

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**EFECTOS DE LAS FALLAS GEOLÓGICAS EN LOS ADEMES DE POZOS
DEL EJIDO “EMILIANO ZAPATA” EN SAYULA, JALISCO**

Por:

TOMÁS GUTIÉRREZ CORONA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el grado de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE
EFECTOS DE LAS FALLAS GEOLÓGICAS EN LOS ADEMES DE POZOS DEL
EJIDO "EMILIANO ZAPATA" EN SAYULA, JALISCO

Por:

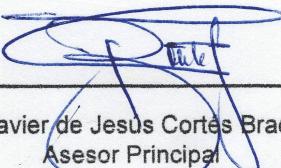
TOMÁS GUTIÉRREZ CORONA

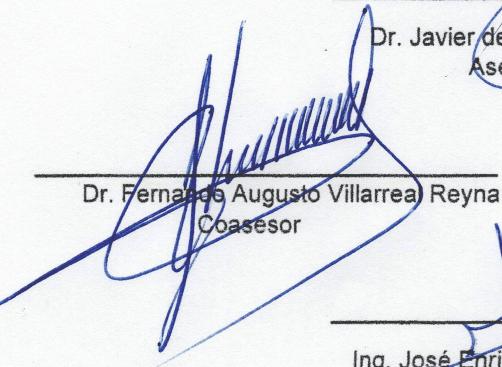
TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el grado de:

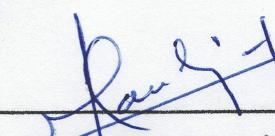
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobada por el H. Jurado Examinador:

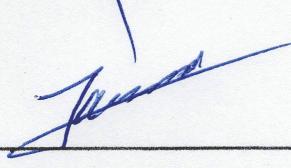

Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho
Asesor Principal


Dr. Fernando Augusto Villarreal Reyna
Coasesor


M.C. Carlos Suárez Plascencia
Coasesor Externo


Ing. José Enrique Mandujano Álvarez
Coasesor




M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAGE
EFECTOS DE LAS FALLAS GEOLÓGICAS EN LOS ADEMES DE POZOS DEL
EJIDO "EMILIANO ZAPATA" EN SAYULA, JALISCO

Por:

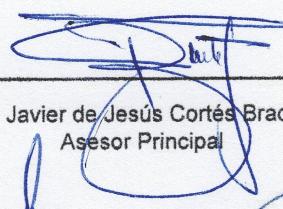
TOMÁS GUTIÉRREZ CORONA

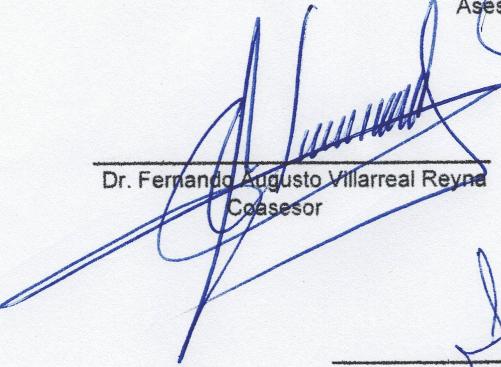
TESIS

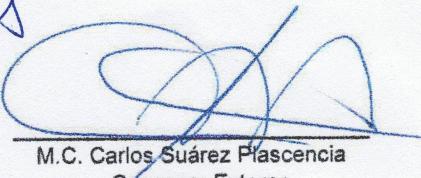
Presentada como requisito parcial para obtener el grado de:

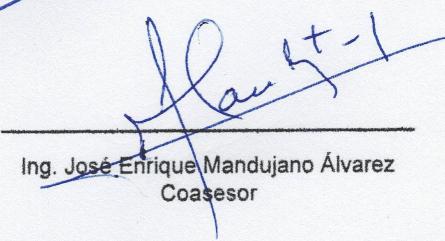
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobada por el comité de asesoría:


Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho
Asesor Principal


Dr. Fernando Augusto Villarreal Reyna
Coasesor


M.C. Carlos Suárez Plascencia
Coasesor Externo


Ing. José Enrique Mandujano Álvarez
Coasesor

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre 2025

DECLARACION DE NO PLAGIO

El autor quien es responsable directo, jura bajo protesta decir la verdad, que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (copiado y pegado); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados datos o la tesis para presentarla como copia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin comillas; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. En este sentido, lo anterior puede ser confirmado por el lector, estando consciente de que, en caso de comprobarse plagio del texto, no respetar los derechos de autor, edición o modificación, será sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias generadas en caso de existir cualquier tipo de plagio y declaro que este trabajo es original.

Tomás Gtz C

Tomás Gutiérrez Corona

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por darme la vida y permitirme llegar hasta este punto en mi vida. Por siempre estar ahí cuando más lo necesite.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por abrirme sus puertas desde día uno, por todo lo aprendido y permitirme cumplir mi sueño de formar parte de ella. Me llevo grabados de por vida muchos buenos recuerdos forjados dentro de sus instalaciones.

A **Mi Familia** gracias por cada una de sus palabras de aliento durante mi etapa de universitario. Siempre han sido un pilar fuerte dentro de mí. Sin su apoyo no hubiera podido ser posible nada de lo que eh realizado durante mi vida. Gracias.

Al **Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho** por confiar en este proyecto desde el primer día, orientarme con todas las dudas que surgieron durante la elaboración de este trabajo, por su apoyo para llevar este trabajo al XIV Congreso de Aguas Subterráneas y su paciencia durante todo momento. Muchas gracias por su amistad.

Al **M.C. Carlos Suárez Plascencia** por aceptar sumarse a este trabajo y todas y cada una de sus valiosas aportaciones al mismo.

Al **Dr. Fernando Augusto Villarreal Reyna** por aceptar colaborar y contribuir en este trabajo.

Al **Ing. José Enrique Mandujano Álvarez** por sus consejos y aportaciones a este trabajo.

A todos y cada uno de los maestros que recibí alguna clase, pero en especial a los **profesores del departamento de Riego y Drenaje**: Dr. Javier Cortés, MC. Aaron Melendres, Dr. Alejandro Zermeño, Dr. Manuelita Bolívar, Dr. Sergio Garza Vara, MC. Tomás Reyna, MC. Edmundo Ramírez, Dr. Fernando Villarreal, MC. Gregorio Briones, Dr. Luis Samaniego, Doña Vicky, Claudia, Paola, Ing. Enrique Mandujano, Mary.

DEDICATORIA

A **Mi Familia**, mi padre José Higinio Gutiérrez Huerta, mi madre María del Sagrario Corona Flores y hermanos Elías Gutiérrez Corona eh Isaac Gutiérrez Corona. Gracias por estar conmigo en todo momento dándome fortaleza para ir dando cada paso que nos ayudó a llegar a la meta. Este éxito es de todos nosotros.

A **Mis Abuelos** Narcisa Huerta López † y Francisco Gutiérrez Ramírez † gracias por inculcarme la vida de campo, sin ustedes no estaría aquí.

A **Mis Abuelos** Gloria Flores Larios y Tomás Corona Sevilla † gracias por su cariño y apoyo durante mi vida.

A **Adriana Rodríguez** por su compañía, apoyo y consejos durante todo este proceso.

A todos y cada uno de mis **Compañeros de Carrera**: Yasiel Alvarado, Mauro Morales, Alicia Baeza, Janet Laureano, Carlos Macias, Eduardo Aguilar, Gerardo Hernández, Alan Pérez, José Roblero, Eduardo Villegas, Roxana García, Anthony Romero, Yolanda López, Erick Salomón, Rubén Darío. Me llevo muy buenos recuerdos y vivencias con todos y cada uno de ustedes. Un gusto haber coincidido con ustedes en esta etapa.

A **Mis Paisanos y Amigos**: Aaron Cárdenas, Max Sánchez, Andrés Lima, Erick Mothe, Juan Pablo Gutierrez, Gustavo Barrera, Gisela Hernández, Alan Hernández, Fernando García, Isaac Meza, Gustavo Preciado, Alfredo Hernández, Yarely García, Angye Luna, Aldo Muñoz, Sebastián Padilla, Azael Quiroz, Raúl Cruz, Daniel Plascencia, Christian Cuevas, Elizabeth Chávez, Víctor Martínez, Micky, Mariana Gutiérrez, Don Chevo. Por hacer mucho más amena mi estancia en la universidad.

A la familia **Gutiérrez Guzmán y Flores Chairez**, por hacernos sentir siempre como en casa y apoyar a mi familia en los momentos más difíciles.

ÍNDICE

DECLARACION DE NO PLAGIO	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	v
INDICE DE FIGURAS.....	viii
INDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1 LUGAR DE ESTUDIO	4
3.2 ESTRATIGRAFÍA.....	6
3.2.1 Rocas ígneas del Terciario medio	7
3.2.2 Tobas volcánicas del Terciario.....	8
3.2.3 Vidrios riolíticos del Terciario.....	8
3.2.4 Basaltos del Cuaternario (Pleistoceno).....	9
3.2.5 Depósitos aluviales del Cuaternario.....	9
3.3 GRABEN ZACOALCO - COLIMA.....	13
3.4 PERFILES GRAVIMÉTRICOS.....	14
3.4.1 Perfil A-A'	15
3.4.2 Perfil B-B'	17
3.4.3 Perfil C-C'	19
3.5 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE ROCAS.....	20
3.6 ADEMES DE POZOS	23
3.6.1 Resistencia al colapso.....	23
3.6.2 Ademes Metálicos	23
3.6.3 Ademes PVC.....	25
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
4.1 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	27
4.2 UBICACIÓN DEL EJIDO “EMILIANO ZAPATA”	31
4.2.1 Actividades económicas primarias	32
4.3 PIEZOMETRÍA	34

4.4	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN ESPACIAL CON SIG .	36
4.5	VALIDACIÓN Y REVISIÓN DE CAMPO	39
5.	RESULTADOS	41
5.1	CURVAS A NIVEL	41
5.2	EDAFOLOGÍA.....	43
5.3	CLIMAS.....	45
5.4	HIDROGEOLOGÍA.....	47
5.5	PRECIPITACIÓN	49
5.6	USOS DE SUELO Y VEGETACIÓN.....	51
5.7	CUERPOS DE AGUA.....	54
5.8	PROVINCIAS FISIOGRÁFICAS	57
5.9	EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	59
5.10	GEOLOGÍA	61
5.11	PIEZOMETRÍA	64
5.12	FALLAS GEOLÓGICAS.....	66
6.	CONCLUSIONES.....	69
7.	RECOMENDACIONES	75
8.	BIBLIOGRAFÍA	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Localización de la zona de estudio. (CONAGUA, 2024)	4
Figura 2.- Columna Estratigráfica Superior, Servicio Geológico Mexicano. (SGM, 2017).....	11
Figura 3.- Columna Estratigráfica Inferior, Servicio Geológico Mexicano. (SGM, 2017)	12
Figura 4.- Perfiles gravimétricos. (Rosas Palafox, 2016)	14
Figura 5.- Perfil A-A'. (Rosas Palafox, 2016).....	15
Figura 6.- Perfil B-B'. (Rosas Palafox, 2016)	17
Figura 7.- Perfil C-C'. (Rosas Palafox, 2016)	19
Figura 8.- Ademe con ranuras longitudinales rectas. (CONAGUA, 2019).....	23
Figura 9.- Principales afectaciones en ademes.....	26
Figura 10.- Delimitación del acuífero.....	29
Figura 11.- Ubicación Ejido “Emiliano Zapata”. (INEGI, 2018).....	31
Figura 12.- Medición de nivel estático.....	34
Figura 13.- Elevación del nivel estático en msnm de 1998. (CONAGUA, 2024).....	35
Figura 14.- Recortes que se han hecho en el ademe de un pozo.....	39
Figura 15.- Maniobra de recorte de ademe con gato hidráulico.....	39
Figura 16.- Arena extraída por los pozos	40
Figura 17.- Plano Curvas a Nivel. (INEGI, 2013)	41
Figura 18.- Plano de Edafología. (INEGI, 2024)	43
Figura 19.- Plano de Climas. (CONABIO, 2008)	45
Figura 20.- Plano de Hidrogeología. (CONABIO, 2008).....	47
Figura 21.- Plano de Precipitación. (CONABIO, 2008).....	49
Figura 22.- Plano de Usos de Suelo y Vegetación. (INEGI, 2024).....	51
Figura 23.- Plano de Cuerpos de Agua. (CONABIO, 2022)	54
Figura 24.- Plano de Provincias Fisiográficas. (INEGI, 2001)	57
Figura 25.- Plano de Evapotranspiración. (INEGI, 2008).....	59
Figura 26.- Plano de Geología. (INEGI, 2020)	61
Figura 27.- Niveles piezométricos medidos en el ejido	64
Figura 28.- Plano de interacción de fallas geológicas y geología con los pozos profundos del ejido. (INEGI, 2016)	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Propiedades físicas y mecánicas de diversas rocas. (Ramírez Oyanguren Pedro y Alujano Monge Leandro, 2004)	22
Tabla 2.- Tipos de metales o aleaciones para ademe. (CONAGUA, 2019).....	25
Tabla 3.- Vértices de la poligonal acuífero Lagunas 1449. (CONAGUA, 2024).	28

RESUMEN

Este estudio se llevó a cabo en el ejido Emiliano Zapata, ubicado en Sayula, Jalisco, una región donde la agricultura es la principal actividad y el agua subterránea se utiliza intensamente. Un problema común en esta zona es el desplazamiento vertical de los ademes de los pozos, lo cual afecta el funcionamiento adecuado de los sistemas de extracción de agua. El objetivo principal de la investigación fue entender cómo las fallas geológicas, especialmente las relacionadas con el graben Zacoalco-Colima, influyen en estos desplazamientos. Para lograrlo, se aplicó una metodología que combinó observaciones en campo, mediciones piezométricas, análisis espacial mediante sistemas de información geográfica e interpretación de perfiles gravimétricos. Los resultados mostraron que los pozos ubicados cerca de fallas activas tienden a presentar problemas de elevación en sus ademes, lo que sugiere que los movimientos tectónicos pueden estar afectando las estructuras subterráneas. Además, se detectó la expulsión de sedimentos finos en algunos pozos, lo que refuerza la idea de una relación entre los cambios geológicos y el comportamiento del flujo de agua. El estudio concluye que es importante considerar las condiciones geológicas al diseñar y mantener los pozos, y que se debe fortalecer el monitoreo hidrogeológico en zonas con actividad sísmica. Estos resultados aportan información clave para una mejor gestión del agua subterránea en regiones con geología compleja.

PALABRAS CLAVE

Graben Zacoalco-Colima, Agua subterránea, Acuífero Lagunas, SIG, Geología.

ABSTRACT

This study was carried out in the Emiliano Zapata ejido, located in Sayula, Jalisco, a region where agriculture is the main activity and groundwater is heavily used. A common issue in this area is the vertical movement of well casings, which affects the proper functioning of water extraction systems. The main goal of the research was to understand how geological faults, especially those related to the Zacoalco-Colima graben, influence these casing displacements. To achieve this, the study combined field observations, piezometric measurements, spatial analysis using geographic information systems, and interpretation of gravimetric profiles. The findings showed that wells located near active faults tend to present casing elevation problems, suggesting that tectonic movements may be affecting the underground structures. In some wells, fine sediments were also found, which supports the idea that geological changes are linked to water flow behavior. The study concludes that it is important to consider geological conditions when designing and maintaining wells, and that continuous monitoring is necessary in areas with seismic activity. These results contribute to better groundwater management in regions with complex geological settings.

KEY WORDS

Zacoalco-Colima Graben, Groundwater, Lagunas Aquifer, GIS, Geology.

1. INTRODUCCIÓN

La sobreexplotación del recurso hídrico es un tema de suma importancia en la vida actual, ya que año con año, el agua apta para cubrir con las necesidades primarias, ha ido disminuyendo su disponibilidad. En el municipio de Sayula Jalisco esta cuestión ha causado mucha inquietud, dado que en los últimos años las consecuencias de este uso desmedido del líquido vital, se han vuelto cada vez más notorios de diferentes formas; desde la disminución de los niveles freáticos de los mantos acuíferos, hasta la aparición de grietas de grandes extensiones y profundidades. Estos son un reflejo del abatimiento de los reservorios de agua subterránea que se encuentran en dicha localidad.

Sayula es un municipio que actualmente se caracteriza principalmente por la agricultura intensiva y extensiva, por lo cual el sector agrícola es el de mayor consumo hídrico con un 87.17% del aprovechamiento del agua superficial y un 94.48% de uso del agua subterránea. Los sectores que ocupan en resto del agua superficial son el pecuario (1.78%), público urbano (11.06%); del agua subterránea, sector público urbano (4.47%), sector pecuario (0.15%), usos múltiples (0.86%), servicios (0.03%) y el sector industrial (0.02%) respectivamente. (CEAJ, 2015). Esto lleva a que cada vez sean necesarios más pozos profundos para obtención de agua, lo que ha causado una notable reducción en los niveles estáticos de los pozos profundos.

El graben Zacoalco-Colima atraviesa al municipio de Sayula de norte a sur, este se caracteriza por presentar una constante actividad tectónica. Durante los sismos de los años 2021 y 2022, se presentaron grietas en el suelo que llegaron a alcanzar longitudes de hasta 1.6 km y profundidades de 19 metros, afectando zonas de cultivo, como viviendas y carreteras.

Los ademes de los pozos que se encuentran en la zona de estudio, con frecuencia y al paso del tiempo, presentan elevaciones en su nivel original de colocación, lo que hace que la columna de bombeo, así como la garza de descarga, presenten movimientos no deseados que ponen en riesgo el uso eficiente de la operación del mismo pozo.

2. OBJETIVOS

- Evaluar la correlación que existe entre las fallas geológicas del graben Zacoalco-Colima que atraviesan el municipio de Sayula, Jalisco, e identificar su interacción con la elevación de la superficie de los ademas de los pozos del ejido Emiliano Zapata.
- Utilizar un Sistema de Información Geográfica (SIG) para determinar espacialmente la correlación entre capas, contemplando las variables climatológicas, geológicas, geofísicas y la ubicación de los pozos en el ejido Emiliano Zapata.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 LUGAR DE ESTUDIO

El acuífero Lagunas, identificado con el número 1449 por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), representa una unidad hidrogeológica de alta relevancia para el abastecimiento de agua en la región sur-sureste del estado de Jalisco, México. Esta unidad se localiza geográficamente entre los paralelos 20° 27' y 19° 46' de latitud norte, y los meridianos 103° 42' y 103° 12' de longitud oeste, abarcando un área con características fisiográficas y geológicas complejas, propias del Eje Neovolcánico Transversal, que influyen directamente en su dinámica hidrológica.



Figura 1.- Localización de la zona de estudio. (CONAGUA, 2024)

El acuífero se extiende a lo largo de una superficie aproximada de 2136.77 km², considerando tanto la zona de almacenamiento subterráneo como las áreas de recarga natural. Estas zonas de recarga están asociadas principalmente a laderas montañosas con alto índice de infiltración, donde los materiales volcánicos fracturados permiten el ingreso de agua pluvial hacia los estratos permeables del subsuelo. Su delimitación espacial lo sitúa en un contexto hidrogeológico donde interactúa con múltiples unidades vecinas, formando una red de flujo subterráneo regional.

Los límites hidrogeológicos del acuífero Lagunas son definidos por la presencia de otros sistemas acuíferos colindantes. Al norte, se encuentra en contacto con los acuíferos de Ameca, San Isidro y Huejotitlán; al sur, limita con los acuíferos de Jiquilpan, Ciudad Guzmán, Unión de Guadalupe y Aguacate; hacia el este, comparte frontera con los acuíferos de Tizapán y Chapala, mientras que al oeste colinda con los sistemas de Autlán y Tapalpa. Esta configuración establece relaciones de flujo interacuífero, especialmente relevantes en la gestión regional del recurso hídrico, debido a la posible transferencia de agua subterránea a través de zonas de contacto geológico permeable.

Administrativamente, el acuífero 1449 se encuentra distribuido dentro de varios municipios de la región, entre los que destacan: Concepción de Buenos Aires, Teocuitatlán de Corona, Zacoalco de Torres, Villa Corona, Techaluta de Montenegro, Amacueca, Sayula y Atoyac. Todos estos municipios dependen en mayor o menor medida del agua subterránea como fuente principal para usos agrícolas, pecuarios, industriales y domésticos, siendo especialmente crítica en comunidades rurales que no cuentan con infraestructura de abastecimiento superficial.

Según datos de la Subdirección General Técnica de la Gerencia de Aguas Subterráneas de CONAGUA (2024), este acuífero se encuentra en constante monitoreo debido a su importancia estratégica para el desarrollo económico y social de la región. La sobreexplotación del recurso, el incremento de la demanda por parte del sector

agroindustrial, así como los posibles efectos del cambio climático sobre los patrones de recarga, representan factores de presión que podrían comprometer su sustentabilidad a mediano y largo plazo.

El conocimiento preciso de la extensión, comportamiento hidráulico, calidad del agua, interacción con cuerpos superficiales y zonas de recarga del acuífero Lagunas es fundamental para implementar políticas de gestión integrada del recurso hídrico, que permitan su uso eficiente y sostenible. Lo anterior incluye la aplicación de modelos hidrogeológicos, balances hídricos, y evaluaciones de la vulnerabilidad ante contaminación o disminución de niveles piezométricos.

En este contexto, el acuífero 1449 no debe ser considerado como una unidad aislada, sino como parte de un sistema hídrico regional interconectado que requiere manejo técnico, científico y comunitario. La participación de los usuarios del agua, autoridades locales y expertos en hidrogeología es esencial para conservar este recurso, que representa la base del equilibrio ambiental y del bienestar social en el sur de Jalisco.

