los canales de distribución de las aguas residuales presentan una infiltración de 0 mm. Se observa que gran parte del valle presenta una infiltración de 30 mm y hacia el oeste se observa una franja en donde se tiene la mayor infiltración que es de 38.5 mm (Figura 23).

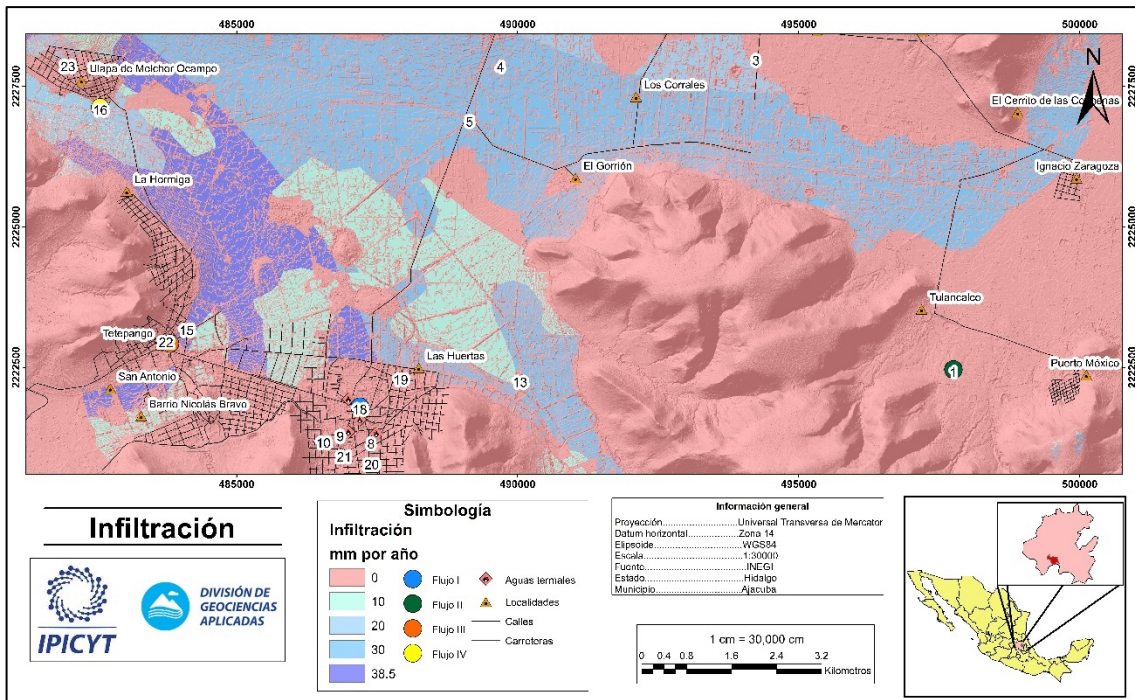


Figura 23 Distribución de la infiltración en la zona de estudio con valores desde las 10 hasta los 38.5 mm.

4.6 DRASTIC

4.6.1D-Profundidad del nivel estático

Las profundidades de los niveles estáticos de los pozos en la zona de estudio van entre los 5.85 m a los 96.95m. De acuerdo con la clasificación de la metodología DRASTIC, los pozos con una vulnerabilidad baja son los que tienen una profundidad entre 76 a 114.5 m. Estos pozos se encuentran al Norte y al Sureste de la zona cerca de los carrales y de Tulancalco. Al Este de la zona se presenta una vulnerabilidad de 5 y cerca de Uluapa de Melchor Ocampo se muestra una pequeña zona con la misma vulnerabilidad. Entre el centro del valle hacia el Oeste y sobre las cadenas montañosas del Águila y del Gorrión se presenta una vulnerabilidad de 7. Cerca de la zona urbana de Ajacuba aumenta la vulnerabilidad a 9 y dentro del área urbana se observa el área más vulnerable con una profundidad menor a los 10 m (Figura 24).

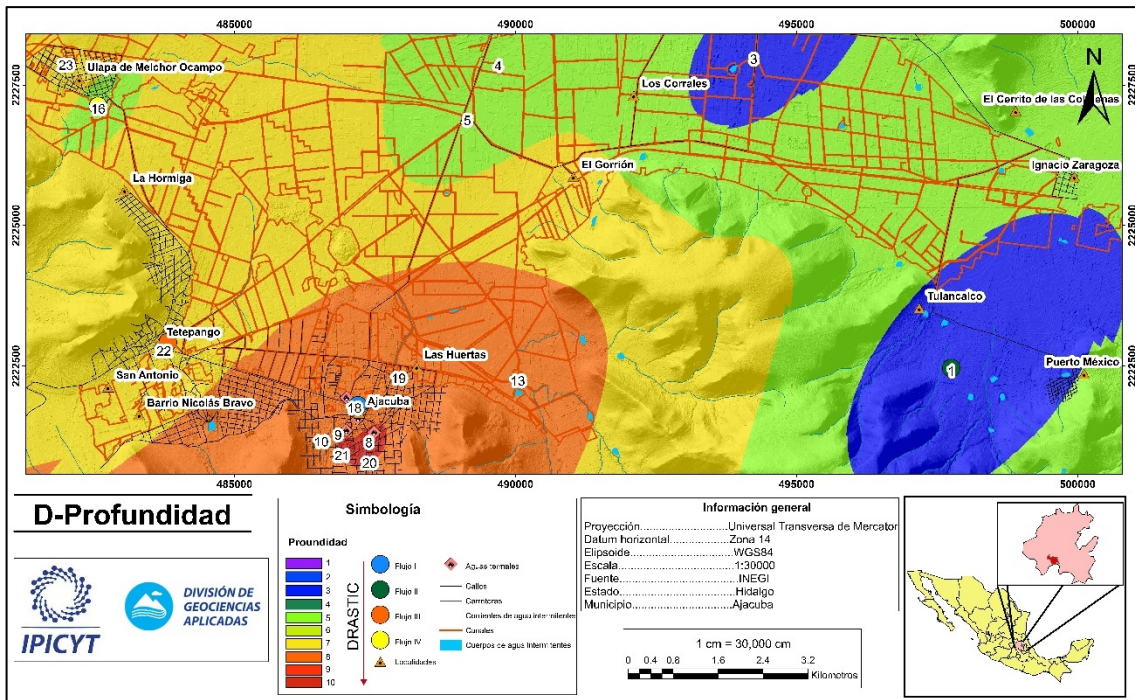


Figura 24 D-Profundidad del nivel estático, siendo los valores de entre 0 a 7.5 metros los más vulnerables y los valores de 76 a 114.5 metros los menos vulnerables en la zona de estudio.

4.6.2 R-Recarga neta

La recarga de la zona de estudio se obtuvo directamente de la capa de infiltración del balance general. En toda la zona la recarga entra en un intervalo entre 0 a 50 mm por lo que la vulnerabilidad en la zona es de 1 (Figura 25).

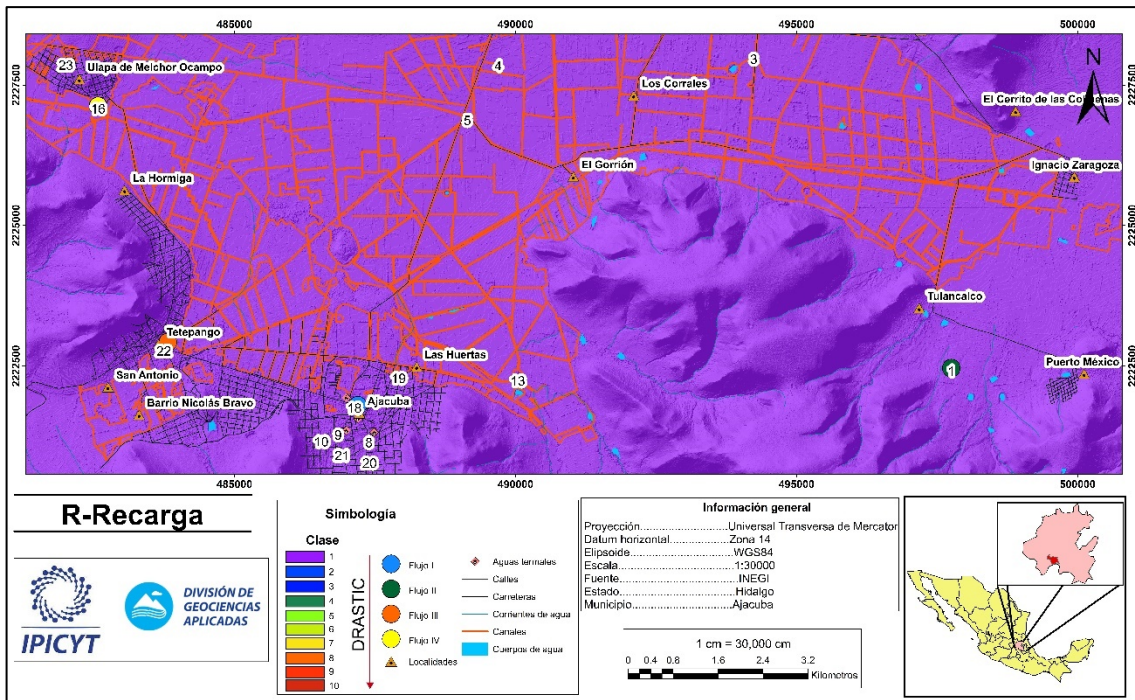


Figura 25 R-Recarga neta, los valores de infiltración no superan los 50 mm por lo que su vulnerabilidad es de 1.

4.6.3 A-Medio acuífero

Las zonas menos vulnerables en el área de estudio presentan una litología de piroclastos y cenizas volcánicas; así como, de travertino. El travertino lo encontramos distribuido al Sur; en el área urbana de Ajacuba y al Norte de esta se encuentra un alto topográfico compuesto por piroclastos y ceniza volcánica con una vulnerabilidad de 2 (Figura 26). Las sierras que se encuentran en el área de estudio se componen de andesita basalto por lo que tienen una vulnerabilidad de 3 (Figura 26). En la zona compuesta por basaltos al Noroeste del área de estudio, con una vulnerabilidad de 5 (Figura 26). El resto del material litológico que encontramos son los volcanosedimentarios de la Formación Atotonilco, siendo esta la litología con mayor vulnerabilidad siendo de clase 7 (Figura 26).

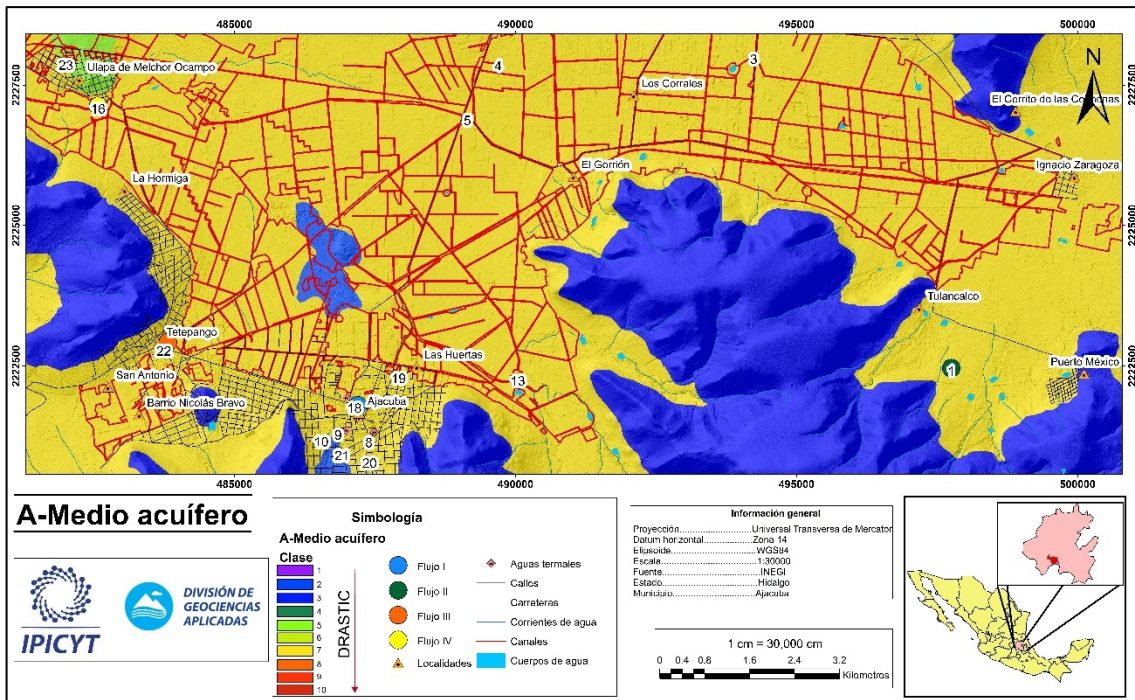


Figura 26 Medio acuífero, la zona del valle al estar compuesta por depósitos vulcanosedimentarios de acuerdo con la metodología DRASTIC tiene una vulnerabilidad de 7y la zona con vulnerabilidad 2 se componen por rocas ígneas.

4.6.4S-Suelos

El área de estudio cuenta con distintos tipos de suelo, vertisol pelico, son los que cuentan con una menor vulnerabilidad con una clase de 7 estos se encuentran en la parte central del valle, en las zonas urbanas de Ajacuba y Tetepango; así como, en la cadena montañosa del Gorrión (Figura 27). Los suelos de tipo rendzina y feozem háptico, tienen una mayor vulnerabilidad de clase 9, estos se encuentran al Norte de la zona de estudio cerca de Palo Seco y en la comunidad de Ulapa de Melchor Ocampo (Figura 27). Los suelos más vulnerables son de tipo litosol, con una vulnerabilidad de 10, estos se ubican a las faldas de las cadenas montañosas y en el centro del valle (Figura 27).

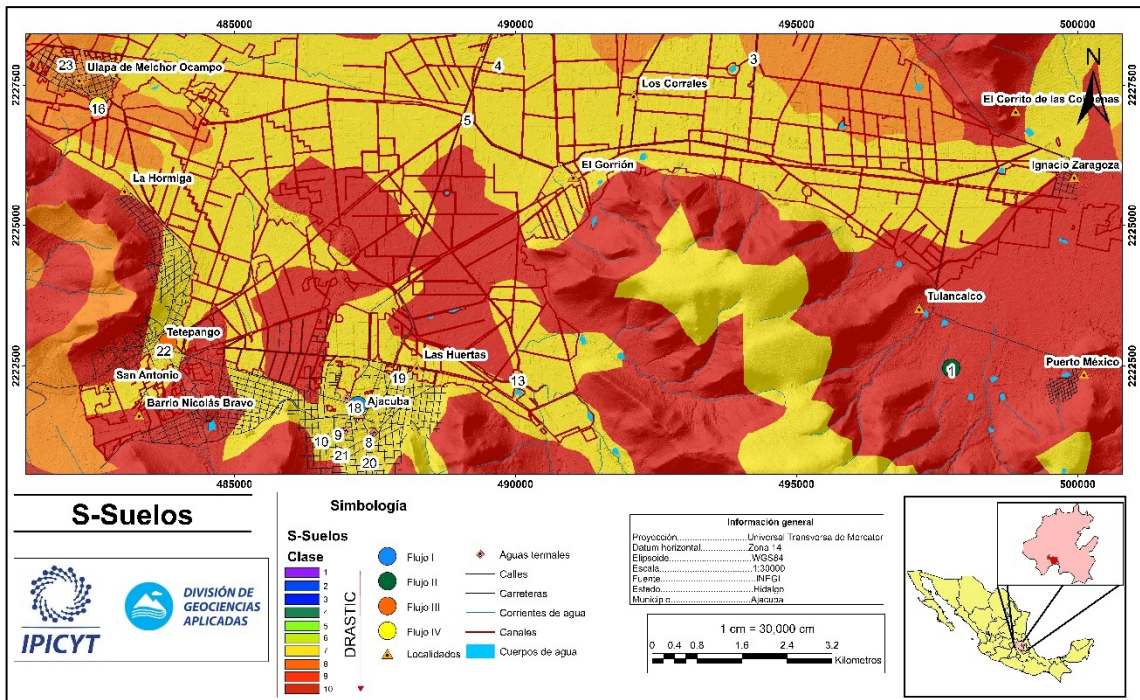


Figura 27 S-Suelos, las zonas con una vulnerabilidad de p9 se componen por suelos tipo rendzina o feozem, y la zona con una vulnerabilidad 7 por vertisol pelico.