3.2 ESTRATIGRAFÍA

En la región correspondiente al acuífero Lagunas, en el estado de Jalisco, se presenta una gran diversidad litológica, la cual refleja una evolución geológica prolongada, compleja y activa. Las rocas que afloran en superficie son predominantemente de origen ígneo extrusivo, acompañadas por depósitos sedimentarios de tipo aluvial y lacustre. Estas últimas corresponden a materiales recientes acumulados por procesos fluviales o por sedimentación en ambientes acuáticos cerrados, como antiguos lagos o planicies de inundación. Por otro lado, los afloramientos de rocas metamórficas son muy escasos y se limitan a pequeñas zonas

ubicadas al sur del área, lo que sugiere que estas unidades corresponden a bloques aislados de rocas más antiguas que afloran de forma local.

3.2.1 Rocas ígneas del Terciario medio

En el centro de la región y en algunas porciones dispersas hacia el norte, se identifican formaciones riolíticas del Terciario medio, que se presentan como derrames volcánicos extensos. Estas rolitas muestran rasgos distintivos, como la presencia de obsidiana y esferas de ortoclasa, minerales típicos de rocas félsicas formadas por enfriamiento rápido de magma silícico. En las zonas donde se sospecha que el enfriamiento fue especialmente rápido, se observan planos de fluidez, una característica que indica que el magma aún se encontraba en movimiento al momento de solidificarse. Estas rocas riolíticas, al haber estado sometidas a procesos de alteración química y física a lo largo del tiempo, se encuentran actualmente entre las más alteradas de la región.

Las características físicas de estas rocas son también relevantes: presentan una coloración pardo-rosácea clara, estructura compacta, textura fluidal (indicativa del flujo magmático durante la formación de la roca), y su mineralogía incluye cuarzo, feldespatos (especialmente ortoclasa) y minerales arcillosos derivados de la alteración hidrotermal. Estas rocas juegan un papel importante en la geología local, ya que pueden influir en la recarga y circulación del agua subterránea por su grado variable de fracturamiento y permeabilidad secundaria.

3.2.2 Tobas volcánicas del Terciario

Otra unidad litológica ampliamente presente en la región corresponde a las tobas del Terciario, formadas principalmente por tobas pumíticas poco consolidadas. Estas rocas se originaron a partir de materiales expulsados durante erupciones explosivas y posteriormente depositados por caída o flujo piroclástico. Están compuestas por fragmentos de vidrio volcánico y presentan una amplia gama de colores, que va desde un gris amarillento claro hasta un café grisáceo oscuro. Su grado de consolidación es bajo, lo que significa que son rocas relativamente blandas y susceptibles a la erosión. En términos hidrogeológicos, estas tobas pueden actuar como acuíferos locales, especialmente donde están fracturadas, pero también pueden comportarse como acuíclidos donde el grado de compactación es mayor.

3.2.3 Vidrios riolíticos del Terciario

También se encuentran en la región perlitas y obsidianas, conocidas como vidrios riolíticos del Terciario. Estas rocas son el producto de enfriamientos extremadamente rápidos de lava muy silícea, dando lugar a materiales vítreos de alta densidad y dureza. Su color varía del gris claro al negro, y su aspecto vítreo brillante es inconfundible. Estas unidades afloran principalmente en la zona de la Sierra de la Primavera, al noroeste del área del acuífero Lagunas. La presencia de obsidiana tiene también interés arqueológico e histórico, ya que fue ampliamente utilizada por culturas prehispánicas en la elaboración de herramientas.

3.2.4 Basaltos del Cuaternario (Pleistoceno)

En etapas más recientes, correspondientes al Pleistoceno, se generaron extensos derrames basálticos, que hoy forman parte de las unidades del basalto moderno del Cuaternario. Estos basaltos están distribuidos por toda la zona y presentan características texturales que varían entre estructuras compactas y otras más vesiculares, según las condiciones de desgasificación y enfriamiento al momento de su emisión. Su textura afanítica indica que los cristales son muy pequeños, imperceptibles a simple vista, lo cual es típico de lavas que se enfrián rápidamente en superficie.

La coloración general es gris oscura, y en muchas zonas estos basaltos están asociados a conos volcánicos, estructuras cónicas formadas por la acumulación de materiales piroclásticos como cenizas volcánicas, arenas y lapilli. Estas unidades pueden representar zonas de recarga importantes para el acuífero, especialmente donde las fracturas y poros permiten la infiltración del agua.

3.2.5 Depósitos aluviales del Cuaternario

Finalmente, en la parte más superficial del perfil geológico, se encuentran los depósitos aluviales del Cuaternario, los cuales están compuestos por una mezcla de limos, arenas, gravas, arcillas plásticas, así como cantos rodados que han sido transportados por ríos y arroyos a lo largo del tiempo. Estos materiales suelen ser no consolidados o semiconsolidados, lo que los convierte en unidades altamente permeables, ideales para el almacenamiento y transmisión de agua subterránea. Además, es frecuente encontrar restos fósiles en estos sedimentos, lo cual aporta información valiosa sobre la evolución paleoambiental de la zona.

En términos hidrogeológicos, estos depósitos aluviales representan la principal zona de explotación del acuífero, ya que es en esta unidad donde se encuentran la

mayoría de los pozos de aprovechamiento. Su capacidad de infiltración depende del tamaño de grano, la compactación y la profundidad del nivel freático. (CONAGUA, 2024).

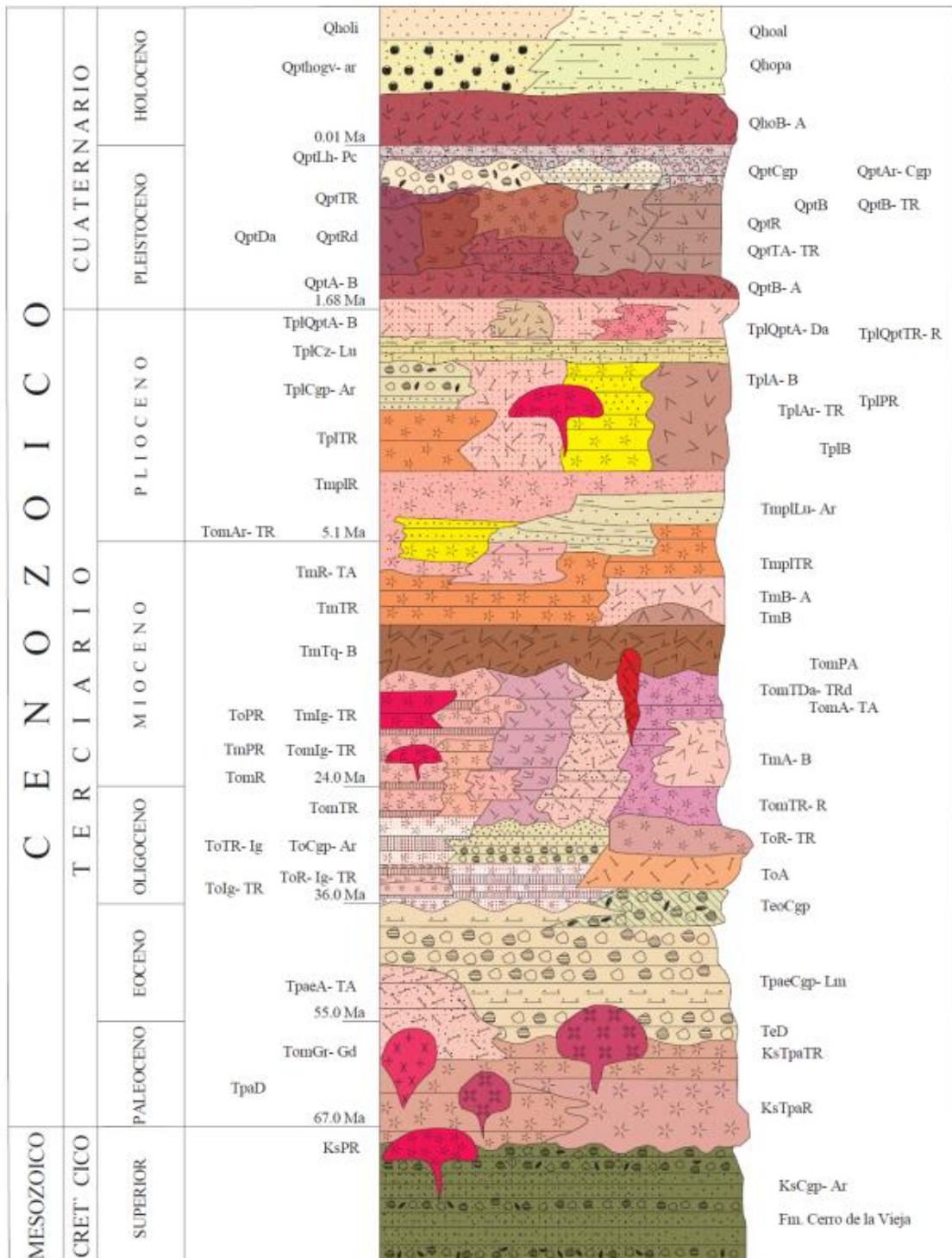


Figura 2.- Columna Estratigráfica Superior, Servicio Geológico Mexicano. (SGM, 2017)

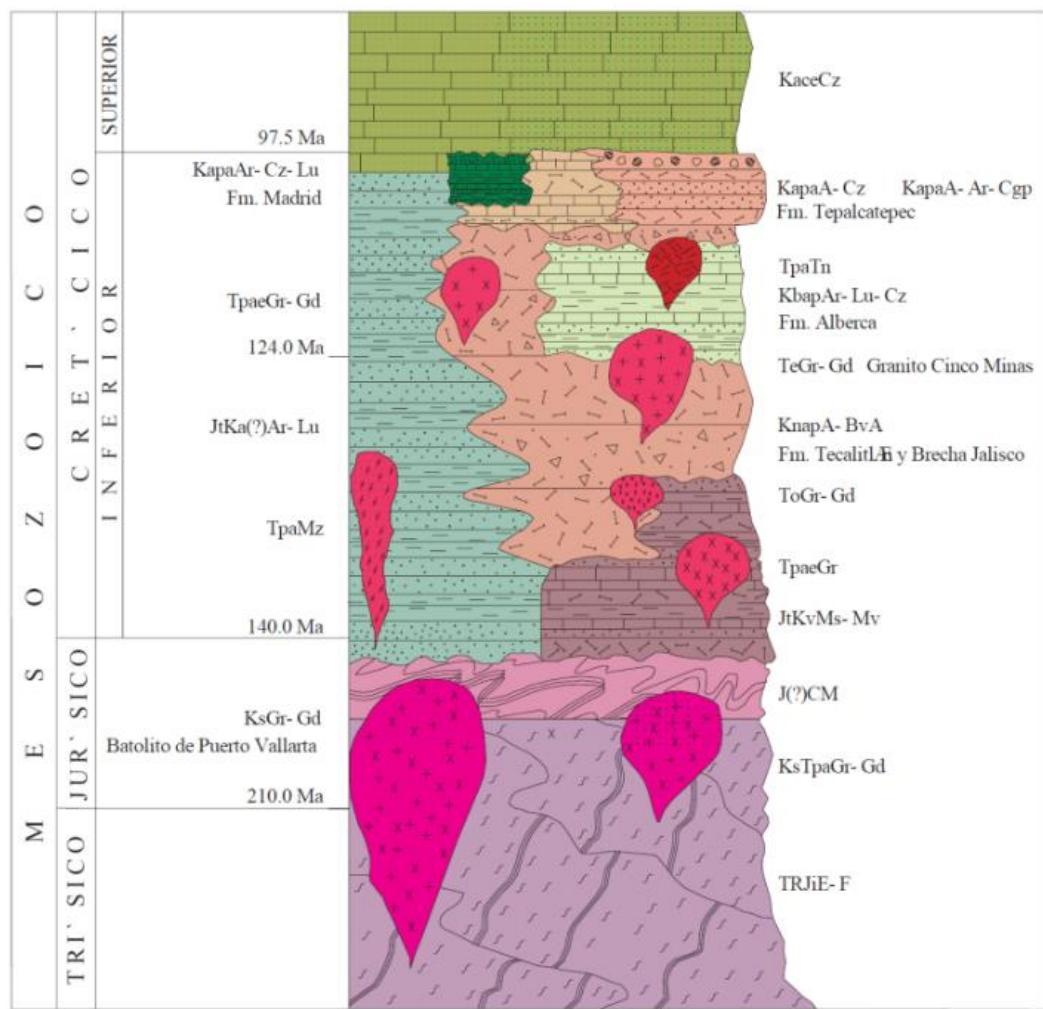


Figura 3.- Columna Estratigráfica Inferior, Servicio Geológico Mexicano. (SGM, 2017)

3.3

GRABEN ZACOALCO - COLIMA

El graben Zacoalco-Colima es una de las estructuras tectónicas más relevantes del occidente de México, y forma parte de una región caracterizada por procesos geodinámicos complejos, influenciados por la interacción entre el Eje Neovolcánico Transversal y el sistema de fallas asociado a la costa del Pacífico. Esta estructura consiste en dos provincias estructurales bien diferenciadas, separadas entre sí por la zona de Falla La Cumbre, una línea de debilidad tectónica significativa que ha jugado un papel central en la evolución estructural de la región.

Entre ambos grabenes se encuentra un alto estructural angosto, también alineado en dirección NE-SW. Este alto no es simplemente una elevación del basamento, sino que se ha interpretado como un cuerpo de magma solidificado, inyectado a lo largo de una fractura preexistente, lo que sugiere actividad magmática en sincronía con los procesos tectónicos extensionales. Este tipo de relaciones estructurales entre fallamiento y magmatismo es común en zonas de rift activo o en transición hacia una apertura oceánica.

En conjunto, el graben Zacoalco-Colima representa una estructura tectónica activa y de interés tanto geológico como geofísico, cuya evolución está íntimamente relacionada con la extensión litosférica, el ascenso de magma y la deformación cortical en el occidente mexicano. Comprender su arquitectura interna y sus relaciones con fallas regionales es clave para interpretar la dinámica tectónica de esta parte del continente. (Bandy, W. L., Mortera-Gutierrez, C. A., y Urrutia-Fucugauchi, J., 1993)

3.4 PERFILES GRAVIMÉTRICOS

Rosas Palafox (2016) realizo un estudio donde se incluyen 3 perfiles gravimétricos tomando en cuenta anatolias gravimétricas y magnéticas, topografía y la carta geológica. Dichos perfiles se encuentran posicionados de manera estratégica en la parte norte, central y sur de la zona de estudio.

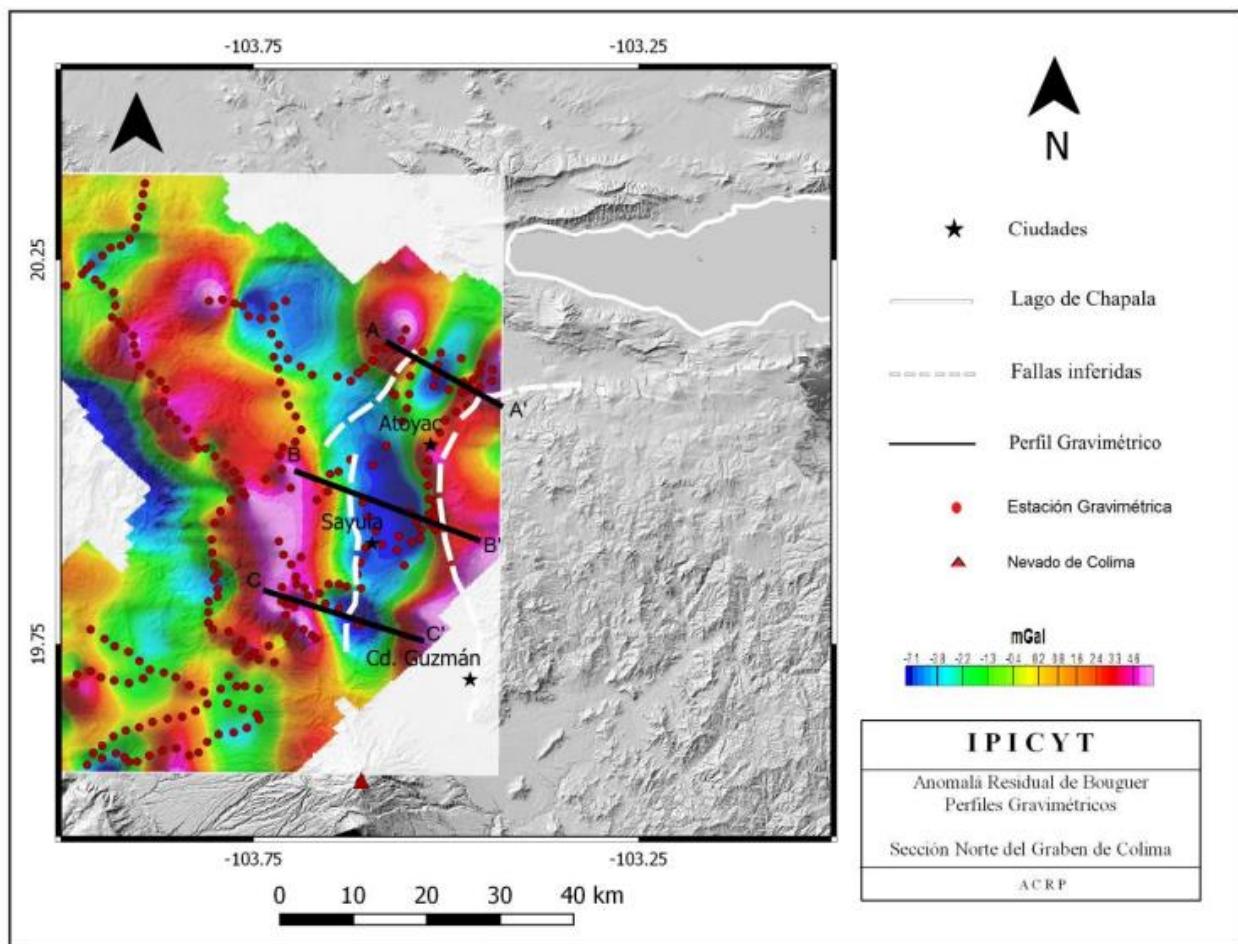


Figura 4.- Perfiles gravimétricos. (Rosas Palafox, 2016)

3.4.1 Perfil A-A'

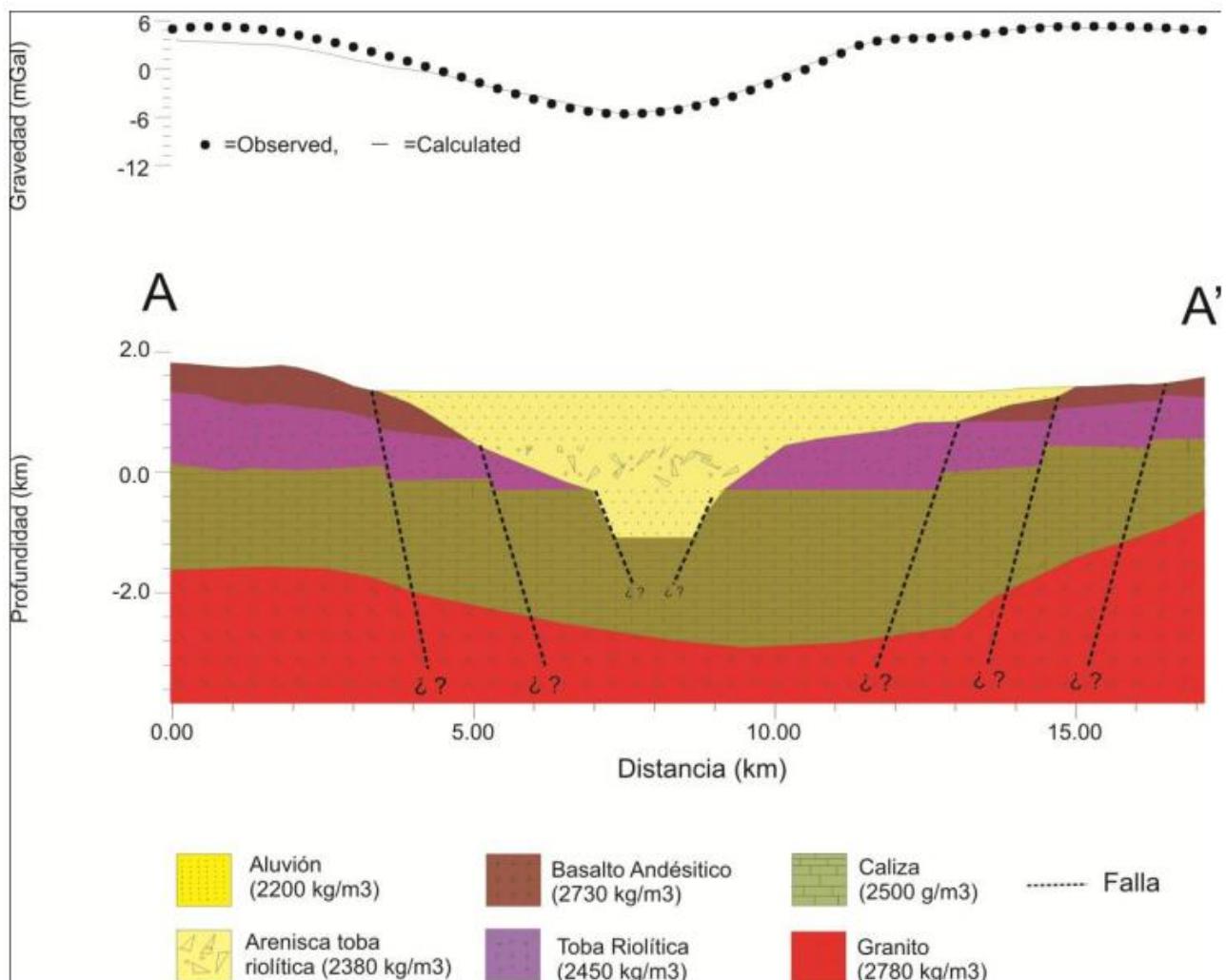


Figura 5.- Perfil A-A'. (Rosas Palafox, 2016)

El perfil geológico A–A' representa una sección transversal del subsuelo a lo largo de aproximadamente 17.7 km de extensión horizontal, una dirección NW-SE y hasta 6 km de profundidad. La columna estratigráfica está compuesta por seis unidades litológicas principales, diferenciadas por sus propiedades petrográficas, densidades y patrones gráficos, lo que permite establecer relaciones estratigráficas y estructurales:

- **Aluvión** (2200 kg/m³): depósitos superficiales cuaternarios de origen fluvial. Su geometría horizontal y distribución continua indican procesos recientes de sedimentación en ambientes de baja energía.
- **Basalto andesítico** (2730 kg/m³): unidad volcánica de alta densidad, dispuesta en bloques fallados. Su geometría sugiere flujos consolidados o cuerpos volcánicos intrusivos afectados por deformación tectónica.
- **Caliza** (2500 kg/m³): formación carbonatada de origen sedimentario. Su disposición estructural indica plegamiento y fallamiento, lo que sugiere una historia tectónica previa a la depositación de las unidades volcánicas.
- **Arenisca con toba riolítica** (2380 kg/m³): unidad sedimentaria volcánica. Su disposición estratificada indica una mezcla de procesos detríticos y volcánicos, posiblemente sincrónicos a la actividad tectónica.
- **Toba riolítica** (2450 kg/m³): depósitos volcánicos ácidos, distribuidos en capas subhorizontales. Su presencia sugiere eventos explosivos de caída piroclástica o flujos de ceniza consolidada.
- **Granito** (2780 kg/m³): cuerpo ígneo intrusivo de alta densidad, ubicado en profundidad. Su contacto discordante con las unidades suprayacentes indica una intrusión posterior a la evolución sedimentaria y volcánica.