4.6.7 T- Topografía

Las zonas con menor vulnerabilidad se ubican en las pendientes de los altos topográficos como cerro del Águila y Gorrión, debido a que cuentan con una pendiente mayor a 18%, también las zonas urbanas de Ajacuba y Tetepango tienen pendientes de más de 18%, por lo que su vulnerabilidad es de 1. Las zonas con una pendiente entre 12-18%, se encuentran entre las cadenas montañosas con una vulnerabilidad de 3 (Figura 28). Las zonas de vulnerabilidad 5, se encuentran entre las cadenas montañosas y faldas de estas con una pendiente entre 2 y 6%. La mayoría de la zona de estudio tiene una vulnerabilidad alta respecto a la pendiente, cuentan con un rango entre 0-2% por lo que son de tipo 10 (Figura 28).

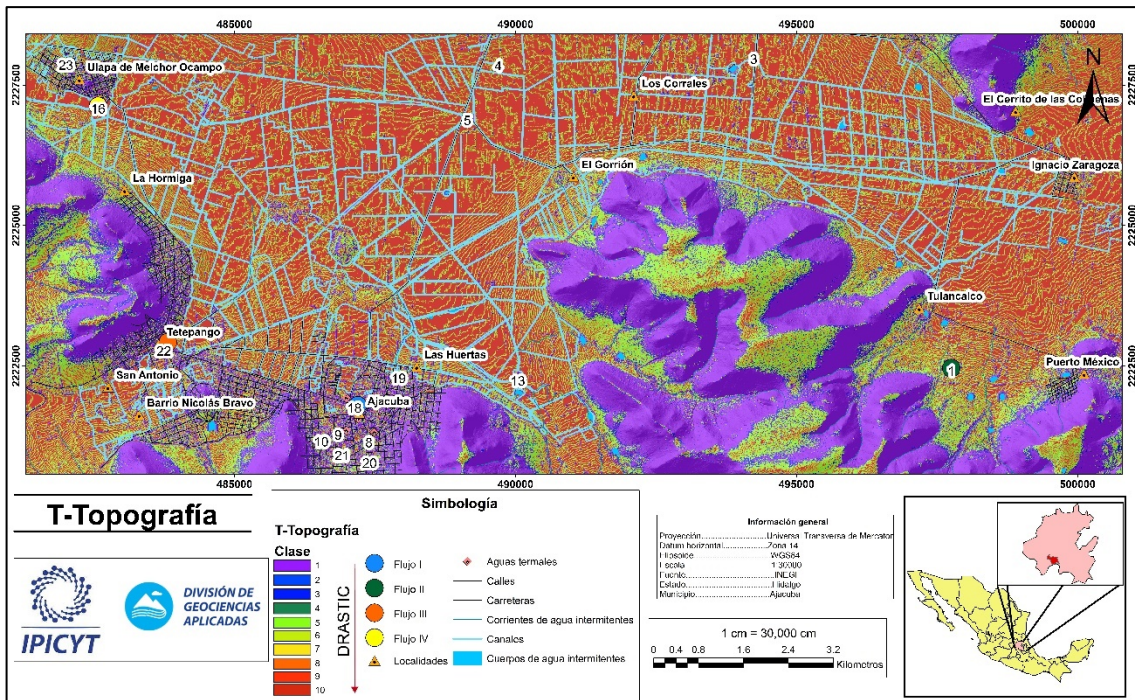


Figura 28 T-Topografía, las zonas con pendientes mayores a 18% grados tienen una vulnerabilidad de 1 mientras que las pendientes entre 0 y 2% tienen una vulnerabilidad de 10.

4.6.8 I-Impacto a la zona vadosa

El impacto a la zona vadosa está relacionado con cada una de las litologías del área de estudio. Las zonas con menor vulnerabilidad están compuestas por el travertino, intercalaciones de ceniza volcánica y piroclastos, que de acuerdo con la clasificación DRASTIC son de tipo 3 (Figura 29). Las cadenas montañosas, son de tipo andesita-basalto, por lo que se les confiere una vulnerabilidad de 4. El basalto ubicado al Noroeste cuenta con una vulnerabilidad de 6. El resto del valle; así como, de las zonas urbanas de Ajacuba y Tetepango, que al estar compuestas por depósitos volcanosedimentarios de la Formación Atotonilco el Grande, son los más vulnerables con clasificación de 8 (Figura 29).

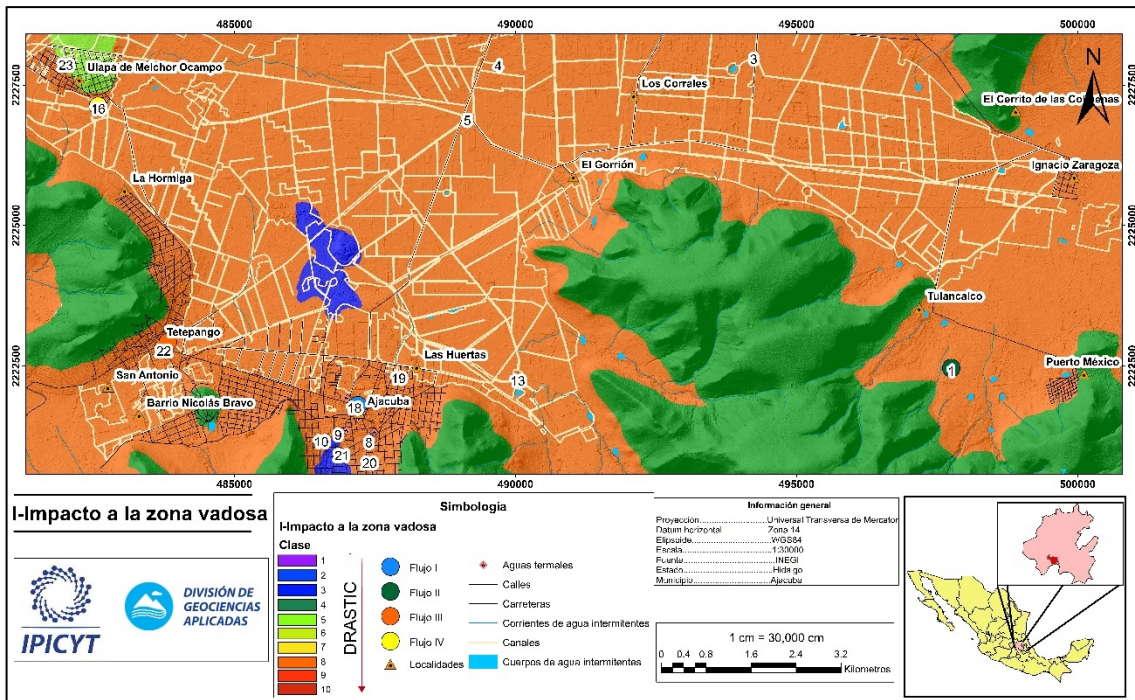


Figura 29 . I-Impacto a la zona vadosa, el relleno vulcano sedimentario que compone al valle tiene una vulnerabilidad de 8 mientras que las rocas ígneas de los altos topográficos una vulnerabilidad de 3.

4.6.9 C-Conductividad hidráulica

Las zonas con una conductividad hidráulica baja que va entre los 0.40746 a 4.0746 m d⁻¹ son las cadenas montañosas compuestas por andesita-basalto. Las intercalaciones de ceniza y piroclastos, ubicados en un pequeño alto topográfico, al norte de la zona urbana de Ajacuba; así como, del travertino cuentan con una conductividad hidráulica entre 4.0746 a 12.2238 m d⁻¹, con una evaluación de acuerdo con la metodología DRASTIC es de 3. El basalto al Noroeste de la zona cuenta con una conductividad hidráulica que entra entre el intervalo de 28.522 a 40.746 m d⁻¹, por lo que su vulnerabilidad es de 6. El resto del valle por su composición litológica, es la que presenta una mayor conductividad hidráulica con intervalos de 40.746 a 81.492 m d⁻¹, por lo su vulnerabilidad es de 8 (Figura 30).

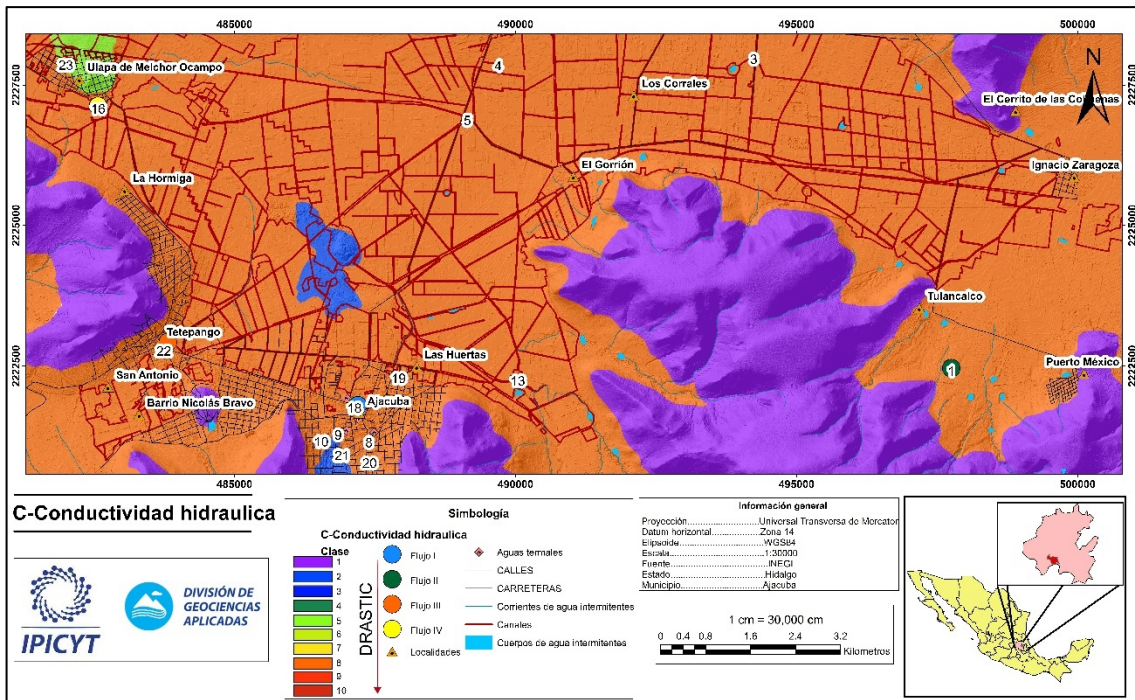


Figura 30 C-Conductividad hidráulica, el relleno vulcano sedimentario que compone al valle tiene una vulnerabilidad de 8 mientras que las rocas ígneas de los altos topográficos una vulnerabilidad de 3.

4.7 DRASTIC

La zona con menor vulnerabilidad se encuentra al Sureste del área de estudio, cerca del Águila, con un valor <79 en la escala de la metodología DRASTIC, las zonas con valores entre 80 y 99, se ubican en la mayoría de las zonas montañosas. La zona con un valor entre 100 y 119, se ubica al Sur de la zona urbana de Ajacuba. Hacia el Norte por los Corrales, al Oeste por Puerto México y al Noroeste cerca de Ulapa de Melchor Ocampo, se observan valores entre 120 a 139. Las zonas urbanas de Ajacuba, Tetepango y gran parte del valle tienen una mayor vulnerabilidad con valores entre 140 a 159. Las zonas más vulnerables, con valores entre 160-179, se encuentran al Norte cerca de las Huertas y la Norte de la Palmita (Figura 31).

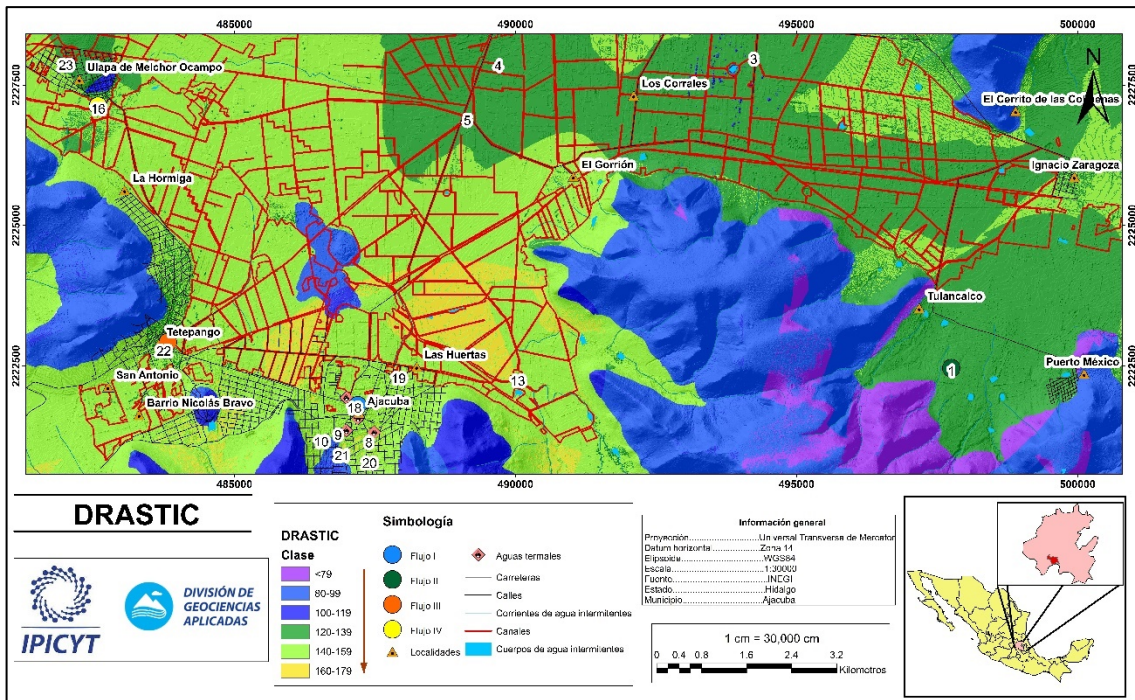


Figura 31 DRASTIC, se identifican las zonas de vulnerabilidad en el área de estudio. Normalizando los resultados en la zona y ubicando los valores en intervalos de 20, las zonas con muy baja vulnerabilidad se ubican en el flanco derecho de la cadena montañosa del Gorrión, sigue hasta Puerto México y al Noreste en el Cerrito de Las Colmenas. Las zonas con una vulnerabilidad baja, son el flanco izquierdo de la cadena montañosa el Gorrión, Las Campanitas y el Cerro Los Picachos. Las zonas con una vulnerabilidad media, se encuentran cerca de Ulapa de Melchor Ocampo y cerca de Los Corrales. La zona con una vulnerabilidad alta, se encuentra en la mayoría de la porción Este de la zona de estudio. El resto de la zona de estudio abarcando la zona centro del valle y hacia el Este; así como, de las zonas urbanas de Ajacuba y tetepango se ubican con una vulnerabilidad muy alta (Figura 32).