Las **fallas normales**, representadas por líneas discontinuas, afectan significativamente la geometría de las unidades, generando bloques desplazados y contactos abruptos. Algunas fallas están marcadas con signos de interrogación, lo que indica incertidumbre en su ubicación o naturaleza, posiblemente debido a limitaciones en los datos geofísicos o geológicos disponibles.

3.4.2 Perfil B-B'

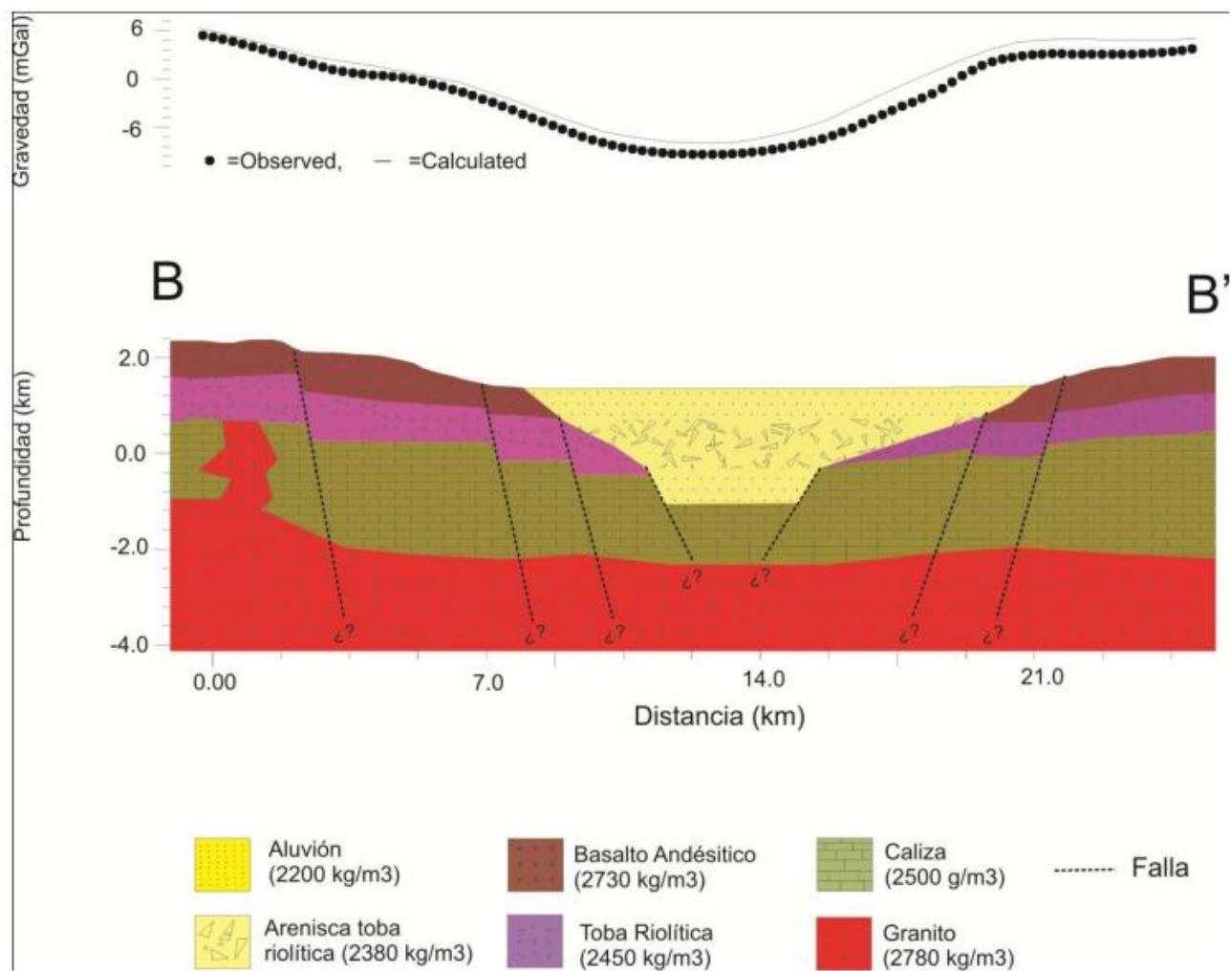


Figura 6.- Perfil B-B'. (Rosas Palafox, 2016)

El perfil geológico B-B' representa una sección transversal del subsuelo a lo largo de 26.4 km de extensión horizontal, una orientación NW-SE y hasta 6 km de profundidad. La columna estratigráfica está compuesta por las mismas seis unidades litológicas del perfil A-A':

- **Aluvión (2200 kg/m³)**

- **Basalto andesítico** (2730 kg/m³)
- **Caliza** (2500 kg/m³)
- **Arenisca con toba riolítica** (2380 kg/m³)
- **Toba riolítica** (2450 kg/m³)
- **Granito** (2780 kg/m³)

Se sigue teniendo la presencia del mismo tipo de fallas y ubicadas de una manera muy similar al perfil A-A'.

3.4.3 Perfil C-C'

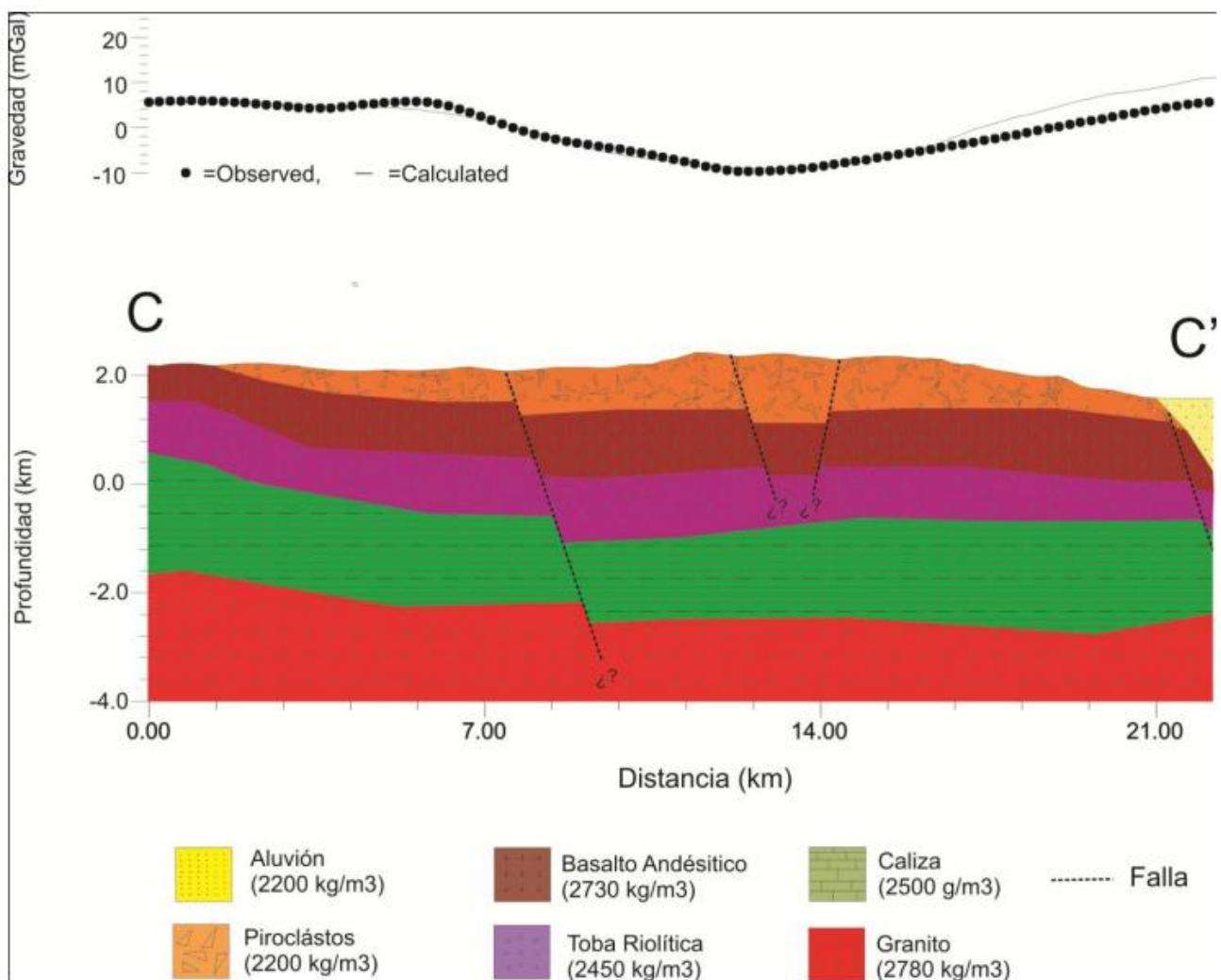


Figura 7.- Perfil C-C'. (Rosas Palafox, 2016)

El perfil geológico C–C' representa una sección transversal del subsuelo a lo largo de 22.5 km de extensión horizontal, una orientación NW-SE y hasta 6 km de profundidad. La columna estratigráfica está compuesta por 5 de las 6 unidades litológicas anteriores supliendo la arenisca toba riolítica por material piroclasto que destaca por cubrir casi el total del corte.

- Aluvión (2200 kg/m³)
- Piroclastos (2200 kg/m³): materiales volcánicos fragmentarios, posiblemente asociados a eventos explosivos. Se presentan como cuerpos intercalados en zonas de mayor complejidad estructural, lo que sugiere una relación con fases de actividad volcánica sincrónica a la deformación.
- Basalto andesítico (2730 kg/m³)
- Toba riolítica (2450 kg/m³)
- Caliza (2500 kg/m³)
- Granito (2780 kg/m³)

Hasta este punto ya se distinguen únicamente 4 fallas que siguen marcando una discontinuidad del material geológico presente.

3.5 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE ROCAS

En el contexto de obras de ingeniería que abarcan extensiones significativas del terreno, resulta esencial distinguir entre las propiedades de la roca intacta y las del macizo rocoso como conjunto. Esta diferenciación permite evaluar con mayor precisión el comportamiento geomecánico del subsuelo ante las solicitudes estructurales.

La roca intacta se caracteriza por propiedades intrínsecas como la mineralogía, la textura y la porosidad, las cuales definen su resistencia y deformabilidad en condiciones ideales. Sin embargo, en condiciones reales de campo, el comportamiento del macizo rocoso está condicionado por factores adicionales como el grado de alteración, el sistema de fracturamiento, la presencia de agua y el estado de esfuerzos al que se encuentra sometido.

Desde una perspectiva geotécnica e hidrogeológica, el análisis del comportamiento de los materiales rocosos debe considerar tanto sus propiedades mecánicas (resistencia, módulo de deformación, cohesión, ángulo de fricción) como sus propiedades hidráulicas (permeabilidad, porosidad efectiva, capacidad de almacenamiento). Estas propiedades determinan la respuesta del macizo ante cargas estructurales, así como su papel en la conducción y almacenamiento de agua subterránea.

Este enfoque resulta particularmente relevante en el diseño de cimentaciones profundas, túneles, presas y sistemas de captación de agua, donde la interacción entre esfuerzos mecánicos y flujo hidráulico puede comprometer la estabilidad y funcionalidad de la obra. Por ello, el estudio integral del macizo rocoso —más allá de la caracterización de la roca intacta— constituye un eje fundamental en la evaluación de riesgos geotécnicos y en la planificación de proyectos sustentables. (Herrera Castañeda, 2002)

Tabla 1.- Propiedades físicas y mecánicas de diversas rocas. (Ramírez Oyanguren Pedro y Alujano Monge Leandro, 2004)

ROCAS	DENSIDAD (kg/m ³)	MÓDULO DE YOUNG (GPa)	COEFICIENTE DE POISSON	POROSIDAD %	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)	RESISTENCIA A TRACCIÓN (MPa)	RESISTENCIA A FLEXIÓN (MPa)
Rocas batolíticas							
Granito granodiorita	2500-2750	30-70	0,12-0,25	0,1-2	120-280	4-7	10-20
Gabro	2920-3050	60-100	0,12-0,25	2-5	150-200	5-8	10-22
Rocas extrusivas							
Riolitas	2450-2600	10-20	0,1-0,2	0,4-4	80-160	5-9	10-22
Dacita	2500-2750	8-18	0,09-0,2	0,5-5	80-160	3-8	9-20
Andesita	2300-2750	12-35	0,11-0,2	0,2-8	40-320	5-11	13-25
Basalto	2750-3000	20-100	0,14-0,2	0,2-1,5	30-420	6-12	14-26
Diabasa	2900-3100	30-90	0,12-0,2	0,3-0,7	120-250	6-13	12-26
Tobas volcánicas	1300-2200	-----	0,1-02	8-35	5-60	0,5-4,5	3-8
Rocas sedimentarias							
Arenisca	2100-2500	15-17	0,07-0,12	1-8	10-120	1,5-6	4-16
Caliza de grano fino	2600-2850	50-80	0,1-0,2	0,1-0,8	50-200	4-7	5-15
Caliza de grano grueso	1550-2300	-----	0,12	2-16	4-60	1-3,5	2,5-7
Caliza	1550-2500	-----	0,07-0,12	1,5-6	49-200	1,5-5	3-9
Dolomita	2200-2700	20-30	0,08-0,2	0,2-4	15-200	2,5-6	4-16
Esquistos	2450-2750	-----	-----	0,2-0,4	-----	-----	20-30
Rocas metamórficas							
Mármol	2650-2750	60-90	0,11-0,2	0,1-0,5	50-180	5-8	8-12
Gneis	2600-2780	25-60	0,09-0,2	1-5	80-250	4-7	8-20

3.6 ADEMES DE POZOS

Los ademes de los pozos están constituidos por dos distintos tramos de tubería, la parte superior un tubo ciego y la parte del cedazo o rejilla, que permite el flujo radial del agua hacia la bomba de extracción.

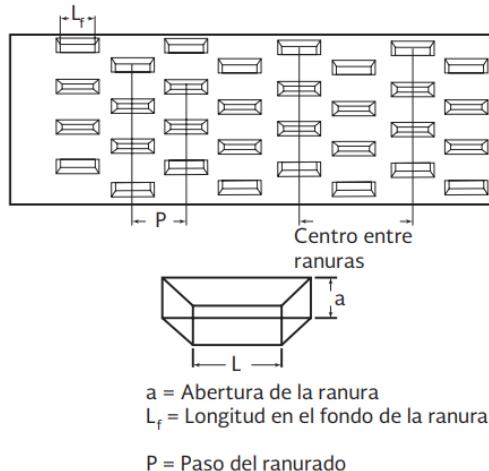


Figura 8.- Ademe con ranuras longitudinales rectas. (CONAGUA, 2019)

3.6.1 Resistencia al colapso

La capacidad del tubo de acero al carbono para resistir el colapso, previo al proceso de ranurado, presenta un límite de fluencia mínimo de 242 MPa (25 Kgf/mm²) y una resistencia última a la tensión de al menos 414 MPa (42 Kgf/mm²), tomando en cuenta un ovalamiento máximo permitido del 1 %, conforme a la norma NMX-B-050-SCFI.

3.6.2 Ademes Metálicos

Los ademes metálicos pueden ensamblarse por medio de rosca y cople, cople soldado o mediante soldadura eléctrica a tope con doble cordón. El orden en que se mencionan estos métodos refleja tanto su calidad técnica como su costo. La soldadura

eléctrica a tope con doble cordón es la técnica más empleada, aunque suele generar diversos problemas durante su utilización.

El inconveniente más común proviene de la necesidad de suspender la tubería durante el proceso de instalación, utilizando una flecha que atraviesa el ademe a través de orificios perforados de manera transversal. Una vez que se sueldan dos tramos consecutivos y quedan unidos, se retira la flecha del tubo inferior y se cierran las perforaciones con el fragmento de tubería previamente recortado. Posteriormente, este tramo se desciende al interior del pozo.

Con frecuencia, las soldaduras empleadas para cerrar estas tapas no reciben la atención adecuada, por lo que suelen desprenderse al poco tiempo, generando aberturas lo suficientemente grandes para permitir la entrada de material del filtro o del terreno al interior del pozo. Esto puede provocar un daño grave en la obra, a menos que se realice un encamisado correctivo, cuyo costo generalmente supera la diferencia de precio respecto a un ademe con cople.

Otro problema habitual en este tipo de uniones es la presencia de tubos con bocas deformadas por golpes o por un rolado deficiente, así como tubos sin biselar o cortados previamente con soplete, lo que provoca bordes irregulares y dificulta una unión adecuada.

Tabla 2.- Tipos de metales o aleaciones para ademe. (CONAGUA, 2019)

Metal o aleación	Composición nominal	Costo relativo	Aplicaciones
Monel	70 % níquel 30 % cobre	1.5	Altos contenidos de cloruro de sodio combinado con oxígeno disuelto. No se utiliza generalmente en agua subterránea potable.
Acero Inoxidable	74 % acero 18 % cromo 8 % níquel	1.0	Presencia de Sulfuro de Hidrógeno, Oxígeno disuelto, Bióxido de carbono. Bacterias ferruginosas. Alta resistencia mecánica.
Everdur	96 % cobre 3 % sílice 1 % manganeso	1.0	Aguas de alta dureza total, alto cloruro de sodio, sin oxígeno disuelto, alto contenido de hierro. Muy resistente a los tratamientos con ácido.
Bronce Rojo al Silicio	83 % cobre 16 % zinc 1 por ciento sílice	0.9	Condiciones similares a las del EVERDUR, pero inferior en calidad y resistencia.
Hierro Armco	99.84 % hierro puro con doble galvanizado	0.6	No es resistente a una corrosión intensa. Se utiliza para pozos agrícolas en zonas de aguas relativamente neutras.
Acero	99.35-99.72 % hierro 0.09-0.15 % carbono 0.2-0.5 % manganeso (doble galvanizado)	0.5	No es resistente a la corrosión, por lo que en países desarrollados se emplea básicamente en pozos de prueba o de drenaje. No obstante puede alcanzar una larga vida útil si las aguas no son corrosivas ni incrustantes.

3.6.3 Ademes PVC

Los ademes fabricados con P.V.C. suelen montarse utilizando uniones tipo campana y espiga junto con limpiador y adhesivo, o bien mediante un cople que también se fija aplicando limpiador y pegamento. En ambos métodos se logra una conexión firme, con una resistencia igual o incluso superior a la del propio tubo. (CONAGUA, 2019)

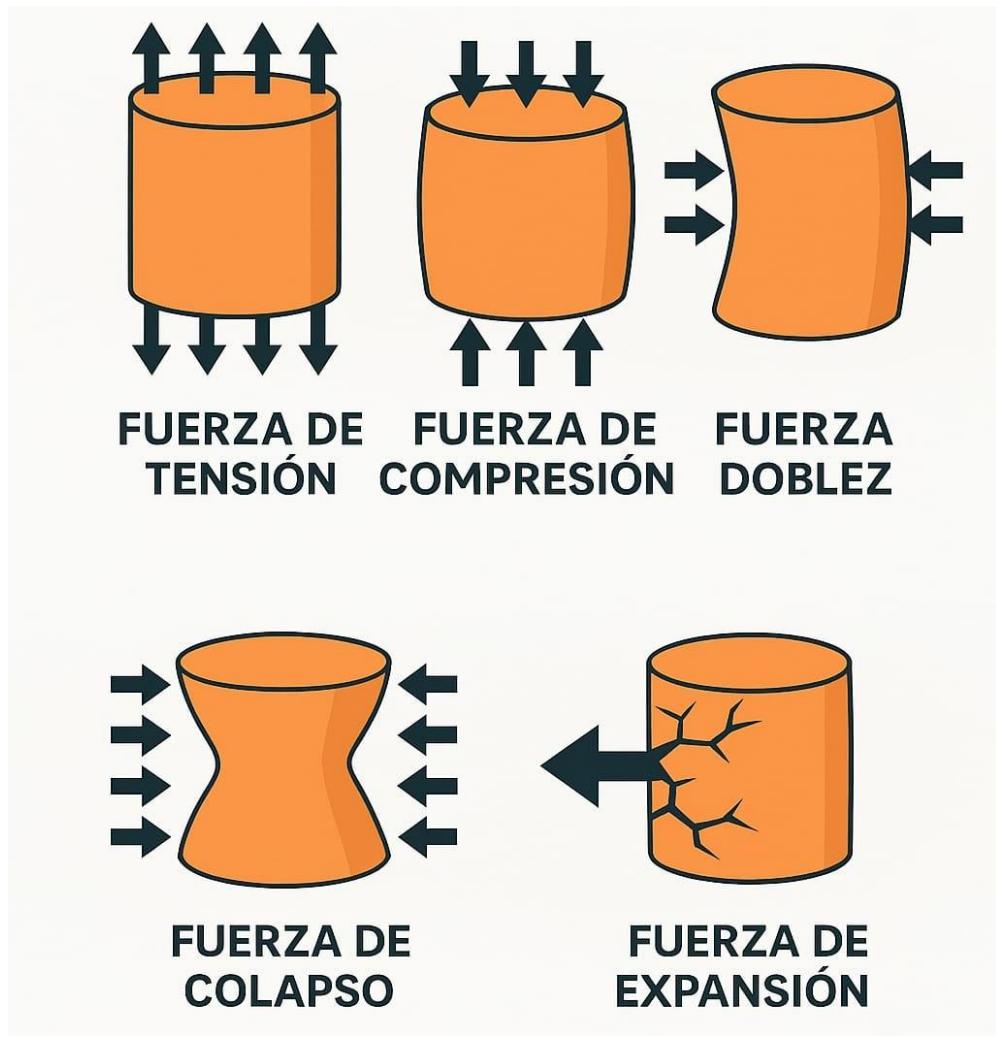


Figura 9.- Principales afectaciones en ademes.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se enfoca en el análisis integral de las variables más representativas e influyentes en la dinámica hidrológica e hidrogeológica del acuífero Lagunas 1449, dado que este sistema subterráneo abarca parte del municipio de Sayula, una zona en la cual se han identificado problemas recurrentes relacionados con el colapso o movimiento inadecuado en los ademes de pozos profundos. Estos fenómenos requieren un entendimiento preciso de las condiciones geohidrológicas que los provocan, por lo cual la investigación adopta un enfoque metodológico multidisciplinario, apoyado principalmente en herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

4.1 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área geográfica de interés corresponde al polígono del acuífero Lagunas 1449, cuyas coordenadas espaciales se establecen conforme a los datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) y la información hidrológica oficial del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la CONAGUA. Este polígono incluye diversos municipios, con un énfasis particular en el municipio de Sayula, donde se localizan las problemáticas en los pozos a analizar.