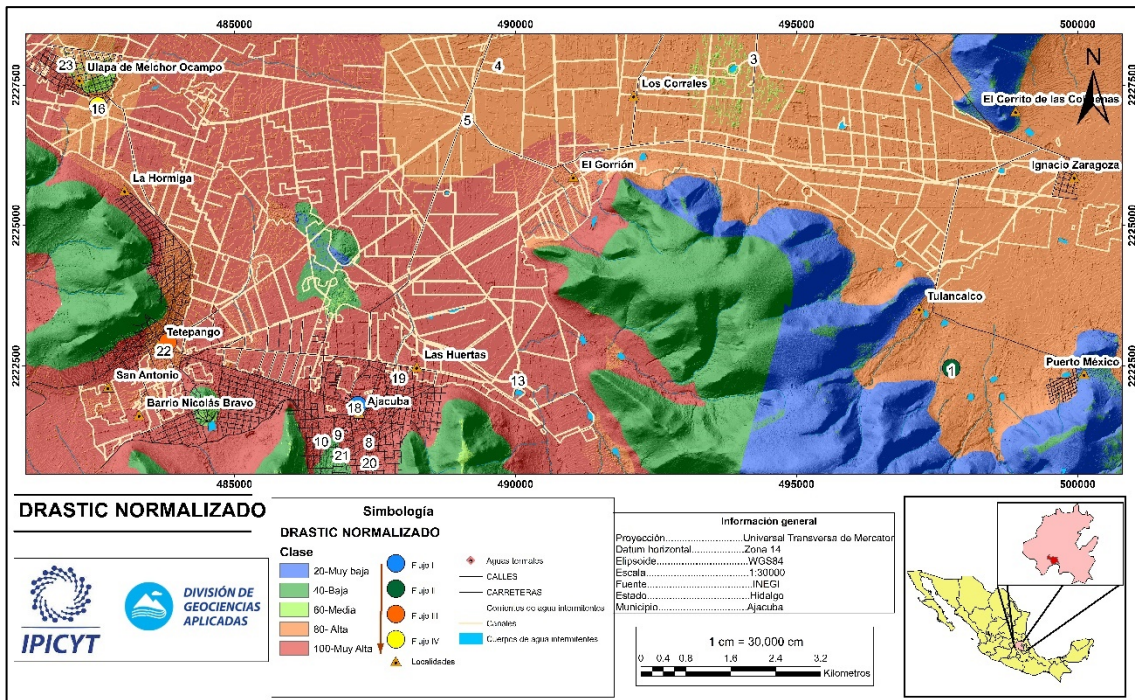


Figura 32 DRASTIC normalizado.

Las zonas con mayor vulnerabilidad se encuentran en el área urbana de Ajaacuba y parte del valle hacia el Noroeste, esto por el nivel piezométrico que no superan los 30 metros. La zona urbana de Tetepango, Ulapa de Melchor Ocampo y hacia el Este de la zona de estudio se presenta una zona de vulnerabilidad alta, los niveles piezométricos hacia esta zona son los más profundos en el área de estudio, por lo que se ve una disminución de la vulnerabilidad hacia esta zona. Las zonas con menor vulnerabilidad se encuentran en los altos topográfico del área de estudio.

4.8 Correlación

Realizando una correlación entre el índice ICA y los resultados de la metodología DRASTIC, se observa una relación entre la mala calidad del agua de los pozos muestreados con áreas de mayor vulnerabilidad. Como por ejemplo en la zona urbana de Ajacuba, en donde se encuentra el área de peor calidad de agua, la vulnerabilidad es muy alta, la misma correlación se observa en la zona urbana de Tetepango y en Ulapa de Melchor Ocampo. Se observa una relación interesante en las zonas de Puerto México y Colonia el Santo Niño, en donde la calidad del agua es aceptable pero la vulnerabilidad es alta, esto debido probablemente a que los pozos están equipados y son profundos, por lo que el impacto de las aguas residuales sobre la calidad del agua no ha sido significativo, pero por las condiciones físicas esto podría cambiar (Figura33).

Observando el modelo lineal entre la metodología ICA y la metodología DRASTIC, comprobamos que la correlación es inversa, lo que significa que conforme aumenta la vulnerabilidad en la zona donde se localiza la muestra disminuye la calidad del agua. El índice de correlación del modelo es de 0.8252 por lo que de acuerdo con [Hernández et al, \(2018\)](#), la correlación es fuerte. El coeficiente de determinación del modelo es de 0.681, con lo que de acuerdo con [Apryani et al. \(2020\)](#), indica un buen ajuste del modelo; así como, una clasificación de alta a fuerte influencia de la vulnerabilidad sobre la calidad del agua (Figura 34).

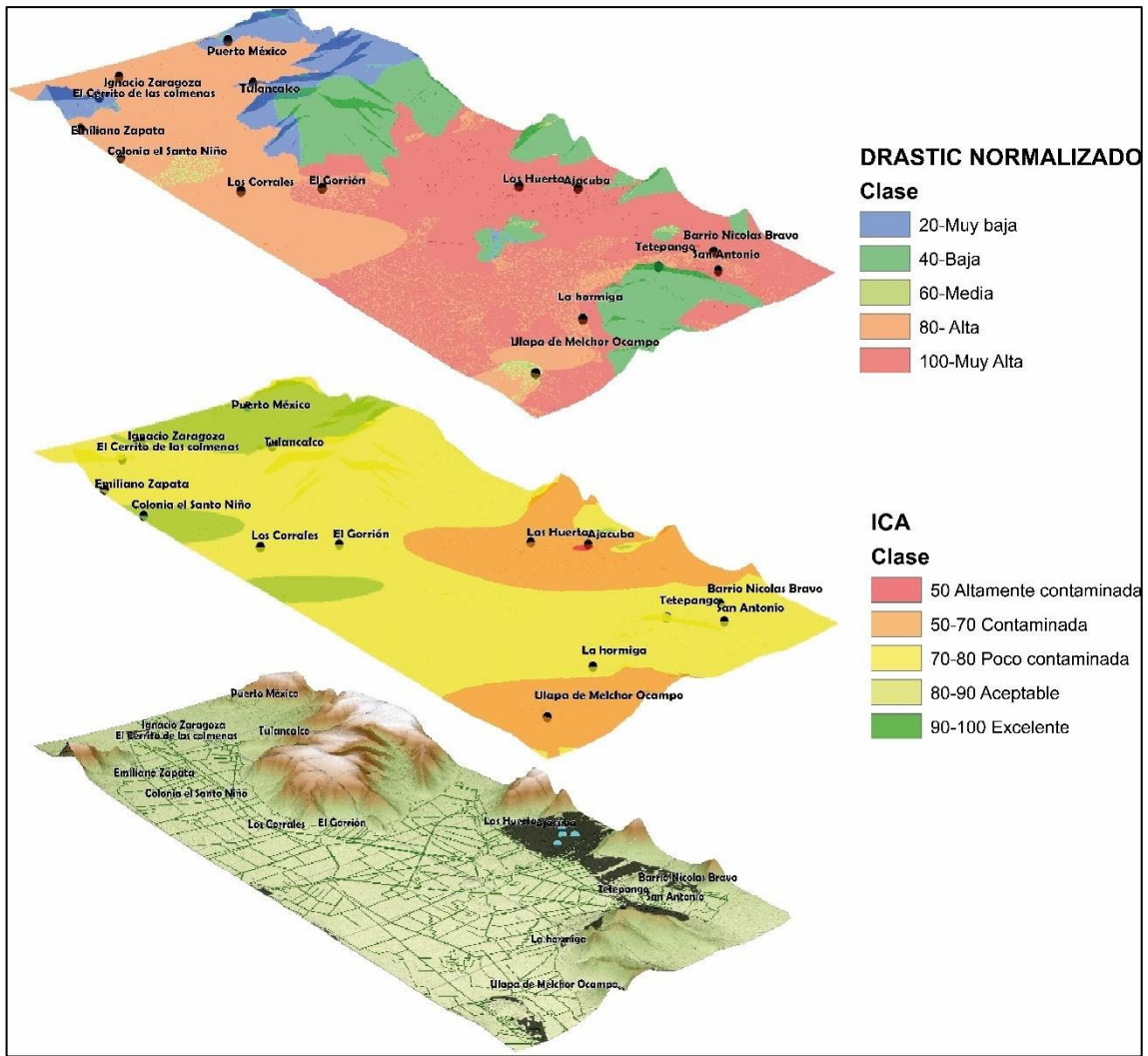


Figura 33 Correlación grafica entre el índice ICA y el DRASTIC normalizado.

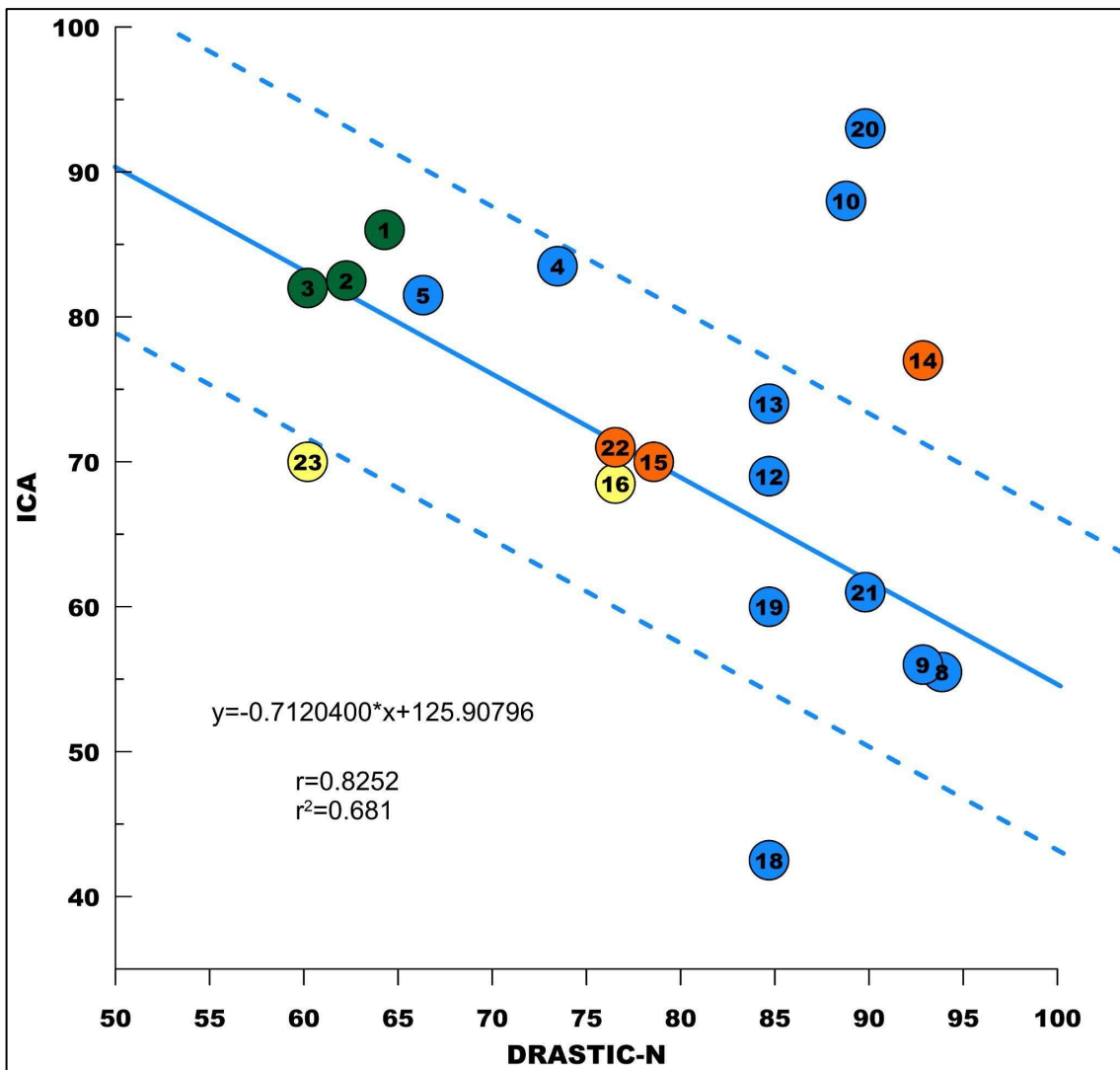


Figura 34 Correlación utilizando un modelo lineal entre ICA/ DRASTIC normalizado.

5. Discusión

Para determinar el impacto que tiene el uso de aguas residuales no tratadas como aguas de riego, utilizamos una metodología integral apoyados por herramientas de hidrogeoquímica, hidrogeología, geología, entre otras. Con las que determinamos el estado actual del acuífero e identificamos los procesos que generan dichas características que afectan la calidad del agua para consumo humano y para uso de riego; a su vez la relación de la vulnerabilidad del medio con el impacto.

El estado actual del acuífero se ve afectado en la química del agua, como lo comprobamos con los diagramas hidrogeoquímicos de Piper, Scholler (figuras 5 y 6), donde se observó que el impacto modificó las concentraciones de iones en las muestras, provocando un cambio en el tipo de agua y familia. Este cambio en el comportamiento de las muestras se debe a que no existe una predominancia en las concentraciones de los iones, por las mezclas de aguas con diferente origen y calidad (agua de riego, hidrotermalismo, agua de reciente infiltración). Se percibe que las muestras tienden a tener más concentraciones de sodio, posiblemente por los procesos de evaporación que observamos en el diagrama de Gibbs (Figura 8). Debido a las técnicas de riego (por gravedad) y a los canales que distribuyen el agua para riego (aguas residuales no tratadas) que se encuentran expuestos a la alta evaporación de la zona provocando la concentración de sus sales entre ellas el sodio. Otra evidencia del impacto en la zona de estudio se observó con el diagrama de Mifflin, donde existe una tendencia en la predominancia de flujos intermedios o regionales debido al aumento de iones en las muestras como consecuencia de las mezclas con aguas de menor calidad, retornos de riego (Figura 7).

El retorno de riego contribuye a la salinización del agua como se observó en el diagrama de Wilcox (Figura 16) donde existe una tendencia hacia el aumento de la sodicidad y la salinidad lo que provoca una mala calidad para uso de riego.

Otro proceso identificado con menor impacto en la evolución del acuífero es el intercambio iónico como resultado de la interacción de las aguas del acuífero con las rocas que lo conforman, que son predominantemente ígneas. Se tiene evidencia del hidrotermalismo al Sur de la zona de estudio esto lo comprobamos en los perfiles hidrogeoquímicos donde se observan aumentos en sus componentes fisicoquímicos (Figura 16). Con los resultados del gráfico de elementos conservativos (Figura 12), nos permite ubicar las muestras extremas (se encuentran delimitando las concentraciones en el acuífero). La muestra 1 es el agua más cercana a un agua de reciente infiltración, la muestra 25 es agua de riego (canal) y la muestra 18 como un agua con aporte de hidrotermalismo, el análisis de este diagrama muestra que el agua de reciente infiltración se mezcla en más del 90 % con las aguas de retorno de riego (canales) y solo el 10 % se mezclan con agua hidrotermal Camargo *et al.* (2022), (Figura 12).

Esta mezcla de agua en el acuífero provocó una alteración en la concentración química al igual que sus parámetros fisicoquímicos, en los puntos con mayor influencia de la mezcla del acuífero con el agua de los canales de riego se identifican.