Tabla 3.- Vértices de la poligonal acuífero Lagunas 1449. (CONAGUA, 2024).

VERTICE	OESTE (X)			NORTE (Y)		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	103	10	17.6	19	59	4.9
2	103	15	15.3	19	57	8.9
3	103	16	14.4	19	56	25.1
4	103	21	29.4	19	58	6.5
5	103	26	1.7	20	2	33.4
6	103	28	31.1	20	0	52
7	103	29	45.9	19	58	1.2
8	103	30	7.2	19	56	57.1
9	103	29	29.9	19	53	44.9
10	103	28	52.5	19	52	8.8
11	103	31	11.3	19	49	1.9
12	103	34	7.5	19	47	25.8
13	103	36	42.3	19	46	32.5
14	103	41	30.6	19	50	6
15	103	41	41.3	19	55	53
16	103	39	59.8	20	2	38.8
17	103	37	25	20	3	42.8
18	103	37	35.7	20	5	13.6
19	103	40	5.2	20	7	37.7
20	103	40	15.9	20	10	17.9
21	103	42	45.3	20	14	23.5
22	103	41	30.6	20	15	43.6
23	103	40	53.2	20	20	58.6
24	103	43	6.7	20	23	33.4
25	103	42	2.6	20	24	58.6
26	103	43	12	20	26	40.2
27	103	42	29.6	20	28	41.1
28	103	40	48.8	20	27	49.1
29	103	40	29	20	26	54.1
30	103	36	41.1	20	28	19.7
31	103	35	36.9	20	29	2.5
32	103	35	6.4	20	28	59.4
33	103	35	9.4	20	27	36.9
34	103	32	15.2	20	24	54.9
35	103	30	28.2	20	24	15.1
36	103	32	12.1	20	23	56.8
37	103	33	1	20	22	12.8
38	103	30	49.6	20	18	29.7
39	103	29	42.3	20	17	37.7
40	103	27	9.5	20	14	25.1
41	103	25	46.9	20	12	19.8
42	103	23	23.2	20	11	0.3
43	103	22	0.7	20	9	53
44	103	18	20.6	20	10	20.5
45	103	16	27.5	20	9	50
46	103	15	8	20	8	48.8
47	103	12	44.3	20	8	15.2
48	103	11	55.4	20	7	56.9
49	103	13	27	20	6	34.3
50	103	12	4.6	20	4	47.3
51	103	13	8.8	20	1	1.1
52	103	10	29.8	20	0	27.5
1	103	10	17.6	19	59	4.9

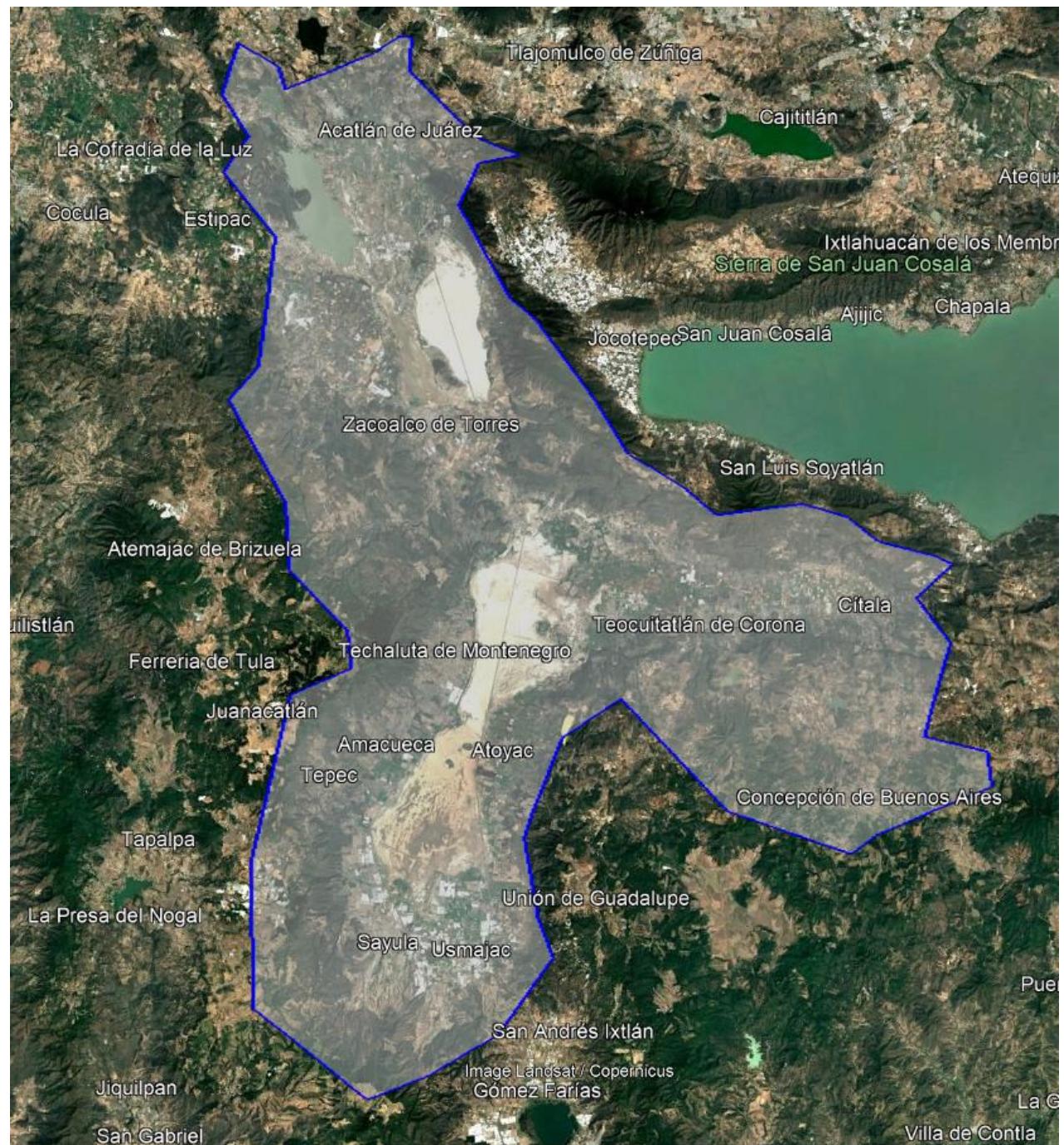


Figura 10.- Delimitación del acuífero

Dichas coordenadas fueron procesadas en el software ArcGIS® versión 10.4.1 de ESRI para así poder obtener el polígono correspondiente al acuífero y así posteriormente analizar distintas capas de diferentes condiciones.

4.2 UBICACIÓN DEL EJIDO “EMILIANO ZAPATA”

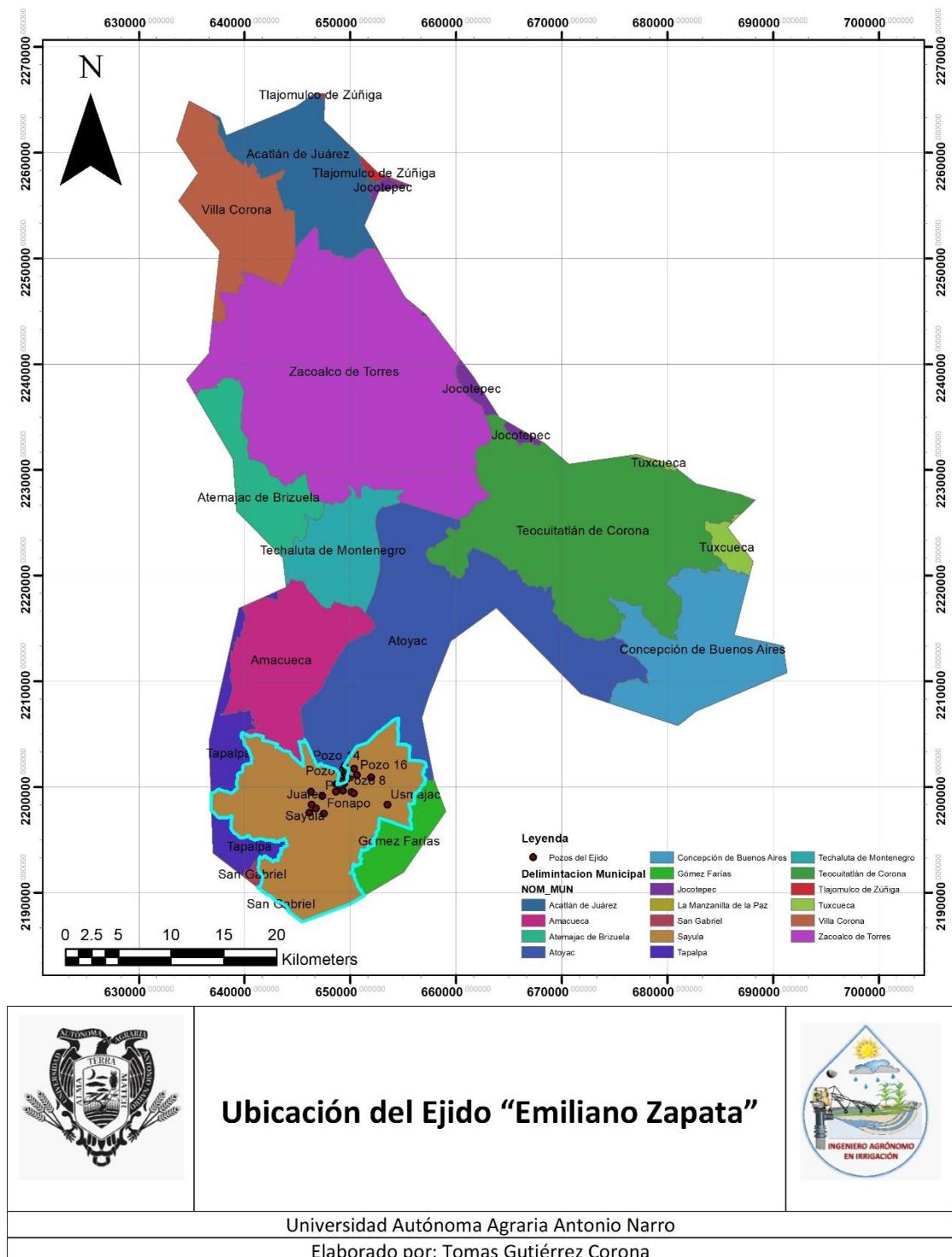


Figura 11.- Ubicación Ejido “Emiliano Zapata”. (INEGI, 2018)

El Ejido Emiliano Zapata se localiza en la parte sur del municipio de Sayula, en el estado de Jalisco, México, dentro de la región conocida como Sur de Jalisco. Se encuentra aproximadamente a 5 kilómetros al sur de la cabecera municipal de Sayula, con acceso a través de caminos rurales que conectan directamente con la red carretera regional que enlaza a Sayula con los municipios de Amacueca y Zapotlán el Grande. Este emplazamiento facilita la movilidad de bienes y servicios, así como la interacción económica con los centros urbanos de la región. Tribunal Superior Agrario (1995)

Geográficamente, el ejido se ubica dentro del ámbito estructural del Eje Neovolcánico, y específicamente en la zona de transición entre el valle de Sayula y el graben Zacoalco-Colima. Esta depresión tectónica de origen extensional influye directamente en la morfología del terreno, la dinámica de fallas geológicas y el comportamiento hidrogeológico regional. Debido a ello, el relieve del ejido es predominantemente plano a ligeramente ondulado, con elevaciones alrededor de 1 360 msnm, lo que favorece el desarrollo de actividades agropecuarias.

4.2.1 Actividades económicas primarias

El Ejido Emiliano Zapata se caracteriza por una economía basada principalmente en actividades agropecuarias, las cuales son determinantes para el sustento local y para el aprovechamiento del territorio.

- Agricultura:

La agricultura es la actividad predominante dentro del ejido. Entre los cultivos más comunes se encuentran el maíz, frijol, calabaza, trigo, sorgo y avena forrajera, que

se destinan tanto al autoconsumo como al mercado local. En áreas con disponibilidad de agua subterránea mediante pozos profundos, también se desarrollan cultivos de mayor demanda hídrica, incluyendo forrajes verdes utilizados para la ganadería regional. La topografía plana y la fertilidad del suelo del valle favorecen estas prácticas.

- Ganadería:

La ganadería constituye la segunda actividad primaria en importancia. Predomina la cría y engorda de bovinos, complementada con la producción de ovinos, caprinos y porcinos, así como con la explotación de aves de corral a pequeña escala. La presencia de pastizales inducidos y parcelas destinadas al cultivo de forrajes sostiene estas actividades, que forman parte esencial de la economía rural del ejido. (Jalisco, 2021).

4.3 PIEZOMETRÍA

Una parte esencial es el análisis de los niveles estáticos actuales del acuífero, obtenidos a través de sondeos y mediciones en pozos seleccionados estratégicamente dentro del acuífero. Estos datos se contrastan con registros históricos provenientes de estudios piezométricos realizados en años anteriores, con el objetivo de identificar tendencias en el abatimiento del nivel freático, presiones hidrostáticas o modificaciones del comportamiento del flujo subterráneo.

Esta comparación permite inferir si existe un proceso de sobreexplotación, subsidencia del terreno o modificaciones estructurales que pudieran estar provocando esfuerzos mecánicos anómalos en los ademes de los pozos.



Figura 12.- Medición de nivel estático.

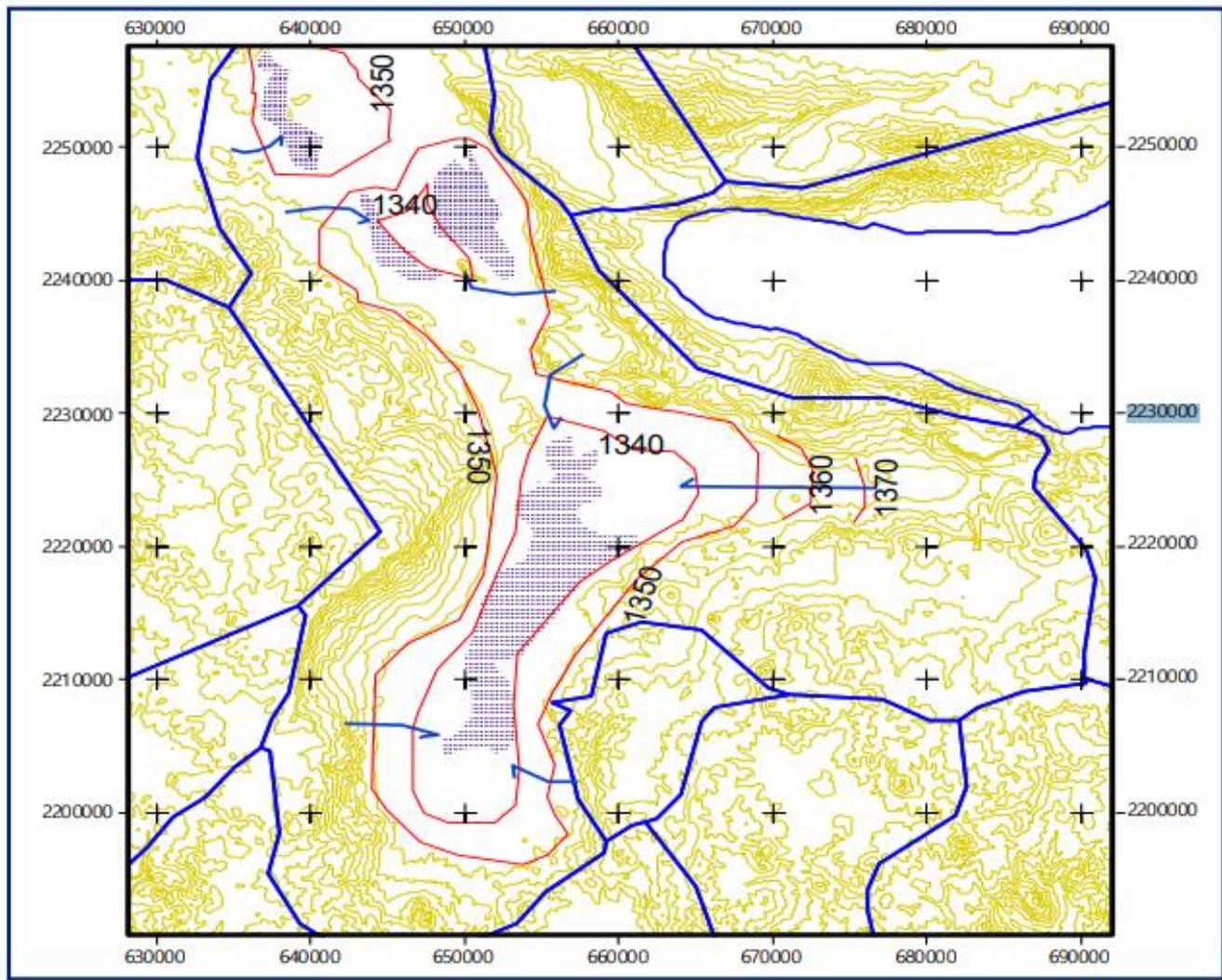


Figura 13.- Elevación del nivel estático en msnm de 1998. (CONAGUA, 2024)

4.4 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN ESPACIAL CON SIG

Para entender de forma integral el comportamiento del acuífero y sus variables relacionadas, se utilizó el software ArcGIS®, el cual permitió compilar, procesar y analizar una serie de capas temáticas esenciales para este estudio. A continuación, se detallan las principales variables cartográficas consideradas:

- Modelo Digital de Elevación (MDE) y curvas de nivel

Se obtuvo un Modelo Digital de Elevación de INEGI (2013) para visualizar la topografía y generar curvas de nivel a intervalos regulares. Este modelo permitió analizar la morfología del terreno y la pendiente del área de estudio, información esencial para la comprensión de la dinámica superficial y potencial influencia sobre el acuífero.

- Provincias fisiográficas

Se descargó la capa de provincias fisiográficas de INEGI (2001) para delimitar las unidades geomorfológicas presentes en la zona de estudio. Esta información fue integrada en el SIG y visualizada para su uso en análisis posteriores, manteniendo los atributos originales.

- Climatología

Se revisaron mapas climáticos disponibles en CONABIO (2008) para identificar los tipos de clima presentes en el área. La información fue digitalizada y etiquetada según la clasificación oficial de Köppen modificado, y luego integrada en el SIG para su consulta y análisis espacial.

- Hidrogeología

Se consultaron mapas hidrogeológicos provenientes de INEGI (2008), con el fin de reconocer las unidades del subsuelo según su litología y permeabilidad. Las capas se recortaron al área de estudio y se prepararon para su integración con otras variables temáticas dentro del SIG.

- Precipitación

Se descargaron mapas de precipitación anual de CONABIO (2008) los cuales fueron incorporados al SIG para analizar la distribución espacial de los rangos de precipitación dentro del área de estudio.

- Geología

Se obtuvieron mapas geológicos del área de estudio a partir de INEGI (2020). Las capas geológicas fueron integradas en ArcGIS® para visualizar la distribución de formaciones volcánicas, depósitos lacustres, aluviales y brechas volcánicas, manteniendo los atributos proporcionados por las fuentes originales.

- Uso de suelo y cobertura vegetal

Se recopilaron datos de uso de suelo y cobertura vegetal de INEGI (2024). Las capas fueron incorporadas al SIG para examinar la distribución de actividades agrícolas, asentamientos humanos, vegetación secundaria, bosques y zonas urbanas.

- Edafología

Se consultaron mapas edafológicos de INEGI (2024), para identificar los tipos de suelo predominantes en el área, tales como Feozem háplico, Vertisol, Andosol y Cambisol. Los datos fueron integrados en ArcGIS para su análisis en conjunto con otras variables ambientales.

- Evapotranspiración

Se obtuvieron mapas de evapotranspiración potencial de INEGI (2008) y se integraron en el SIG para visualizar los rangos y la distribución espacial de este parámetro, considerando su relevancia para futuros análisis del balance hídrico.