Los puntos con mayor contaminación superaran los límites permisibles que establece la NOM-127-SSA1 en especial en los parámetros de STD, Na⁺, ALK y la presencia de NO₃²⁻ (Figura 13). En el mapa del ICA, concuerda que la calidad en el valle es no aceptable y solo cinco muestras presentan buena calidad cabe mencionar que los canales de riego atraviesan la zona urbana algunos de los

cuales no tienen revestimiento y se encuentran a cielo abierto (Perez-Diaz *et al.* 2020) (Figura 14).

Las características estructurales de los aprovechamientos, así como del medio físico que los rodea, muestran una estrecha relación con la disminución de la calidad del agua. Esto es uno de los resultados de la metodología DRASTIC, las zonas con mayor vulnerabilidad son aquellas que tienen un nivel piezométrico más somero y una pendiente menos pronunciada lo que provoca que sean zonas más susceptibles a la contaminación por retorno de riego (Figura 31).

Observando el modelo lineal entre la metodología ICA y la metodología DRASTIC, comprobamos que la correlación es inversa, lo que significa que conforme aumenta la vulnerabilidad en la zona disminuye la calidad del agua, es decir donde se presenta una tendencia de alta a fuerte influencia de la vulnerabilidad sobre la calidad del agua (Figura 33 y 34).

Lo anterior soporta que el medio abiótico es fundamental en la calidad del agua del acuífero, lo cual comprueba que la metodología empleada fue asertiva en la determinación del impacto en la calidad del acuífero por el uso de aguas residuales para el riego (Figura 33 y 34).

6. Conclusiones

Los resultados de la investigación demostraron el impacto del uso de aguas residuales como aguas de riego en el acuífero de Ajacuba, así como una estrecha relación entre el medio abiótico y la magnitud del impacto.

A pesar de que en la zona de estudio el riego con aguas residuales no tratadas se ha realizado, durante no más de 30 años, esta práctica ha afectado

significativamente el acuífero. Dicha agua es la principal fuente de recarga del acuífero, esta zona presenta un clima semiárido, con precipitaciones bajas.

La práctica de riego por gravedad en la zona de estudio ha provocado la infiltración de esta agua mezclándose con el acuífero y alterando la hidrogeoquímica del agua subterránea. Las gráficas hidrogeoquímicas, muestran un agua de mayor evolución, lo cual no debería ser el caso de acuerdo con la bibliografía y las condiciones del acuífero. Otro hallazgo importante es el hidrotermalismo en la zona de estudio, que actúa como una fuente de contaminación.

Este cambio en la química del agua provoca zonas con menor calidad, lo que representa problemas para la población y la agricultura. Esto se debe en gran medida a las condiciones abióticas de la zona, siendo la profundidad de los aprovechamientos y la pendiente del terreno factores determinantes en estos cambios.

Este trabajo ayuda a determinar el estado actual del acuífero, proporcionando herramientas valiosas para los tomadores de decisiones en el área de estudio.

7. Referencias

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

Almanza Tovar, O. (2021). *La Percepción Remota y la Simulación Numérica para la Caracterización y Manejo Integral de Acuíferos*. San Luis Potosí: Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Arellano Gil, J., Velasco de León, P., Silva Pineda, A., Salvador Flores, R., & Beltrán Romero, F. (2005). Origen y características geológicas del paleo-Lago de Amajc, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 199-211.

Balmaseda, C., Ponce de León, D., Martín, N., & Vargas, H. (2006). *Compendio de Suelo*. Habana: Facultad de Agronomía, Departamento de Riego, Drenaje y Ciencias del Suelo,.

Barrios Castillo, I. (2014). *Calidad de aguas naturales y residuales en el sistema hidrográfico Valle del Mezquital, Hidalgo México*. Montecillo, Texcoco, Edo de México: Colegio de postgraduados.

Brown , R., McClelland, N., Deninger, R., & Tozer, R. (1970). A water quality index: do we dare? *Water & Sewage Works*, 117(10), 339-343.

Camacho Ballesteros, A., Ortega Escobar, H., Sánchez Bernal, E., Flores Magdaleno, H., Khalil Gardezi, A., Mendoza Saldivar, I., . . . Avelar Roblero, J. (2023). Hidroquímica y calidad del agua para riego de las RH 21 y 23 costa de Oaxaca y costa Chiapas, México. *Terra Latinoam*, 41.

Campos Aranda, D. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Carrillo, M., & Suter, M. (1982). Tectónica de los alrededores de Zimapán, Hidalgo y Querétaro. *Guía de la Excursión Geológica a la Región de Zimapán*.

Castelán Luqueño, Y. (2011). *Identificación de zonas de recarga de agua subterránea mediante el cálculo del balance hídrico aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el acuífero del Valle de Tulancingo, Estado de Hidalgo, México*. Pachuca, Hidalgo: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Castellón Gómez, J., Bernal Muñoz, R., & Hernández Rodríguez, M. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería Revista Académica*, 19(1), 39-50.

Chebotarev, I. (1955). Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. *Geochimica et Cosmochimica*, 8, 198-212.

Chiarito, E., Zimmermann, E., & Méndez Zacarías, S. (2018). Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección. *Cuadernos del CURIHAM*, 24, 25-36.

Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogota, Colombia: McGRAW-HILL.

CONAGUA. (2019). *Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego año agrícola 2017-2018*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2019). *Estadísticas del agua en México 2019*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua. Obtenido de https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf

CONAGUA. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ajacuba (1311), estado de Hidalgo*. Ciudad de México: Subdirección General Técnica Gerencia de Aguasa Subterráneas.

Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona: EDICIONES OMEGA S. A.

Doneen LD. (1964). *Notes on water quality in agriculture*. Department of Water Science and Engineering. University of California, Davis.

Dassargues, A. (2019). *Hydrogeology groundwater science and engineering*. Boca Raton: CRC Press.

Deshmukh, S., Singh, A., & Datta, S. (2015). Impact of wastewater irrigation on the dynamics of metal concentrations in the vadose zone: monitoring:part I. *Environ Monit Assess*. doi:DOI 10.1007/s10661-015-4898-3

Downs, T., Cifuentes-Garcia, E., & Mel Suffet, I. (1999). Risk Screening for Exposure to Groundwater Pollution in a Wastewater Irrigation District of the Mexico City Region. *Environmental Health Perspectives*, 107(7).

Drechsel, P., Marjani Zadeh, S., & Pedrero, F. (2023). *Water quality in agriculture: Risk and risk mitigation*. Roma: The Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Water Management Institute.

Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban water*, 85-104. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4)

FAO. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido de <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/916c897d-a65a-4e72-8b0b-c1022154c7df/content>

Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *GROUNDWATER*. United States of America: Prentice Hall, Inc.

Fries, C. (1962). *Carta geológica de México, Hoja Pachuca 14 Q*. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Fries, E., Mahjoub, O., Mahjoub, B., Berrehouc, A., Lions, J., & Bahadir, M. (2016). Occurrence of contaminants of emerging concern (CEC) in conventional and non-conventional water resources in Tunisia. *Fresenius Environmental Bulletin*, 25, 3317-3339.
- Gallegos, E., Warren, A., Robles, E., Campay, E., Calderon, A., Sainz, M., . . . Escolero, O. (1999). The effects of wastewater irrigation on groundwater quality in Mexico. *Water Science and Technology*, 40, 45-52.
- Gapon, E. (1933). On the theory of exchange adsorption in soils. *Journal General Chemistry USSR*, 3, 144-152.
- García García, J. (2001). La Agricultura de Riego y el Riego con Aguas Negras. *Economía y Sociedad*, 10.
- García Salazar, E. (2019). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*. Obtenido de <https://doi.org/10.24836/es.v29i54.741>
- García, E. (1998). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Garfias Quezada, J. (2015). *Modelación numérica de acuíferos en diferencias finitas utilizando la interfaz libre PM-WIN: Fundamentos teóricos y caso de aplicación en el Valle del Mezquital*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gharaibeh, M., Ghezzehei, T., Albalasmeh, A., & Alghzawi, M. (2016). Alteration of physical and chemical characteristics of clayey soils by irrigation with treated waste water. *GEODERMA*, 276, 33-40. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.04.011>
- Gibbs, R. (1970). Mechanisms Controlling World Water chemistry. *Science*, 1088-1090.
- González Abraham, 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*. La Paz, Baja California Sur.: Centro de Investigaciones biológicas del Noroeste, S.C.
- Goya Sánchez, J. (2011). *Distribución espacial de la vulnerabilidad del acuífero de abastecimiento de la ciudad de México aplicando la metodología DRASTIC*. DF, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Halliwell, D., Barlow, K., & Nash, D. (2001). A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. *Australian Journal of Soil Research*, 39, 1259-1267.
- Hashem, M., & Qi, X. (2021). Treated Wastewater Irrigation-A Review. *Water*. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/w13111527>