- Cuerpos de agua

Se descargaron capas de lagos, lagunas y otros cuerpos de agua del área de estudio de CONABIO (2022), incluyendo Sayula, Zacoalco, San Marcos y Atotonilco. Estas capas fueron incorporadas al SIG para examinar la ubicación y extensión de los cuerpos de agua en relación con otras variables hidrogeológicas.

4.5 VALIDACIÓN Y REVISIÓN DE CAMPO

Como parte de la metodología, se contempló la verificación de algunos puntos clave mediante recorridos de campo, tanto para confirmar condiciones del terreno, uso de suelo actual, y condiciones estructurales de pozos observados. Esta etapa también ayuda a validar la precisión del análisis SIG frente a las condiciones reales.



Figura 14.- Recortes que se han hecho en el ademe de un pozo.



Figura 15.- Maniobra de recorte de ademe con gato hidráulico.

En la figura 12 se muestran los recortes hechos al ademe de un pozo, en este caso la estructura es de 12" de diámetro y los recortes mostrados se han hecho desde el año 2012 que se comenzó con la operación del pozo hasta la actualidad. Los recortes tienen en total una longitud de 28" que se han realizado en 4 intervenciones, es decir que hasta el momento en promedio la expulsión correspondiente es de 2.15" por año.

Para realizar estos recortes se lleva a cabo una maniobra (figura 13) que consiste en levantar con un gato de 32 toneladas y desde el tren de descarga toda la columna de bombeo cargada junto con la bomba para así dejar libre el ademe y poder proceder a

hacer el recorte con una pulidora hasta el nivel adecuado para trabajar óptimamente el pozo con el equipo de bombeo. Cabe destacar que en este caso la longitud total del ademe es de 100 metros que también corresponde a la longitud total del pozo.

Este tipo de intervención es fundamental para garantizar la funcionalidad y seguridad del sistema de captación, así como para prolongar la vida útil del ademe en condiciones operativas exigentes.



Figura 16.- Arena extraída por los pozos

En ocasiones se observa que los algunos pozos en esta área tienden a sacar arena en diferentes cantidades cada uno y variando esta cantidad por pozo cada determinado tiempo. Dicha arena fina queda visible ya que el sistema de riego que se maneja en algunos de los terrenos es por aspersión manual, quedando montículos de arena en las uniones de cada tubo de aluminio.

5. RESULTADOS

5.1 CURVAS A NIVEL

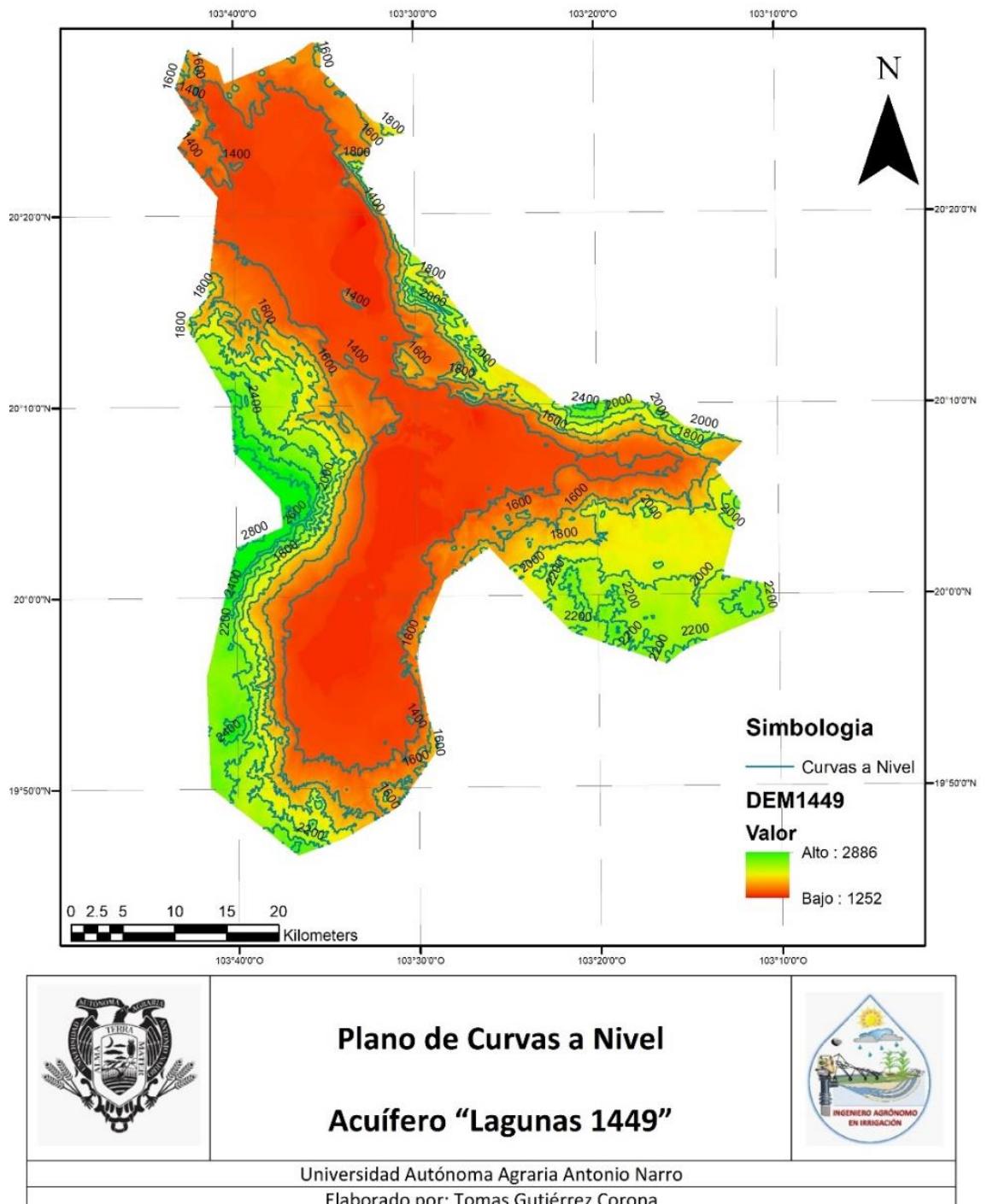


Figura 17.- Plano Curvas a Nivel. (INEGI, 2013)

La imagen representa la distribución del relieve en el área del acuífero Lagunas 1449 mediante curvas de nivel y un modelo digital de elevación. A través de estas se puede interpretar la morfología del terreno, identificando zonas altas (ubicadas en su mayor parte del lado este de la zona de estudio) y bajas (en las partes centrales al acuífero), pendientes y posibles rutas de escurrimiento superficial. Las áreas más elevadas indican posibles zonas de recarga, mientras que las más bajas corresponden a zonas de descarga. Esta información es clave para entender el comportamiento hidrológico y geológico del acuífero, apoyar la planificación del uso del agua y orientar la ubicación de obras hidráulicas o pozos.

5.2 EDAFOLOGÍA

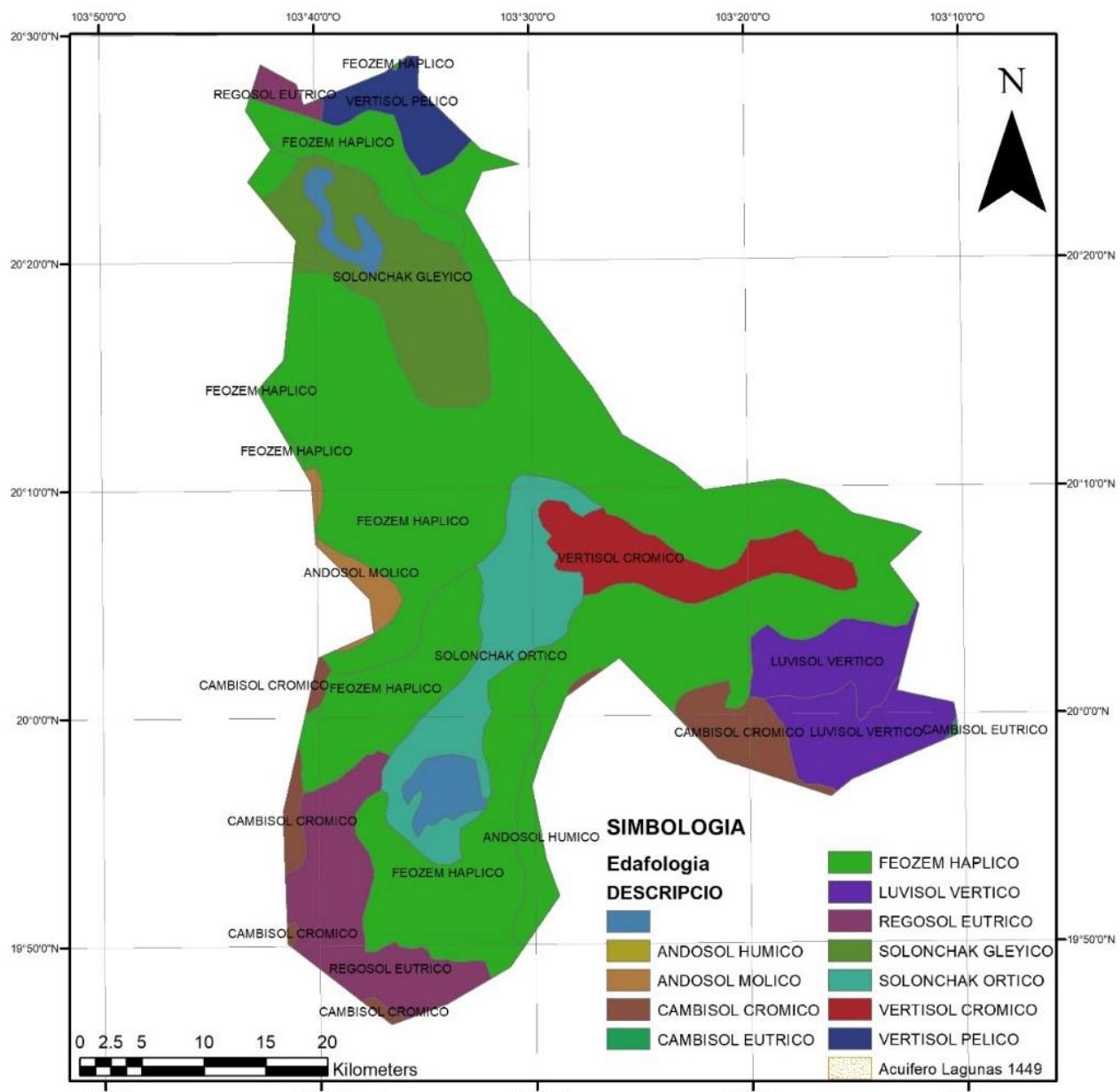


Figura 18.- Plano de Edafología. (INEGI, 2024)

Este plano muestra la distribución espacial de los tipos de suelos presentes en el área del acuífero Lagunas 1449. Su propósito principal es identificar las características edáficas que influyen directamente en el comportamiento hidrológico del acuífero, como la capacidad de infiltración, retención de agua, permeabilidad y drenaje.

Se observa que predominan suelos del tipo Feozem háplico, caracterizados por ser fértiles, con buena estructura y alta capacidad de retención de humedad, lo que favorece la recarga del acuífero y el desarrollo agrícola. También se identifican suelos Vertisoles, que tienen alto contenido de arcilla expansiva y tienden a presentar problemas de drenaje, lo cual puede limitar la infiltración, aunque pueden almacenar grandes volúmenes de agua.

En ciertas zonas se encuentran Solonchak y Luvisoles, que indican la presencia de suelos salinos o con acumulación de arcillas en el subsuelo. Estos suelos pueden dificultar el paso del agua hacia horizontes más profundos, actuando como barreras a la recarga natural del acuífero. Por otro lado, la presencia de Regosoles y Cambisoles revela suelos poco evolucionados y de origen volcánico o aluvial, en donde la infiltración puede ser más rápida, dependiendo del grado de compactación y pendiente.

5.3 CLIMAS

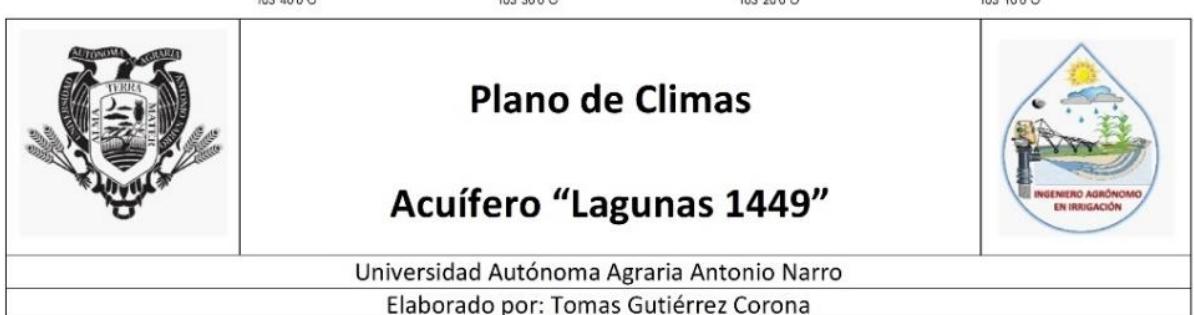
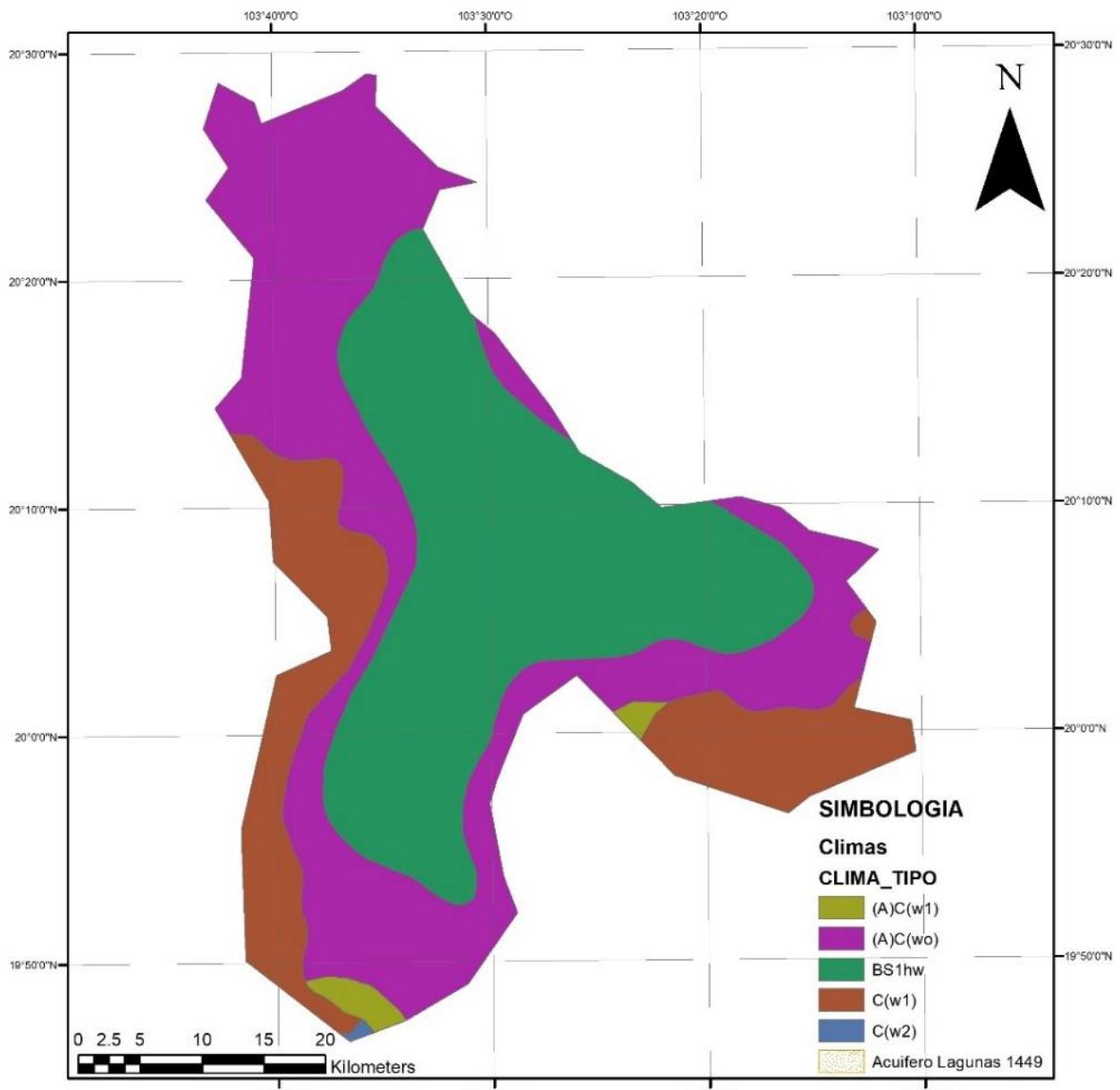


Figura 19.- Plano de Climas. (CONABIO, 2008)

La imagen representa la distribución espacial de los tipos de clima en el área del acuífero Lagunas 1449 mediante una clasificación climática codificada y diferenciada por colores. Esta zonificación se basa en criterios climáticos como temperatura, precipitación y estacionalidad de las lluvias, y se apoya en la cartografía temática sobre coordenadas geográficas. A través de esta representación se pueden identificar las variaciones climáticas dentro del acuífero, lo cual permite inferir la influencia del clima sobre procesos hidrológicos como la evaporación, la infiltración y la disponibilidad de agua para recarga del acuífero. Las regiones con climas subhúmedos ((A)C(w1) y C(w1)) pueden presentar mayores tasas de infiltración, favoreciendo la recarga natural, mientras que las zonas con clima seco (BS1hw) podrían estar asociadas a escasa precipitación y alta evaporación, limitando la disponibilidad hídrica superficial y subterránea.

5.4 HIDROGEOLOGÍA

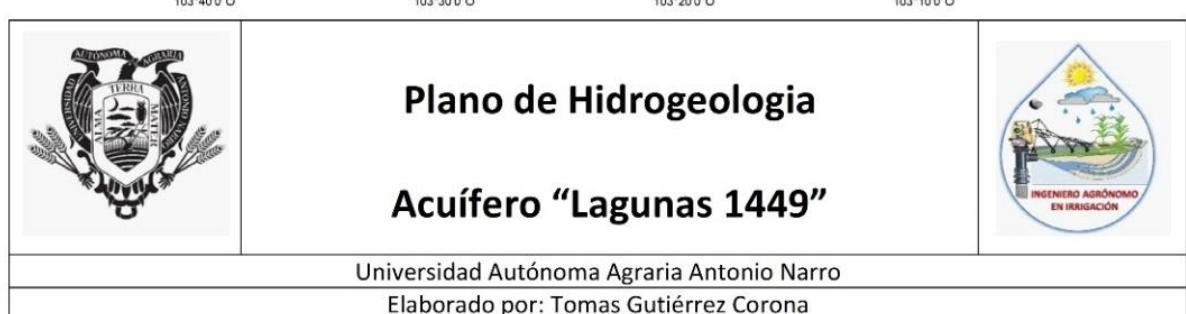
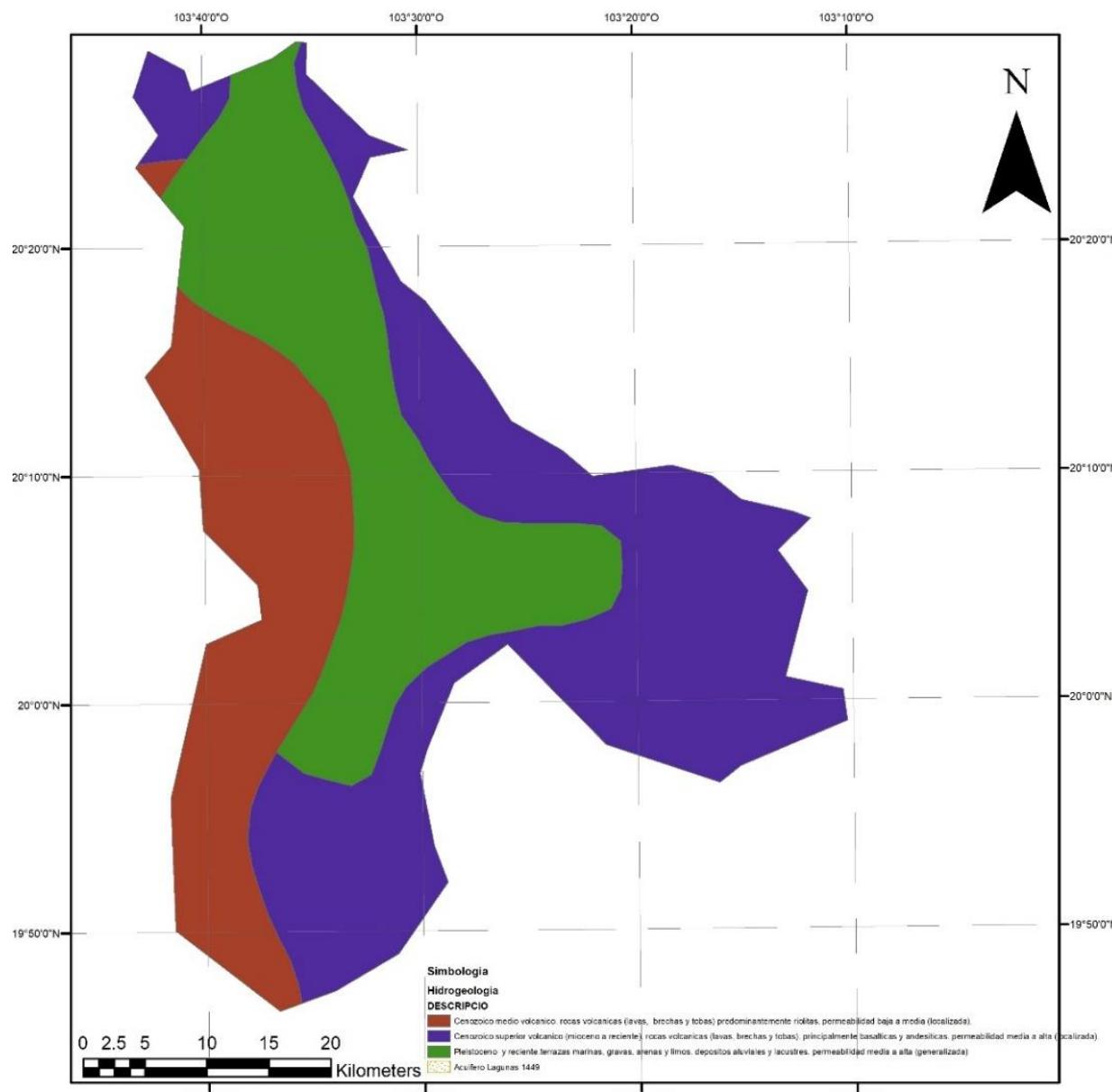


Figura 20.- Plano de Hidrogeología. (CONABIO, 2008)

El plano muestra la distribución hidrogeológica del acuífero Lagunas 1449, clasificando el área en función del tipo de material geológico y su permeabilidad, es decir, su capacidad para permitir el flujo y almacenamiento del agua subterránea.

Se identifican principalmente tres unidades hidrogeológicas:

- Formaciones volcánicas del Cenozoico medio a reciente, que incluyen brechas, lavas y tobas. Estas unidades presentan permeabilidad baja a media, con circulación subterránea localizada, lo que limita su capacidad como reservorios de agua.
- Depósitos aluviales, lacustres y piroclásticos no consolidados, conformados por gravas, arenas, limos y cenizas. Estas formaciones tienen una permeabilidad media a alta, lo que las convierte en las zonas más favorables para la recarga y explotación del acuífero.
- Rocas volcánicas basálticas y andesíticas fracturadas, que pueden actuar como acuíferos fisurados, permitiendo el almacenamiento y movimiento del agua en las fracturas, con comportamiento variable dependiendo del grado de fracturamiento y compactación.

5.5 PRECIPITACIÓN

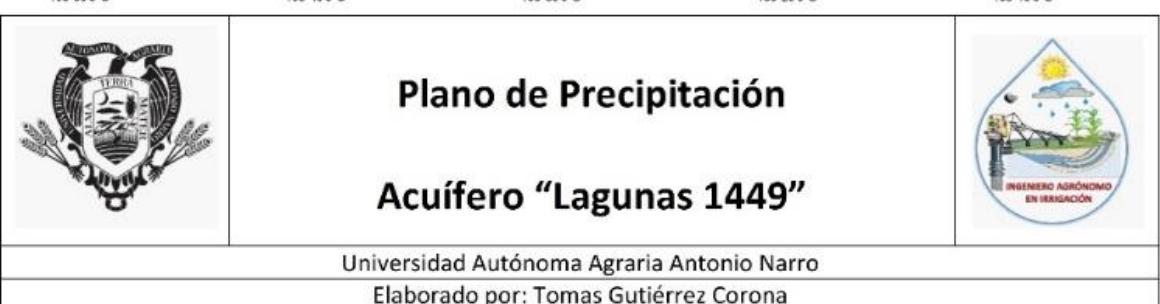
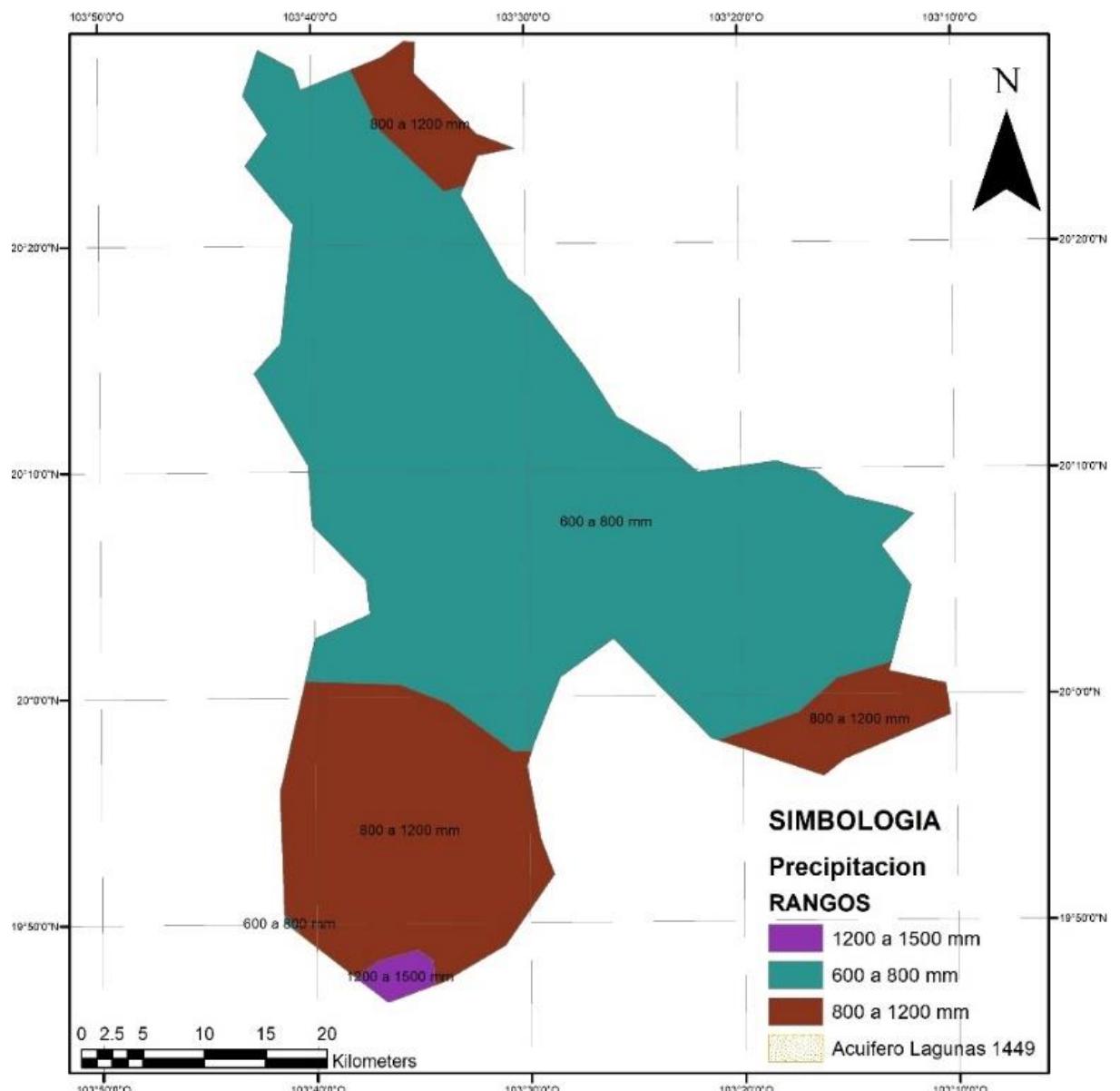


Figura 21.- Plano de Precipitación. (CONABIO, 2008)

Este plano muestra la distribución espacial de la precipitación anual en el área correspondiente al acuífero Lagunas 1449, con el propósito principal de identificar las zonas con mayor o menor disponibilidad hídrica natural, lo cual influye directamente en la recarga del acuífero, la gestión agrícola y la planificación del uso del suelo.

Se observan tres rangos principales de precipitación en el área de estudio:

- La mayor parte del acuífero se encuentra en la categoría de 600 a 800 mm anuales, lo que indica un régimen semiárido, con disponibilidad hídrica limitada y necesidad de un manejo eficiente del recurso, tanto para uso agrícola como para abastecimiento humano.
- En las zonas del noroeste, sureste y suroeste se identifican áreas con precipitación entre 800 y 1200 mm, lo cual representa una mejor condición para la recarga natural, especialmente si coincide con suelos de buena permeabilidad.
- Una pequeña franja en el extremo sur presenta valores de 1200 a 1500 mm, lo que representa el mayor potencial de recarga del acuífero, siempre y cuando las condiciones edáficas y topográficas lo permitan.

Este patrón de precipitación desigual sugiere que el acuífero tiene zonas prioritarias para conservación, particularmente donde se combinan altos niveles de precipitación con suelos favorables para la infiltración. Por el contrario, las áreas con menor precipitación pueden requerir estrategias de captación de agua de lluvia, tecnificación del riego y protección contra la sobreexplotación del acuífero.

5.6 USOS DE SUELO Y VEGETACIÓN

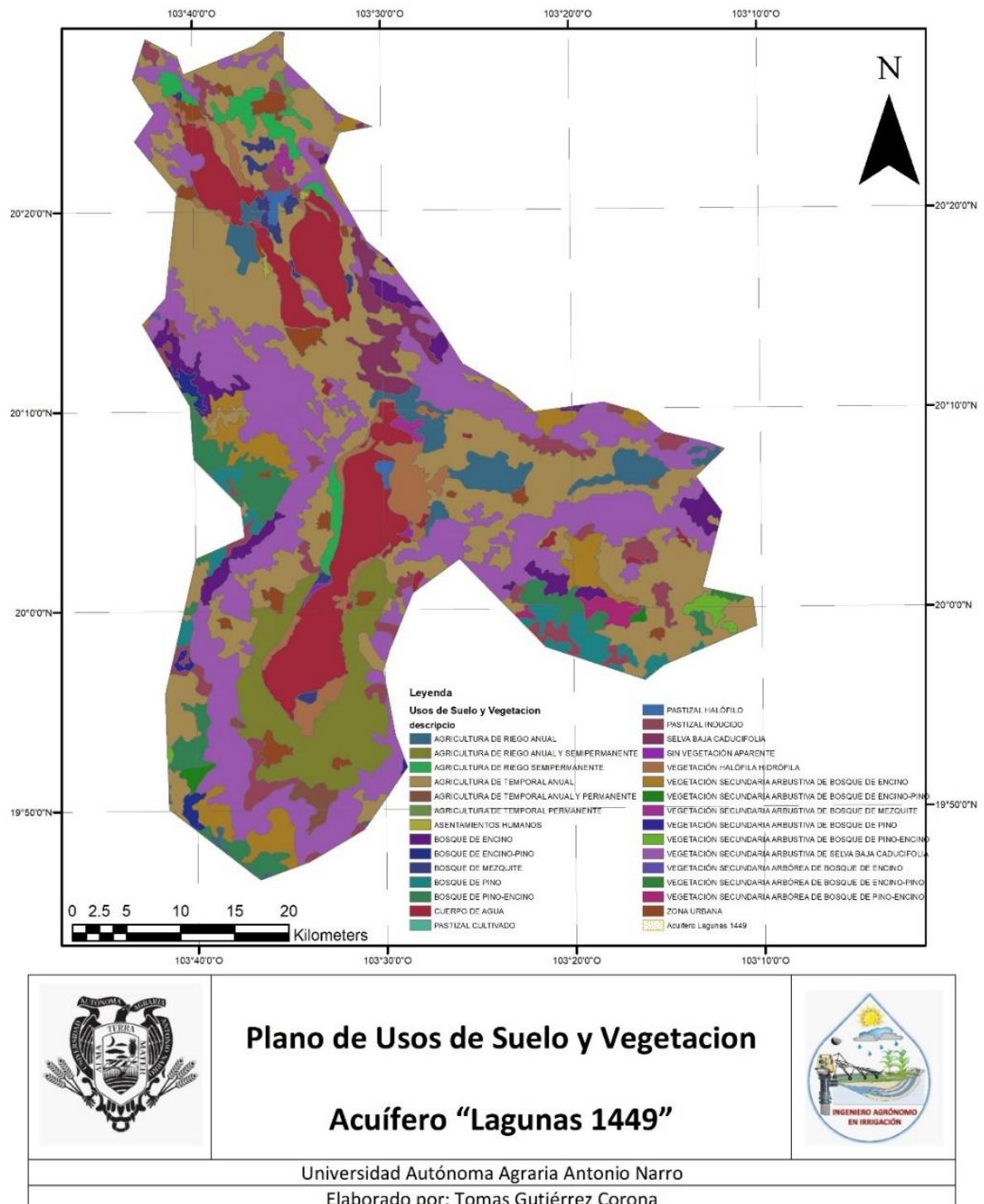


Figura 22.- Plano de Usos de Suelo y Vegetación. (INEGI, 2024)

Este plano muestra la distribución espacial de los usos del suelo y tipos de vegetación presentes en el área del acuífero Lagunas 1449, con el objetivo de identificar las actividades antrópicas y coberturas vegetales que influyen en los procesos de recarga hídrica, conservación ambiental y presión sobre el recurso acuífero.

El análisis cartográfico revela una gran diversidad de coberturas y usos, predominando los siguientes:

- Agricultura de temporal y de riego en distintas modalidades (anual, perenne y mixta), que ocupan extensas áreas del centro y sur del acuífero. Estas zonas representan una fuerte demanda de agua, especialmente en regiones de riego, lo cual puede incrementar la extracción del acuífero si no se gestiona de manera sustentable.
- Pastizales cultivados, inducidos y halófilos, distribuidos en áreas donde la actividad ganadera es significativa. Los pastizales halófilos, en particular, indican suelos con cierta salinidad, lo cual puede estar relacionado con condiciones edáficas limitantes o con prácticas de manejo inadecuadas.
- Zonas de vegetación secundaria arbustiva y arbórea, asociadas principalmente a antiguos terrenos agrícolas o forestales en proceso de recuperación. Estas áreas pueden favorecer procesos de recarga si se mantienen con cobertura permanente, aunque su capacidad depende del tipo de suelo y del uso previo.
- Bosques naturales como el bosque de encino, pino, mezquite y sus combinaciones, que se encuentran principalmente en zonas elevadas y de difícil acceso. Estas zonas tienen un valor ecológico alto y son clave para la protección de cuencas y la infiltración de agua hacia el acuífero.

- También se identifican selvas bajas caducifolias y zonas urbanas, aunque en menor proporción. Las áreas urbanizadas, si no están adecuadamente planificadas, pueden limitar la recarga y generar contaminación difusa hacia el acuífero.

5.7 CUERPOS DE AGUA

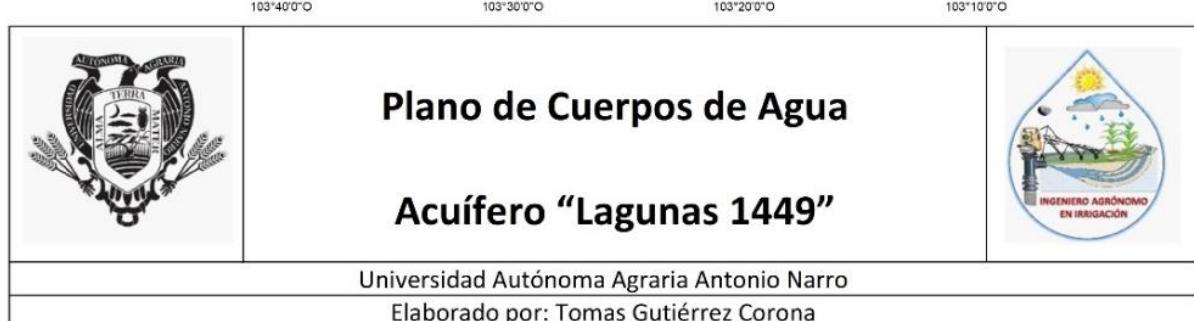
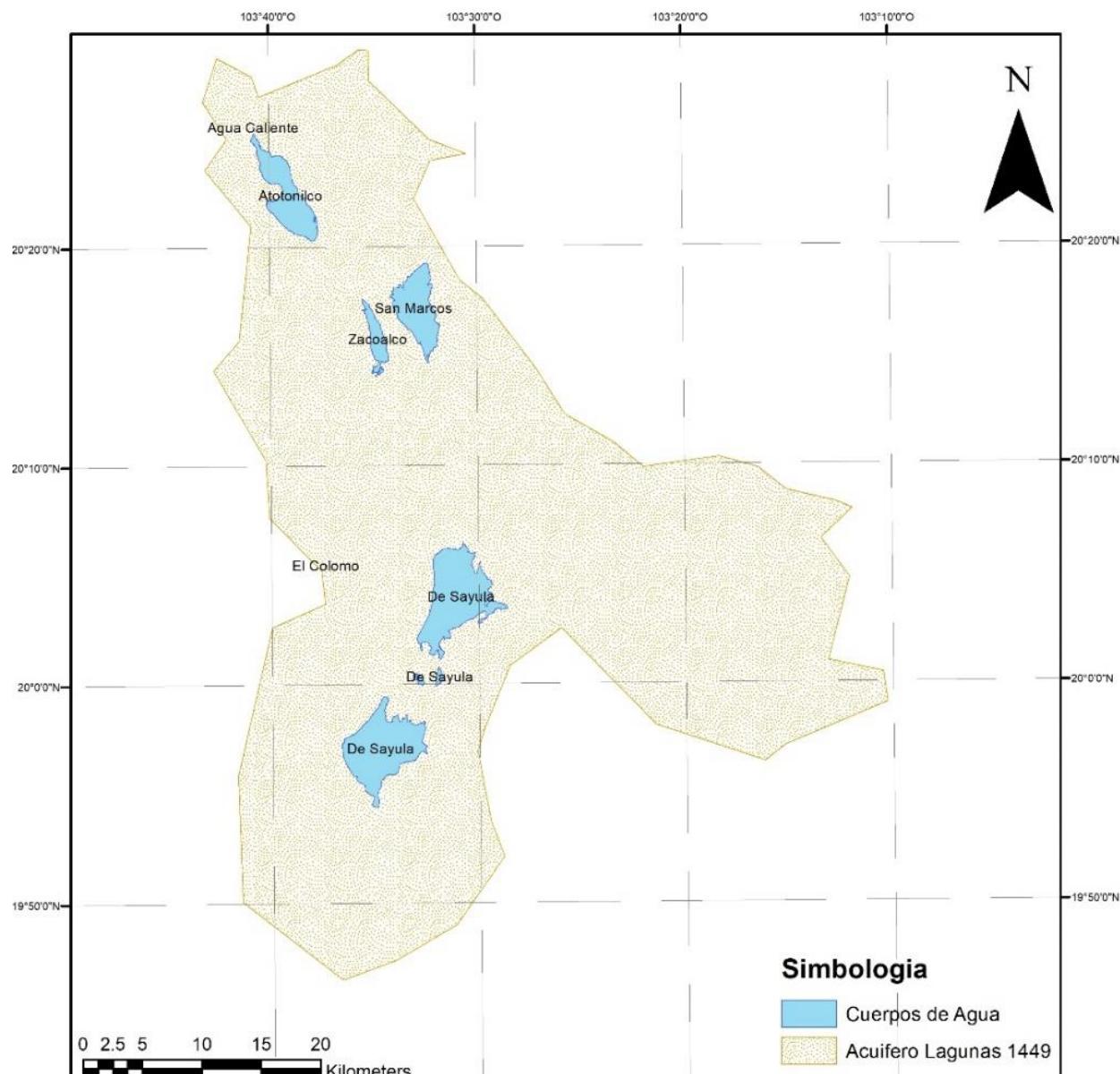


Figura 23.- Plano de Cuerpos de Agua. (CONABIO, 2022)

El presente plano muestra la localización y distribución de los cuerpos de agua superficiales en el área del acuífero Lagunas 1449, con el objetivo de identificar las fuentes hídricas naturales y artificiales que pueden influir en la recarga del acuífero, el equilibrio ecológico y el abastecimiento regional.

Los cuerpos de agua están representados en color azul claro y se ubican dentro del polígono delimitado del acuífero, permitiendo observar su relación espacial con el sistema acuífero.

Cabe resaltar que estos cuerpos de agua son temporales, ya que dependen en su temporal que se haya hecho presente año con año dentro de la zona correspondiente al acuífero.

Los principales cuerpos de agua identificados son:

- Lago de Sayula (en el sur del acuífero): Es el cuerpo de agua más extenso y representa un punto clave para el almacenamiento superficial, además de ser un referente ecológico importante en la región. Se identifican varias divisiones del mismo cuerpo bajo el nombre “De Sayula”.
- Lago de San Marcos y Zacoalco (zona centro-norte): De tamaño intermedio, con posible aporte a la recarga del acuífero en temporadas de lluvia, dependiendo de las condiciones hidrogeológicas locales.
- Lagunas de Atotonilco y Agua Caliente (al norte del acuífero): Cuerpos más pequeños, pero de relevancia local para comunidades cercanas y potenciales ecosistemas asociados.
- Cuerpo de agua El Colomo (al suroeste): También de menor tamaño, pero su ubicación estratégica puede influir en la recarga de acuíferos poco profundos y en la humedad superficial del suelo circundante.

Este plano resulta de gran utilidad para la planeación hídrica, ya que permite identificar zonas con mayor disponibilidad superficial de agua, lo cual influye directamente en la dinámica de recarga, extracción y conservación del acuífero. Además, la relación espacial entre los cuerpos de agua y el acuífero brinda información valiosa para establecer estrategias de protección de fuentes hídricas, manejo de cuencas y planificación de infraestructura hidráulica sostenible.