Hassanpour Darvishi, H., Manshour, M., & Aliabadi Farahani, H. (2010). The effect of irrigation by domestic waste water on soil properties. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 30-33. Obtenido de <http://www.academicjournals.org/JSSEM>

Hiscock, K., & Bense, V. (2014). *HYDROGEOLOGY Principles and practice*. UK: Blackwell Science Ltd.

INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Jampani, M., Liedl, R., Hulsmann, S., Sonkamble, S., & Amerasinghe, P. (2020). Hydrogeochemical and mixing processes controlling groundwater chemistry in a wastewater irrigated agricultural system of India. *Chemosphere*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124741>

Jimenez, B., & Chávez, A. (2004). Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: "El Mezquital Valley" case. *Water Sci Technol*, 269-276.

Khalid, S., Shahid, M., Natasha, Bibi, I., Sarwar, T., Haidar Shah, A., & Khan Niazi, N. (2018). A Review of Environmental Contamination and Health Risk Assessment of Wastewater Use for Crop Irrigation with a Focus on Low and High-Income Countries. *Environmental Research and Public Health*, 895. doi:10.3390/ijerph15050895

Kresic, N. (2006). *Hydrogeology and groundwater modeling*. Taylor & Francis group.

Lara Figueroa, H., & García Salazar, E. (2019). Prevalencia de enfermedades asociadas al uso de agua contaminada en el Valle del Mezquital. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 7(21).

Lesser Carrillo, L., Lesser Illades, J., Arellano Islas, S., & González Posadas, D. (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 28(3).

Lloyd, W., & Heathcote, A. (1985). *Natural Inorganic Hydrochemistry in Relation to Groundwater, an Introduction*. Oxford: Clarendon Press.

Lugo Morin, D. (2009). El uso de aguas residuales en la agricultura en México. *AMBIENTE Y DESARROLLO*, 13.

Mifflin, M. (1988). Region 5, Great Basin in Back W Roosenstein, J.S and Seaber. *Hydrogeology Geological Society of America*, 69-78.

Milan, M. (1982). *Ampliación del estudio geológico de las zonas geotérmicas de Yenthó, Pathé y Taxidó, Hidalgo, México*. CFE.

Milan, M., Yáñez, C., Navarro, I., Verma, S., & Carrasco Nuñez, G. (1993). Geología y geoquímica de elementos mayores de la Caldera de Huichapan, Hidalgo, México. *Geofísica Internacional*, 261-276.

Morán Rmírez, J., Ledesma Ruíz, R., Mahlkecht, J., & Ramos Leal, J. (2016). Rock- water interactions and polution processes in the volcanic aquifer system of Guadalajara, México, using inverse geochemical modeling. *Applied Geochemistry*, 79-94.

Muttamara, S. (1996). Wastewater characteristics. *Resources, Conservation and Recycling.*, 16, 145-159. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(95\)00052-6](https://doi.org/10.1016/0921-3449(95)00052-6)

NOM-127-SSA-2021

NOM-

Pacheco Vega, R. (2007). Participación de la Comisión Nacional del Agua en el tratamiento de aguas residuales en la Cuenca Lerma-Chapala. Estadísticas federales y realidades estatales. *Región y Sociedad*, 15.

Pereira, D., Yanagi , S., del Mello , C., Da Silva, A., & Da Silva , L. (2009). Performance of the reference evapotranspiration estimating methods for the Mantiqueira range region, MG, Brazil. *Ciencia Rural*, 39(9), 2488-2493.

Pérez Díaz, J., Ortega Escobar, H., Ramirez Ayala, C., Flores Magdaleno, H., Sánchez Bernal, E., Can Chulim, Á., & Mancilla Villa, Ó. (2018). Nitrate, phosphagte and boron content in wastewater for crop irrigation in Mezquital Valley, Hidalgo. *Nova scientia*, 10(21).

Pérez Díaz, J., Ortega Escobar, H., Ramírez Ayala, C., Flores Magdaleno, H., Sánchez Bernal, E., Can Chulim, Á., & Mancilla Villa, O. (2019). Wastewater quality assessment for agricultural crop irrigation in Mezquital Valley, Hidalgo. *Acta univ*, 29.

Piper, A. (1953). A Graphic Procedure in the Chemical Interpretation of Water Analysis. *US Geological Survey Groundwater* , 12.

Pratt, A. (2003). Typediagrammet til klassificering af vandtyper- en opdatering. *DanskVand fra kildevand til spildevand*, 206-208.

Ramos Leal , J. (2002). *Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e Impacto Ambiental, Caso Río Turbio, Guanajuato*. Guanajuato: Universidad Nacional Autonoma de México.

Richards, L. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Soil Science*, 78(2), 154.

Schoeller, H. (1975). Geochemistry of groundwater. In *Groundwater Studies: An International Guide for Research and Practice* . UNESCO, 1-15.

Schoeller, H. (1977). Geochemistry of groundwater. *Groundwater studies-an international guide for research and practice*. UNESCO, 1-18.

Segerstrom, K. (1961). *Geología del sureste del estado de Hidalgo y del noreste del estado de México*. Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros.

- Siemens, J., Huschek, G., Siebe, C., & Kaupenjohann, M. (2008). Concentrations and mobility of human pharmaceuticals in the world's largest wastewater irrigation system, Mexico City-Mezquital Valley. *Water Research*, 42, 2124-2134.
- Sokolov, A., & Chapman, T. (1974). *Métodos de cálculo del balance Hídrico: guía internacional de investigación y métodos*. Francia: UNESCO.
- Szabo, D., Coggan, T., Robson, T., Currel, M., & Clarke, B. (2018). Investigating recycled water use as a diffuse source of per- and polyfluoroalkaly substances (PFASs) to groundwater in Melbourne, Australia. *Sci Total Environ*. doi:doi:10.1016/j.scitotenv.2018.07.048
- Tartabull Puñales, T., & Betancourt Aguilar, C. (2016). La calidad del agua para el riego. Principales indicadores de medida y procesos que la impactan. *Revista Científica Agroecosistemas.*, 47-61.
- Torres, P., Hernán Cruz, C., & Janeth Patiño, P. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15).
- Tóth, J. (2009). *Gravitational systems of groundwater flow*. Cambridge: Cambridge University Press.
- UNESCO. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017*. París: UNESCO. Obtenido de https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarcdef_0000247647&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach_import_1d789121-19f2-41a2-95eb-d848cdf39fd0%3F_%3D247647spa.pdf&locale=es&multi=true&ark=/ark:/48223/p
- Wilcox, L. (1955). *Classification and Use of Irrigation Waters. Circular 969*. Washington D. C: United States Department of Agriculture .
- Wilson, B., Hernández M., J., & Meave T., E. (1955). Un banco calizo del cretácico en la parte oriental del estado de Querétaro, México. *Boletín de la sociedad geológica Mexicana*, 18(1).
- Wu, J., Wang, L., Wang, S., Tian, R., Xue, C., Feng, W., & Li, Y. (2017). Spatiotemporal variation of groundwater quality in an arid area experiencing long-term paper wastewater irrigation, northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 76, 460. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6787-2>