5.8 PROVINCIAS FISIOGRÁFICAS

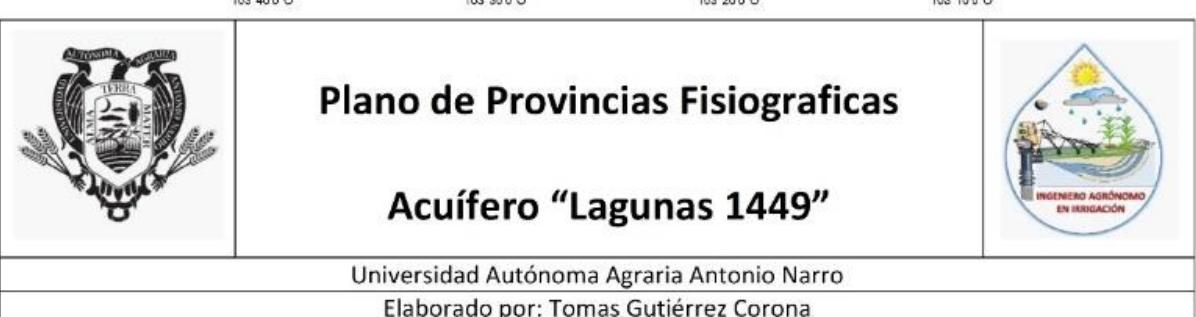
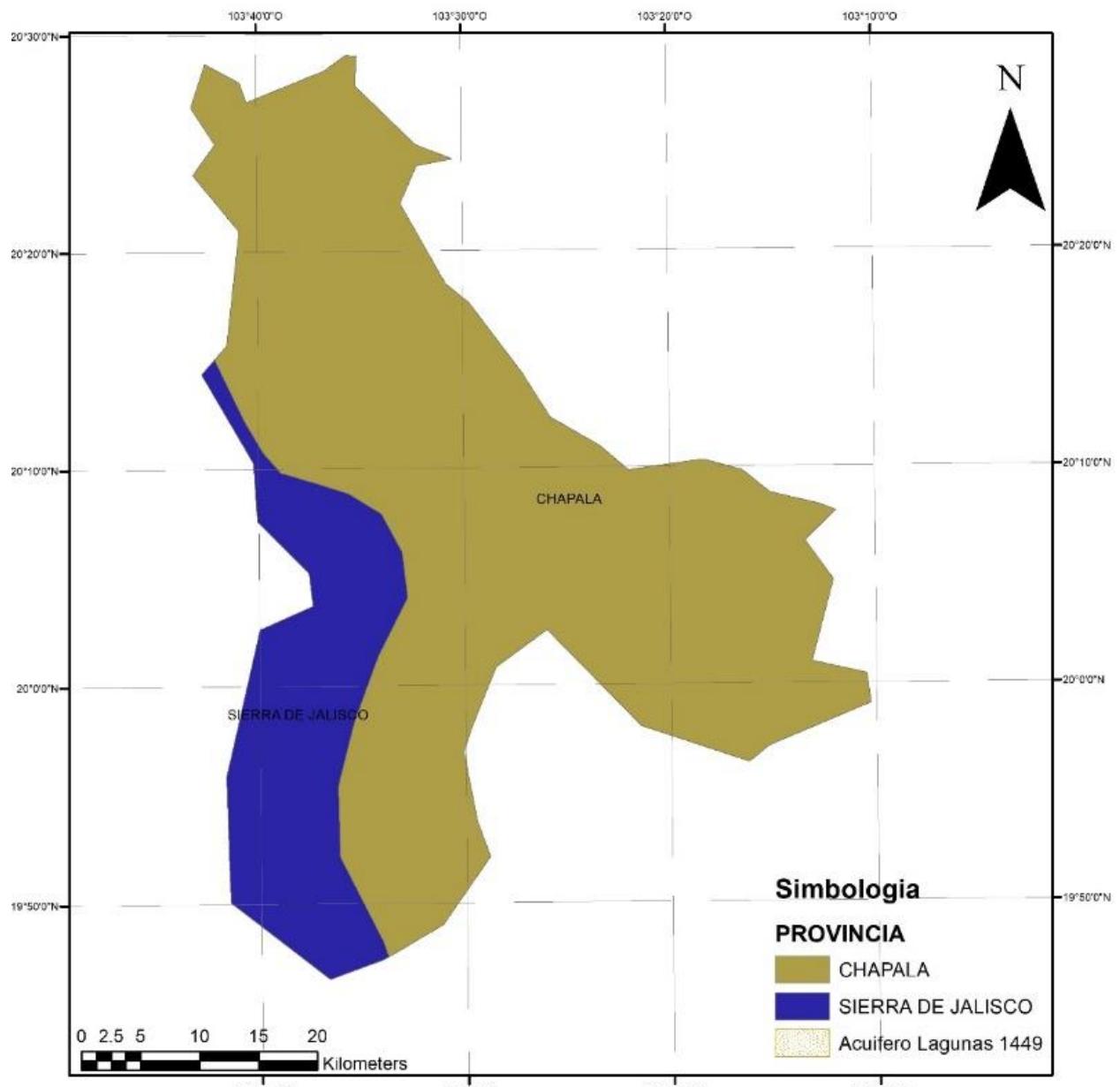


Figura 24.- Plano de Provincias Fisiográficas. (INEGI, 2001)

Este plano muestra la división fisiográfica del territorio correspondiente al acuífero Lagunas 1449, con el objetivo de identificar las características geomorfológicas que influyen directamente en procesos como la infiltración de agua, escurrimiento superficial, erosión, y recarga del acuífero.

El área del acuífero se encuentra comprendida dentro de dos provincias fisiográficas principales:

- Provincia Chapala:

Ocupa la mayor parte del acuífero. Se caracteriza por una topografía predominantemente plana a suavemente ondulada, con altiplanicies y valles de origen tectónico y volcánico. Estas condiciones favorecen el almacenamiento superficial de agua y la infiltración hacia acuíferos, especialmente en zonas con suelos permeables y coberturas vegetales adecuadas. La provincia de Chapala se asocia con procesos geológicos recientes y suelos fértiles, lo cual también promueve el desarrollo agrícola.

- Provincia Sierra de Jalisco:

Ubicada en la parte suroeste del acuífero. Esta zona se caracteriza por su relieve montañoso, laderas escarpadas y presencia de rocas ígneas y metamórficas. Estas condiciones dificultan la infiltración directa, aunque actúan como zonas de recarga indirecta mediante escurrimientos hacia las partes bajas. Además, estas áreas presentan alta vulnerabilidad a la erosión, por lo que es importante mantener la cobertura forestal o vegetación secundaria para su conservación.

5.9 EVAPOTRANSPIRACIÓN

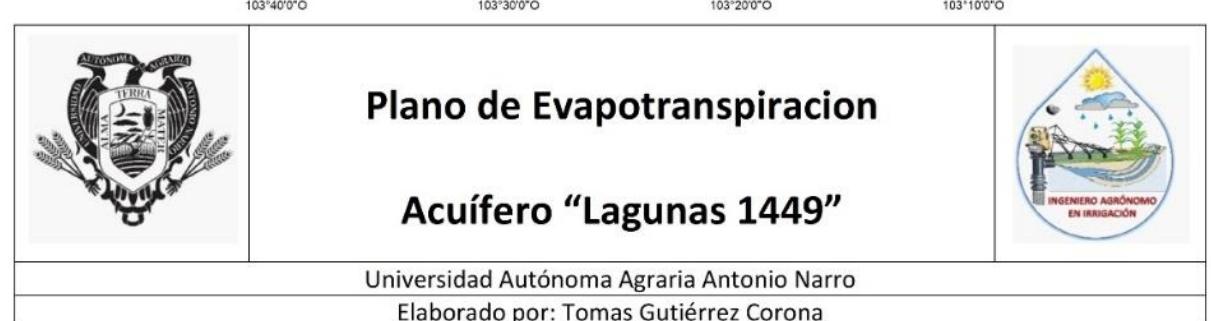
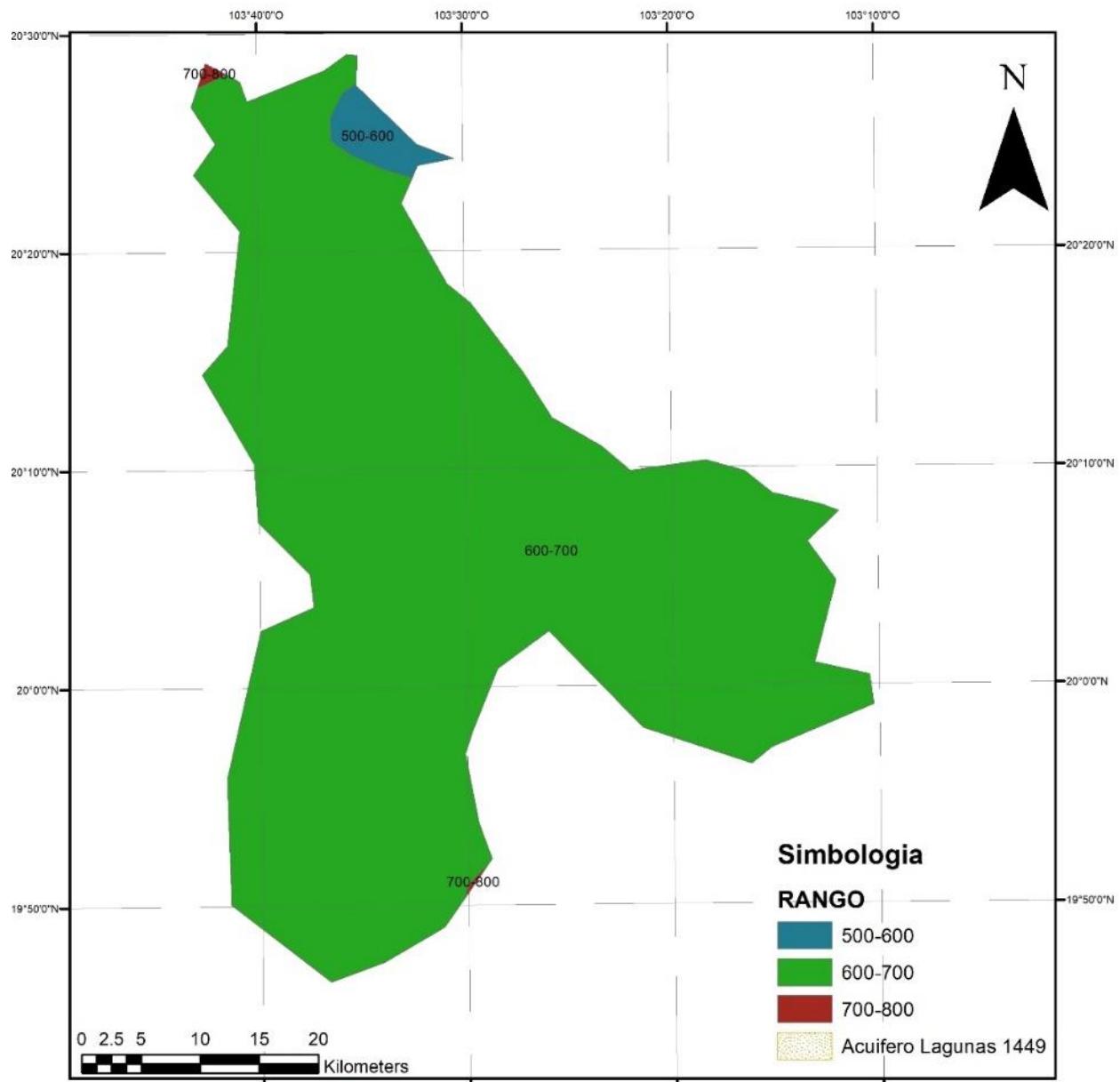


Figura 25.- Plano de Evapotranspiración. (INEGI, 2008)

Este plano representa la distribución espacial de la evapotranspiración anual en el área del acuífero Lagunas 1449, la cual es un parámetro fundamental para evaluar el balance hídrico, la disponibilidad real de agua para recarga del acuífero, y la demanda hídrica de la vegetación y cultivos.

La evapotranspiración es la suma de la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas, y depende de factores como temperatura, radiación solar, tipo de cobertura vegetal y humedad del suelo. En este mapa se identifican tres rangos principales:

- 500 a 600 mm (color azul):

Localizado en el extremo norte del acuífero, representa la zona con menor demanda atmosférica de agua, lo que indica condiciones más favorables para la conservación de humedad en el suelo y mayor eficiencia en la recarga del acuífero, especialmente si coinciden con buena precipitación y suelos permeables.

- 600 a 700 mm (color verde):

Es el rango predominante en el acuífero, abarcando la mayor parte del territorio. Estas tasas moderadas de evapotranspiración implican una demanda hídrica considerable, pero no excesiva. Las zonas bajo este rango pueden presentar recarga limitada, sobre todo si la precipitación es baja o los suelos tienen baja infiltración.

- 700 a 800 mm (color rojo):

Localizadas en pequeñas áreas del noroeste y suroeste, estas zonas presentan las tasas más altas de pérdida de agua por evapotranspiración, lo que disminuye significativamente el volumen disponible para la recarga del acuífero. En estas regiones, las estrategias de manejo deben enfocarse en la conservación de humedad, el uso eficiente del agua y la reforestación o cobertura vegetal permanente.

5.10 GEOLOGÍA

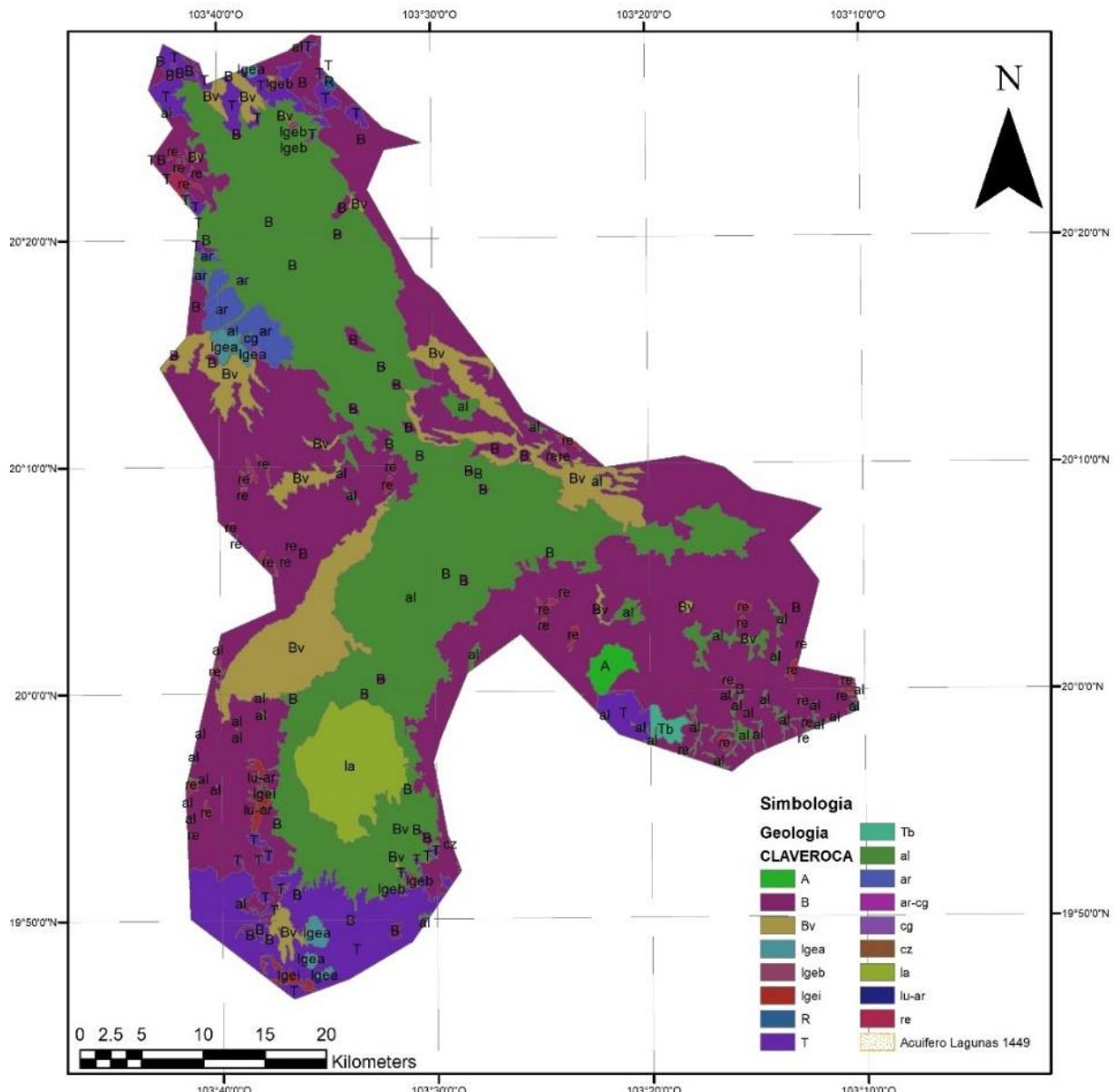


Figura 26.- Plano de Geología. (INEGI, 2020)

Este plano presenta la distribución geológica superficial del área que abarca el acuífero Lagunas 1449, lo cual permite identificar las formaciones litológicas que condicionan los procesos de almacenamiento, circulación y recarga de agua subterránea. La geología es un factor clave en la hidrogeología del acuífero, ya que determina la permeabilidad, porosidad y conductividad hidráulica del subsuelo.

En el plano se representan diferentes unidades geológicas codificadas por clave (según la leyenda) y diferenciadas por colores, entre las que destacan:

- Formaciones volcánicas recientes (clave B, Bv, T):

Ocupan una porción significativa del acuífero. Se componen principalmente de basaltos, tobas y brechas volcánicas, con permeabilidad variable dependiendo del grado de fracturamiento. Estas rocas pueden actuar como acuíferos locales o regionales cuando presentan sistemas de fracturas conectadas, favoreciendo la recarga y el almacenamiento subterráneo.

- Depósitos aluviales y lacustres (claves al, ar, la, ar-cg):

Distribuidos en valles y zonas planas, especialmente en el centro-sur del acuífero. Estas unidades están conformadas por materiales sueltos como arenas, gravas, limos y arcillas, con alta capacidad de infiltración en los sectores más arenosos o gravosos, y buena capacidad de almacenamiento en las zonas finas. Representan zonas clave para la recarga natural del acuífero.

- Rocas sedimentarias y metamórficas (claves re, R):

Generalmente de baja permeabilidad, ubicadas en zonas periféricas o elevadas. Actúan como acuíferos confinados o semiconfinados en casos específicos, pero también como barreras geológicas que limitan la recarga en algunas zonas.

- Rocas ígneas intrusivas y metamórficas antiguas (claves Igeb, Igea, Igei, etc.):

Presentes principalmente al suroeste del área. Son de baja a muy baja porosidad primaria, pero pueden permitir circulación de agua si presentan fracturas importantes. Su participación en la dinámica del acuífero es generalmente limitada, aunque pueden alimentar manantiales si están en contacto con formaciones permeables.

5.11 PIEZOMETRÍA

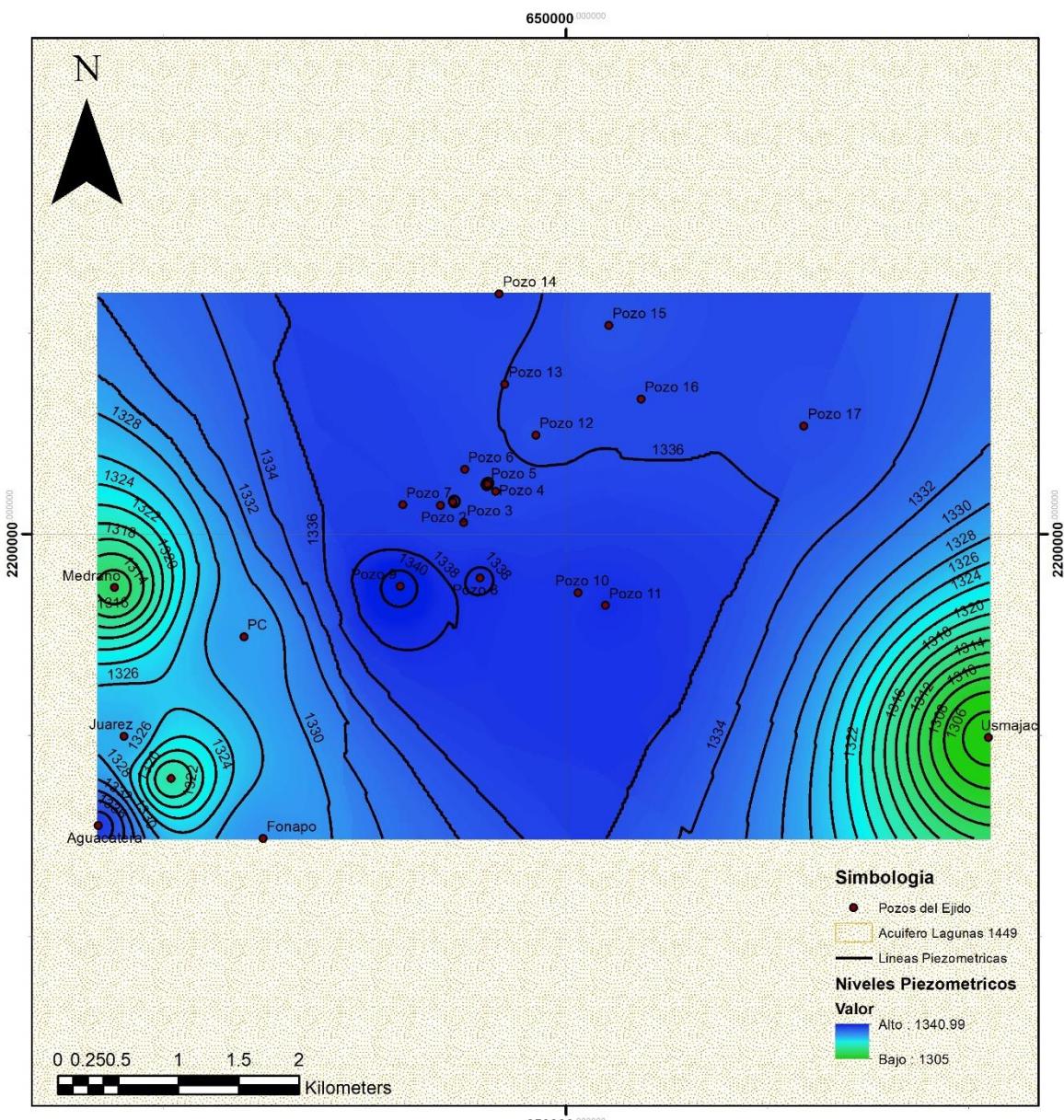


Figura 27.- Niveles piezométricos medidos en el ejido

El plano nos muestra la piezometría actual correspondiente a la parte del ejido donde se puede observar conos de abatimiento provenientes de los pozos que funcionan como abastecimiento urbano, dichos aprovechamientos actúan como un campo de bombeo, creando curvas piezométricas que nos indican un flujo hacia esas explotaciones. Dentro de la parte central se tienen los pozos de uso para la agricultura correspondiente a los niveles estáticos de la zona variando entre 1340 y 1336 msnm. Un punto muy interesante dentro de la zona es el pozo número 9 que al parecer funciona como un parte aguas entre los dos destinos del agua extraída, cabe resaltar que ese pozo cuenta con una olla de almacenamiento de agua, por lo tanto el uso de ese pozo es menos contante a comparación del resto de aprovechamientos agrícolas.

Estos niveles piezométricos están dentro de los mostrados en la figura 11 correspondientes al año 1998, todo esto tomando en cuenta que las escalas de visualización son completamente diferentes.

5.12 FALLAS GEOLÓGICAS

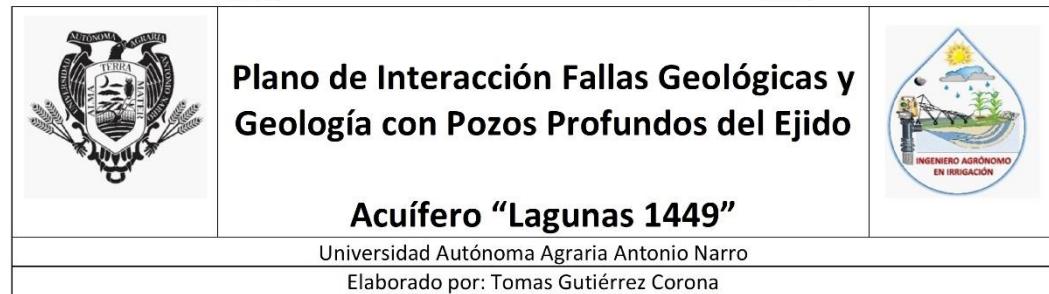
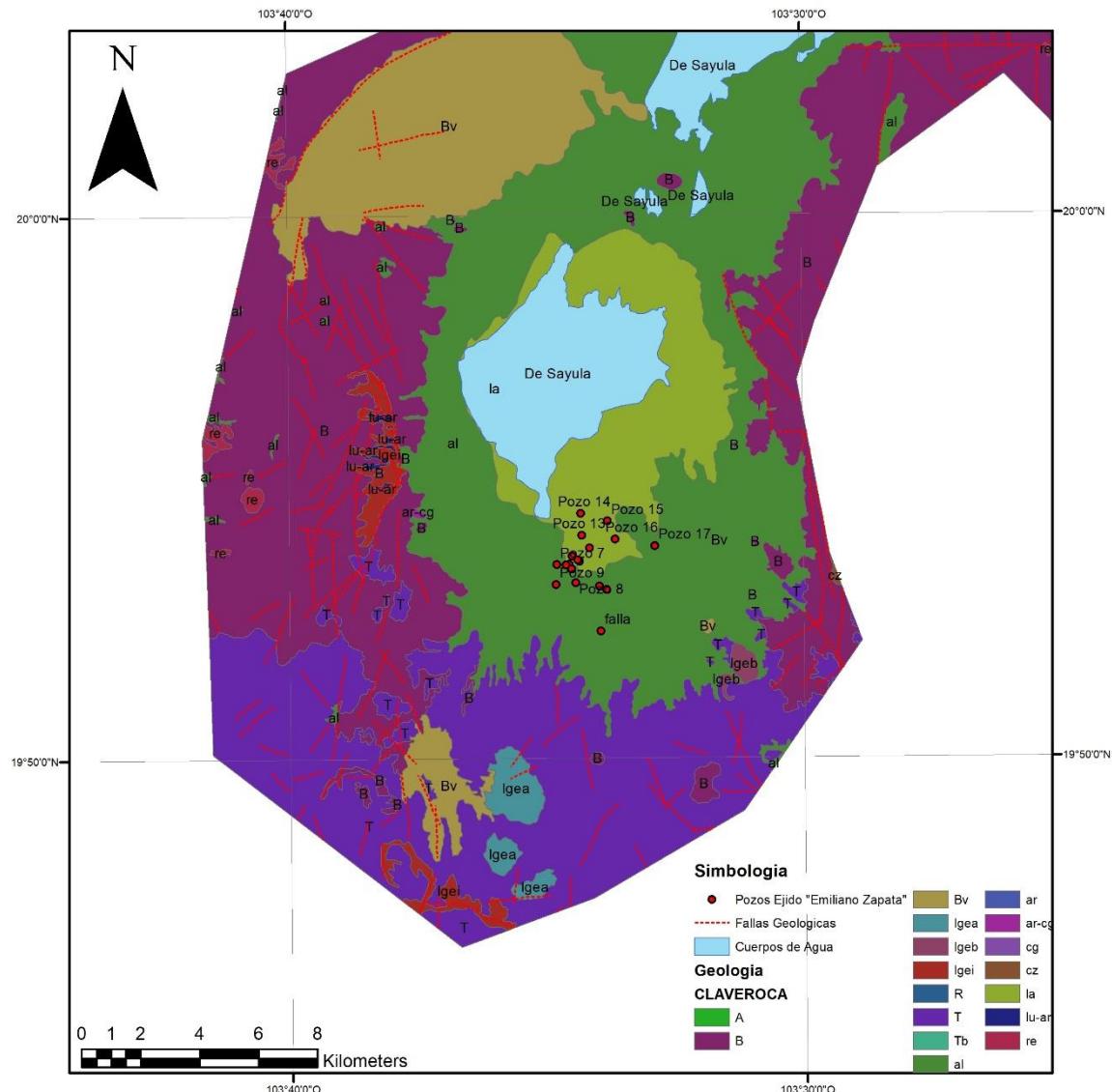


Figura 28.- Plano de interacción de fallas geológicas y geología con los pozos profundos del ejido. (INEGI, 2016)

Esta imagen corresponde a un mapa geológico e hidrogeológico del Acuífero Lagunas 1449, en el municipio de Sayula, Jalisco, donde se muestra la distribución de las unidades litológicas, el trazo de las principales fallas geológicas y la ubicación de algunos pozos profundos pertenecientes al ejido Emiliano Zapata.

En la zona central del mapa se observa la Laguna de Sayula, rodeada por extensos depósitos lacustres y aluviales que forman parte del relleno reciente del valle. Estas unidades están constituidas por materiales no consolidados o débilmente consolidados que, debido a su origen sedimentario, presentan permeabilidades variables según el tamaño de grano y el grado de compactación. Alrededor de estas áreas de relleno se distribuyen unidades volcánicas e ígneas, como tobas, ignimbritas y derrames basálticos, que constituyen el basamento volcánico sobre el cual se depositan los sedimentos recientes.

La representación cartográfica destaca diversas fallas geológicas, la mayoría con una orientación predominante noroeste-sureste, correspondiente a la dirección predominante de las estructuras asociadas al graben Zacoalco-Colima. Estas fallas atraviesan tanto los depósitos lacustres y aluviales como las formaciones volcánicas más antiguas, ejerciendo un control estructural significativo sobre la configuración hidrogeológica del valle. Algunas fallas secundarias muestran orientaciones variables, principalmente noreste-suroeste, lo que refleja la complejidad tectónica del área y la influencia de los campos de esfuerzos regionales.

Los pozos profundos del ejido Emiliano Zapata se concentran en la parte sur del valle, en una zona de transición donde los depósitos lacustres convergen con formaciones volcánicas. Esta ubicación no es casual, ya que coincide espacialmente con la presencia de varias fallas geológicas que atraviesan el área. La asociación entre pozos y fallas indica la importancia de estas estructuras en el control del flujo subterráneo: en algunos casos actúan como conductos que facilitan la recarga y el flujo vertical a través

de la fracturación del basamento volcánico, mientras que en otros pueden comportarse como barreras hidráulicas que generan contrastes en el gradiente y provocan variaciones de presión entre bloques adyacentes.

La interacción entre fallas y pozos tiene consecuencias importantes tanto para la dinámica del acuífero como para la integridad de las estructuras de extracción. Desde una perspectiva hidrogeológica, las fallas permiten la interconexión entre materiales con distinta permeabilidad, lo cual puede aumentar la disponibilidad de agua en los pozos ubicados sobre estas estructuras. Sin embargo, también incrementan la vulnerabilidad del acuífero, pues pueden facilitar abatimientos localizados o la migración de contaminantes hacia zonas más profundas. En lo que respecta a la infraestructura, la cercanía de los pozos a las fallas eleva la probabilidad de daños en los ademas debido a inestabilidad estructural, asentamientos diferenciales o esfuerzos asociados a la tectónica activa de la región.

Es importante señalar que la información disponible no está totalmente actualizada, ya que eventos tectónicos recientes en la zona han generado fallas y fracturas adicionales en proximidad al ejido.

La coincidencia espacial entre fallas y pozos profundos confirma que la fracturación tectónica desempeña un papel decisivo en la explotación del Acuífero Lagunas 1449, pero también plantea desafíos técnicos relacionados con la estabilidad de los pozos, el manejo sostenible del recurso y la prevención de problemas estructurales derivados de la interacción entre la extracción de agua y la actividad tectónica regional

6. CONCLUSIONES

El análisis integral de la cartografía temática consultada para el acuífero Lagunas 1449, permite construir una visión holística del contexto físico-natural que define el comportamiento y potencial de este sistema hídrico. Cada plano aporta información clave que, al ser interpretada de manera conjunta, enriquece la comprensión sobre los factores que inciden en la recarga, explotación y sostenibilidad del acuífero. Esta integración también es fundamental para una adecuada planificación del uso del territorio y los recursos naturales. A continuación, se presenta una reflexión sistemática con base en cada uno de los temas tratados.

- Clima

El plano climático revela una diversidad de tipos climáticos presentes en la región del acuífero. Predominan los climas semicálidos subhúmedos con distinta variación en la estacionalidad de lluvias ((A)C(w1), (A)C(w0)), así como zonas con clima seco estepario (BS1hw). Esta variabilidad climática impacta directamente en la disponibilidad y estacionalidad del agua superficial y subterránea. Las zonas con clima subhúmedo favorecen la recarga del acuífero, mientras que las áreas con clima más seco están expuestas a mayor estrés hídrico, incrementando la presión sobre el acuífero. Además, la distribución espacial de estos climas influye en la vocación productiva del suelo y en los tipos de vegetación natural o inducida.

- Cuerpos de Agua

El plano de cuerpos de agua muestra la ubicación de lagunas y depósitos naturales, como las lagunas de Sayula, San Marcos y Atotonilco. Estos cuerpos de agua son vitales en el ciclo hidrológico, ya que actúan como reservorios de captación pluvial y zonas de recarga directa o indirecta para el acuífero. Su ubicación en zonas relativamente bajas coincide con áreas de menor altitud, lo que confirma su rol como

sumideros naturales. La preservación de estos cuerpos de agua es crítica para mantener los niveles freáticos y evitar la sobreexplotación del recurso subterráneo.

- Curvas de Nivel (Altimetría)

La altimetría del terreno, reflejada en el plano de curvas a nivel, muestra un relieve variado con altitudes que van desde los 1,252 hasta los 2,886 metros sobre el nivel del mar. Esta diferencia altitudinal genera gradientes hidráulicos que influyen en la dirección del flujo subterráneo. Las zonas altas actúan como áreas de recarga, mientras que las zonas bajas funcionan como puntos de descarga. Esta información es esencial para modelar el flujo del acuífero y definir estrategias de recarga artificial. Asimismo, la altitud está estrechamente ligada al tipo de clima, tipo de vegetación, uso de suelo y erosión potencial.

- Edafología

El análisis edafológico identifica una gran diversidad de tipos de suelo en la región del acuífero. Se destacan suelos como Feozem háplico, Vertisol pélico y crómico, Cambisol crómico, Andosol húmico y molico, y Solonchak gleyico y órtico. Estos suelos tienen características muy distintas en cuanto a fertilidad, capacidad de retención de agua, profundidad efectiva y susceptibilidad a la erosión. Los Feozem, por ejemplo, son altamente fértiles y adecuados para la agricultura, mientras que los Vertisoles presentan alta plasticidad y expansión que pueden dificultar el cultivo. Por su parte, los Solonchak son suelos salinos que requieren manejo especial para evitar degradación. Conocer la distribución de estos suelos permite optimizar el uso agrícola, controlar la erosión y favorecer prácticas de conservación.

- Evapotranspiración

El plano de evapotranspiración estima que la mayor parte del acuífero tiene una pérdida de agua por evapotranspiración en el rango de 600 a 700 mm anuales. Solo en

algunas pequeñas zonas al norte y suroeste se registran valores mayores (700-800 mm) o menores (500-600 mm). Este dato es esencial para calcular la disponibilidad neta de agua y la eficiencia de recarga. En zonas de alta evapotranspiración, gran parte de la precipitación se pierde antes de infiltrar, reduciendo la eficiencia de captación natural. Este fenómeno puede agravarse si coincide con suelos poco permeables o zonas deforestadas, por lo que la gestión del acuífero debe considerar este balance hídrico.

- Geología

Desde el punto de vista geológico, el plano evidencia una composición diversa que incluye rocas volcánicas, brechas, tobas, ignimbritas, basaltos y sedimentos recientes. Estas formaciones geológicas definen la permeabilidad del subsuelo y, por tanto, la capacidad del terreno para almacenar y transmitir agua. Las zonas con materiales volcánicos fracturados tienen alta permeabilidad localizada, mientras que los sedimentos recientes presentan una permeabilidad más generalizada y continua. El conocimiento de esta geología es vital para ubicar zonas con mayor potencial de recarga, así como para perforar pozos eficientes en términos de caudal y calidad del agua.

- Hidrogeología

En el plano hidrogeológico se identifican tres unidades principales: materiales volcánicos con permeabilidad baja a media, materiales volcánicos fracturados con permeabilidad media localizada, y depósitos aluviales y lacustres con permeabilidad media a alta. Esta clasificación permite definir zonas de recarga y almacenamiento principales. La zona de depósitos recientes se presenta como la más favorable para extraer agua, mientras que las zonas de materiales volcánicos requieren perforaciones más profundas. Este conocimiento es clave para evitar sobreexplotación y hundimientos por subsidencia, así como para planificar recargas artificiales.

- Precipitación

La precipitación en el área del acuífero varía entre los 600 y 1500 mm anuales.

La mayoría del área recibe entre 600 a 800 mm, lo que indica una disponibilidad hídrica limitada, especialmente cuando se contrasta con la alta evapotranspiración. Solo pequeñas áreas del sur y suroeste superan los 1200 mm anuales, lo que coincide con zonas de mayor altitud y vegetación más densa. Esta distribución desigual obliga a una planificación espacialmente diferenciada para conservar zonas de alta recarga y mejorar la infiltración en las zonas más secas mediante reforestación o prácticas de captación.

- Provincias Fisiográficas

El plano de provincias fisiográficas indica que el acuífero se ubica principalmente en la provincia de Chapala, con una pequeña porción dentro de la Sierra de Jalisco. La provincia de Chapala se caracteriza por valles y cuencas sedimentarias, ideales para la acumulación de agua subterránea. Por su parte, la Sierra de Jalisco presenta topografía más abrupta, menor infiltración y mayor escurreimiento superficial. Estas diferencias deben considerarse al diseñar estrategias de conservación del acuífero y priorizar acciones según el relieve y características morfológicas.

- Uso de Suelo y Vegetación

El uso de suelo y vegetación es sumamente heterogéneo. Se observa una gran presencia de agricultura de temporal anual, agricultura de riego, asentamientos humanos, y diferentes tipos de bosque (encino, pino, mixtos), así como vegetación secundaria. Esta diversidad indica una presión fuerte sobre el recurso hídrico, ya que la agricultura intensiva y los asentamientos demandan agua de manera constante. Además, la vegetación secundaria sugiere degradación ambiental y pérdida de cobertura natural, lo cual compromete la recarga del acuífero. Es prioritario conservar las zonas de

bosque natural y fomentar la restauración ecológica en áreas degradadas para mantener el equilibrio hídrico.

- Fallas Geológicas

La información que se tiene sobre las fallas geológicas locales permite analizar en conjunto con la geología una interacción debido a que el ejido se ubica en una zona de transición del material geológico, entre material Lacustre y Aluvión. Esto se complementa con los perfiles que expone Rosas Palafox (2016) donde podemos ver de una manera más actualizada la dinámica de los fracturamientos, su ubicación, así como sus direcciones.

- Movimiento de ademes

En el presente trabajo se observó que las fuerzas que actúan sobre el movimiento regional de los ademes, es únicamente de desplazamiento vertical hacia la superficie ya que no se han tenido desplazamientos por fuerza de tensión, compresión, doblez, colapso o de expansión. El funcionamiento de pozos no se ha visto afectado por ninguno de estos fenómenos.

La combinación de todos estos factores revela un sistema complejo y dinámico donde el recurso hídrico subterráneo está fuertemente influenciado por la interacción entre el clima, el suelo, la geología, el relieve y el uso del territorio. El acuífero Lagunas 1449 tiene zonas con alta potencialidad de recarga principalmente en áreas con mayor precipitación, altitud y cobertura forestal, pero también enfrenta presiones significativas por uso agrícola intensivo, asentamientos humanos y degradación ambiental.

La conservación del acuífero debe ser una prioridad regional, mediante una gestión integrada que considere:

- La zonificación de recarga y descarga.
- El uso racional del agua en agricultura.

- La reforestación y conservación de áreas naturales.
- El monitoreo permanente de niveles freáticos y calidad del agua.
- La regulación de perforaciones en zonas geológicamente vulnerables.

7. RECOMENDACIONES

Derivado a esta investigación realizada se visualizaron distintas posibles atribuciones para complementar esta investigación de una mejor manera:

- Actualizar información tanto de características ambientales, del suelo y de las fallas geológicas es un punto completamente necesario ya que ayudara a dar una respuesta más cercana a la realidad.
- Hacer un modelado en algún simulador de agua subterránea tales como ModFlow o ModelMuse que ayude a hacer un análisis subterráneo completo y así extender esta investigación.
- Realizar intersecciones espaciales y modelos de superposición temática, para generar mapas de zonificación potencial de recarga, zonas vulnerables a la sobreexplotación, y áreas con mayor riesgo de colapso estructural en pozos.
- Realizar una integración y análisis multivariable para así poder realizar un análisis espacial correlacional e identificar las relaciones entre las variables trabajadas, inclusive añadir aún más.
- Llevar a cabo un análisis estadístico como el coeficiente de correlación de Pearson para tener más a detalle y numéricamente las relaciones que existen, dado que esta es una medida de dependencia lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas.
- Para próximas perforaciones es recomendable ampliar la perforación para dejar actuar el material filtrante como amortiguamiento a movimientos locales del material geológico presente.

8. BIBLIOGRAFÍA

Bandy, W. L., Mortera-Gutierrez, C. A., y Urrutia-Fucugauchi, J, (1993). Gravity field of the southern Colima graben, Mexico. *Geofísica Internacional* (1993).
<https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1993.32.4.602>

Columna estratigráfica. (2017). Servicio Geológico Mexicano. Recuperado el 2 de noviembre de 2025, de
<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Estratigrafia/Columna-estratigrafica.html>

Comisión Estatal del Agua de Jalisco. (2015). *Ficha hidrológica de la región 3: Sayula* (PDF). Comisión Estatal del Agua de Jalisco.
https://www.ceajalisco.gob.mx/doc/fichas_hidrologicas/region3/sayula.pdf

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Rehabilitación de pozos*. Recuperado el 28 de noviembre de 2025, de
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro40.pdf>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). Estado del acuífero 1449, Jalisco (DR 1449). Recuperado de

https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/jalisco/DR_1449.pdf

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2022). *Catálogo de topografía a escala 1:50 000 (serie 3)*. Geoportal CONABIO.

<http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/catp50s3gw.html>

García, E.-Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (2008). Climas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

<http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/clima1mgw.html>

Herrera Castañeda Sergio, (2002). Mecánica de rocas. Universidad Nacional Autónoma de México.

http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.1/00/15391/decld_3348.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2001). *Fisiografía*. Org.mx. Recuperado el 17 de noviembre de 2025, de

<https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). *Continuo de elevaciones mexicano y modelos digitales de elevación*. Org.mx. Recuperado el 16 de enero de 2025, de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Geología*. Org.mx. Recuperado el 11 de enero de 2025, de <https://www.inegi.org.mx/temas/geologia/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). *Edafología*. Org.mx. Recuperado el 1 de septiembre de 2025, de <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). *Uso de suelo y vegetación*. Org.mx. Recuperado el 11 de agosto de 2025, de <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI). (2016). Conjunto de datos vectoriales geológicos, Escala 1:50,000. Estructura geológica. Recuperado el 29 de enero de 2025, de https://datos.jalisco.gob.mx/sites/default/files/recursos/archivos/geologia_1a50k_jalisco

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI). (2018). *División política municipal, 1:250000. 2018*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/muni_2018gw.html

Jalisco. (2021). *Gobierno de Jalisco*. Gob.mx. Recuperado el 14 de noviembre de 2025, de https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/municipios/sayula?utm_source=

Marín-C, y Torres- Ruata, S, (2008), *Hidrogeología*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

<http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/hidgeo4mgw.html>

Ramírez Oyanguren Pedro y Alujano Monge Leandro, (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Pag 65.

https://oa.upm.es/14183/1/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf

Rosas Palafox Alejandro Cruz, (2016) *Modelo Geofísico-Estructural de la Porción Norte del Graben de Colima*, Tesis de maestría, Instituto Potosino de Investigación Técnica y Científica A.C.
<https://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/handle/11627/2927/RosasPalafox.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Tribunal Superior Agrario. (1995). *Boletín Judicial Agrario No. 36*. Secretaría de la Reforma Agraria. <https://www.tribunalesagrarios.gob.mx/ta/docs/pub/bol/036.pdf>

Vidal-Zepeda, R. (2008). *Precipitación media anual*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Recuperado el 20 de junio de 2025, de <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/preci4mgw.html>